



Regimes de Neutro e Instalações de Ligação à Terra em Instalações Industriais

ISMAEL MAGALHÃES KIDAI

julho de 2024

Regimes de Neutro e Redes de Terra em Unidades Industriais

Ismael Magalhães Kidai

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

Orientador: Professor António Augusto Araújo Gomes

Júri:

Presidente:

Fernando Maurício Teixeira de Sousa Dias, Professor Adjunto, ISEP

Vogais:

Teresa Alexandra Ferreira Mourão Pinto Nogueira, Professor Adjunto, ISEP

António Augusto Araújo Gomes, Professor Adjunto, ISEP

Resumo

No âmbito desta dissertação, serão desenvolvidos estudos técnico/económicos relativamente à implementação de regimes de neutro e redes de terras numa instalação industrial destinada à produção de baterias de lítio.

Com o objetivo de integrar, apresentar e compreender as temáticas da dissertação realizou-se, na primeira parte do trabalho, o estado da arte. No estado da arte, primeiramente foi abordado os efeitos da corrente elétrica no corpo humano, no qual pode não ocorrer qualquer reação ou, pelo contrário, pode provocar paragem cardíaca, sendo os riscos mais elevados quanto maior for a intensidade de corrente e a duração do contacto. A compreensão dos riscos associados à passagem de corrente elétrica pelo corpo humano permite a integração de medidas de proteção eficazes nas instalações. As proteções são divididas em proteção contra contactos diretos e indiretos, no qual, ambas as proteções, apresentam medidas ativas e passivas. A introdução destes conceitos foi importante para a compreensão detalhada dos regimes de neutro. Relativamente a este tópico, a norma IEC 60364 identifica três esquemas de ligação à terra no qual foram apresentadas as particularidades de funcionamento de cada um. Por fim, o último tema elaborado foi referente às instalações de ligações à terra, no qual foi ilustrado a constituição de uma instalação de ligação à terra com uma devida explicação dos vários constituintes da mesma. No âmbito deste tema, foi importante abordar a resistência de terra e a resistividade, pois são dois parâmetros essenciais e que necessitam de ser controlados para um dimensionamento apropriado das redes de terra.

O estágio foi desenvolvido em contexto empresarial na “Quadrante – Engenharia e Consultoria, S.A.”. A execução do trabalho de desenvolvimento foi apoiada numa fábrica de produção de baterias de lítio, situada na zona industrial e logística de Sines, a qual apresenta diversos edifícios com funcionalidades diferentes. Dadas as características inerentes a uma planta industrial, foi fundamental ter em consideração a fiabilidade, continuidade de serviço e segurança das pessoas. Assim, foi realizado um estudo do esquema de ligação à terra adequado à unidade industrial, bem como uma análise da viabilidade económica do cenário implementado. Por último, em relação às redes de terra, o objetivo consistiu em identificar as implicações no seu *design* e uma análise de diversas soluções com a finalidade de garantir a segurança da instalação.

Palavras-chave: Regimes de Neutro, Distribuição de Energia, Dimensionamento, Redes de Terra

Abstract

As part of this dissertation, technical/economic studies will be carried out on the implementation of neutral earthing and earthing grids in an industrial plant to produce lithium batteries.

To integrate, present and understand the themes of the dissertation, the first part of the work was the state of the art. In the state of the art, we first looked at the effects of electric current on the human body, in which there may be no reaction or, on the contrary, it may cause cardiac arrest, the risks being higher the greater the current intensity and the duration of contact. Understanding the risks associated with the passage of electric current through the human body allows effective protection measures to be integrated into installations. Protection is divided into direct and indirect contact protection, both of which include active and passive measures. The introduction of these concepts was important for a detailed understanding of neutral earthing. In relation to this topic, the IEC 60364 standard identifies three neutral earthing, in which the operating characteristics of each were presented. Finally, the last topic was on earthing installations, in which the constitution of an earthing installation was illustrated with a proper explanation of its various components. As part of this topic, it was important to address earth resistance and resistivity, as these are two essential parameters that need to be controlled in order to properly size the earthing grid.

The internship was developed in a business context at "Quadrante - Engenharia e Consultoria, S.A.". The development work was carried out in a lithium battery production plant, located in the industrial and logistics area of Sines, which has several buildings with different functions. Given the inherent characteristics of an industrial plant, it was essential to consider reliability, continuity of service and people's safety. A study was therefore carried out into the appropriate neutral earthing for the industrial plant, as well as an analysis of the economic viability of the scenario implemented. Finally, about the earthing grid, the aim was to identify the implications for its design and an analysis of various solutions with the aim of guaranteeing the safety of the installation.

Keywords: Neutral Earthing, Energy Distribution, Sizing, Earth Grid

Agradecimentos

Começo por agradecer ao meu orientador, o Professor António Augusto Araújo Gomes, por toda a disponibilidade demonstrada e conhecimentos transmitidos ao longo do desenvolvimento da dissertação e que foram absolutamente essenciais para o sucesso do meu percurso académico.

Um agradecimento à Quadrante, pela oportunidade de realizar o estágio nas suas instalações. Um especial obrigado ao meu orientador, o Engenheiro Carlos Souto, e a todos os engenheiros da equipa de HVE – *High Voltage Energy*, pelo suporte e auxílio para enfrentar as adversidades que surgiram aquando da realização das tarefas, proporcionando uma experiência bastante enriquecedora em diversos níveis.

Aproveito também para agradecer a todos os docentes que me acompanharam ao longo da minha licenciatura e mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Eléctricos de Energia.

Por último, mas não menos importante, um agradecimento muito especial à minha mãe pelo apoio incondicional ao longo de toda a minha vida, o qual foi fundamental para me tornar na pessoa que sou hoje. A sua constante motivação e companhia foi o principal fator que me permitiu enfrentar os desafios e ultrapassar os obstáculos.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas	xv
Siglas e Acrónimos	xvii
1. Introdução	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Apresentação da Empresa.....	2
1.3 Apresentação dos Intervenientes	3
1.3.1 Aluno.....	3
1.3.2 Orientador no Instituto Superior de Engenharia do Porto	3
1.3.3 Orientador na Quadrante	3
1.4 Organização do Relatório	3
2. Efeitos da Corrente Elétrica sobre o Corpo Humano e Proteção de Pessoas em Instalações Elétricas.....	5
2.1 Enquadramento.....	5
2.2 Efeitos da Corrente Elétrica Sobre o Corpo Humano	5
2.3 Proteção de Pessoas em Instalações Elétricas	7
2.3.1 Proteção contra contactos diretos.....	7
2.3.1.1 Medidas Passivas.....	7
2.3.1.2 Medidas Ativas	8
2.3.2 Proteção contra contactos indiretos	8
2.3.2.1 Medidas Passivas.....	9
2.3.2.2 Medidas Ativas	9
2.4 Esquemas de Ligação à Terra.....	9
2.4.1 Esquema TT	10
2.4.2 Esquema TN	12
2.4.3 Esquema IT	17
2.5 Instalações de Ligação à Terra	22
2.5.1 Constituição de uma instalação de ligação à terra	22
2.5.1.1 Massa.....	22
2.5.1.2 Ligação Equipotencial	22
2.5.1.3 Terminal Principal de Terra	24

2.5.1.4	Conductor de Proteção	24
2.5.1.5	Conductor de Terra	25
2.5.1.6	Eléctrodo de Terra.....	26
2.5.2	Resistividade	28
2.5.3	Estimativa da resistência de terra.....	31
2.5.4	Medição da resistência de terra	31
2.5.5	Melhoramento da resistência de terra	34
3.	Estudo de Caso - Unidade Industrial de Produção de Baterias de Lítio	35
3.1	Enquadramento	35
3.2	Caracterização da Indústria	36
3.3	Estimativa de Potência.....	38
3.3.1	Enquadramento	38
3.3.2	Potência Instalada nos Postos de Transformação do Edifício M2.....	38
3.3.3	Potência Instalada na Subestação	39
3.4	Distribuição de Energia	40
3.4.1	Enquadramento	40
3.4.2	Solução Técnica de Distribuição	40
3.4.2.1	Muito alta tensão	40
3.4.2.2	Média Tensão	41
3.4.2.3	Baixa Tensão.....	43
3.5	Esquema de Ligação à Terra	44
3.5.1	Enquadramento	44
3.5.2	Seleção	45
3.5.3	Análise económica entre TN-S e TN-C	45
3.5.3.1	Enquadramento.....	45
3.5.3.2	Ferramenta informática desenvolvida	46
3.5.3.3	Resultados	49
3.6	Secção Económica de Canalizações Eléctricas	50
3.6.1	Enquadramento	50
3.6.2	Dimensionamento Económico	51
3.6.3	Estudo de Caso	53
3.7	Alimentação de Socorro.....	59
3.7.1	Enquadramento	59
3.7.2	Distribuição de Energia	59
3.7.3	Sala Técnica do Grupo Gerador	61
3.7.3.1	Potência do grupo gerador.....	62
3.7.4	Dimensionamento e Cálculos.....	62
3.7.4.1	Resultados	65
3.7.5	Cálculo das Necessidades de Ventilação.....	66
3.7.6	Extração dos Gases de Escape	67
3.8	Redes de Terra	68
3.8.1	Enquadramento	68

3.8.2	Dados do Terreno.....	69
3.8.3	Cálculo da Corrente na Rede de Terras	70
3.8.4	Secção dos Condutores	72
3.8.5	Tensões de Passo e de Contacto	73
3.8.6	Elevação do Potencial de Terra	75
3.8.7	Validação das Tensões de Passo e de Contacto	76
3.9	Ferramentas Computacionais.....	79
	Conclusão.....	81
	Referências	85
	Anexos	87
	Anexo I - Distribuição em Baixa Tensão	87
	MCC-M2-016-2.....	87
	MCC-M2-017-1.....	88
	MCC-M2-017-2.....	89
	MCC-M2-004-1.....	90
	MCC-M2-006-1.....	91
	Anexo II - Código Desenvolvido para a Análise Económica entre o Esquema TN-S e o Esquema TN-C.....	92

Índice de Figuras

Figura 1 – Riscos associados à passagem de corrente pelo corpo humano segundo o IEC [3] ...	6
Figura 2 – Contacto Direto [5].....	7
Figura 3 – Contacto Indireto [5].....	8
Figura 4 – Esquema de ligação à Terra TT [7]	11
Figura 5 – Malha de defeito no esquema TT [5]	11
Figura 6 – Esquema de ligação à Terra TN-C [1]	13
Figura 7 – Esquema de ligação à Terra TN-S [1].....	13
Figura 8 – Esquema de ligação à Terra TN-C-S [1]	13
Figura 9 – Malha de defeito no esquema TN-C [5]	14
Figura 10 – Curva de funcionamento do disjuntor [13].....	16
Figura 11 – Curva de funcionamento do fusível [13].....	16
Figura 12 – Sistema IT impedante com neutro distribuído [13]	17
Figura 13 – Sistema IT impedante sem neutro distribuído [13]	17
Figura 14 – Sistema IT isolado [5]	17
Figura 15 – Impedância de fuga à terra [5].....	17
Figura 16 – Inconvenientes na distribuição do condutor neutro [7]	18
Figura 17 – Malha de defeito no esquema IT ao primeiro defeito [5].....	19
Figura 18 – Soma vetorial das tensões em caso de defeito [13]	19
Figura 19 – Soma vetorial das correntes [13]	19
Figura 20 - Malha de defeito no esquema IT ao segundo defeito [5].....	21
Figura 21 – Sistema IT com as massas ligadas à terra por grupos ou individualmente [5]	21
Figura 22 – Instalação de Ligação à Terra [1].....	22
Figura 23 – Tipos de eléctrodos e respetivas dimensões [1].....	27
Figura 24 – Esquema do princípio de funcionamento do método de Wenner [9]	28
Figura 25 – Curvas relativas à variação da resistividade com a profundidade [9].....	29
Figura 26 – Variação da resistividade com a humidade [19]	30
Figura 27 – Variação da resistividade com a presença de sais no solo [19]	31
Figura 28 – Distribuição dos eléctrodos [9]	32
Figura 29 – Método das quedas de tensão e curva de resultados [9]	32
Figura 30 – Princípio de funcionamento do método seletivo [9]	33
Figura 31 – Princípio de funcionamento do método <i>Clamp-On</i> [9].....	33
Figura 32 – Planta da Instalação Industrial de Produção de Baterias de Lítio	37
Figura 33 – Potência instalada nos postos de transformação	39
Figura 34 – Alimentação da unidade industrial	39
Figura 35 – Determinação da potência na subestação	40
Figura 36 – Diagrama simplificado de distribuição de energia elétrica em muito alta tensão .	41
Figura 37 – Diagrama simplificado de distribuição de energia elétrica em média tensão	42
Figura 38 – Diagrama simplificado da distribuição de energia no edifício M2	43
Figura 39 – Diagrama simplificado da distribuição em baixa tensão para o MCC – M2 – 016 – 1	44

Figura 40 – Capa da ferramenta informática desenvolvida	46
Figura 41 – Página destinada à gravação dos dados	46
Figura 42 – Introdução dos dados	47
Figura 43 – Bloqueio das características associadas à canalização pré-fabricada	48
Figura 44 – Bloqueio das características associadas ao cabo	48
Figura 45 – Configuração da canalização	48
Figura 46 – Funcionalidade da opção “Redução da Secção do Condutor PE e Neutro.....	48
Figura 47 – Bloqueio das características associadas à função de transporte	49
Figura 48 – Bloqueio das características associadas à função de distribuição	49
Figura 49 – Preço total do esquema TN-S	50
Figura 50 – Preço total do esquema TN-C.....	50
Figura 51 – Comparação da viabilidade económica em toda a instalação	50
Figura 52 – Comparação da viabilidade económica em cada MCC.....	50
Figura 53 – Custo dos cabos em função da secção	51
Figura 54 – Secção económica para o circuito 1	58
Figura 55 – Secção económica para o circuito 2	58
Figura 56 – Retorno do investimento para o circuito 1	59
Figura 57 – Retorno do investimento para o circuito 2	59
Figura 58 – Diagrama de alimentação dos quadros de emergência	60
Figura 59 – Esquema unifilar do quadro de transferência de cargas e do quadro de segurança	61
Figura 60 - Resultados do dimensionamento.....	66
Figura 61 – Diagrama da metodologia de dimensionamento da rede de terras	69
Figura 62 – Modelo de solo considerado para a área da instalação	70
Figura 63 – Percurso da corrente de defeito até ao solo	71
Figura 64 – Corrente máxima que percorre o eléctrodo de terra	72
Figura 65 – Esquema e circuito equivalente da tensão de contacto.....	74
Figura 66 – Esquema e circuito equivalente da tensão de passo.....	74
Figura 67 – Representação da rede enterrada a 1 metro de profundidade	76
Figura 68 – Resultados da tensão de contacto para a primeira simulação.....	77
Figura 69 – Resultados da tensão de contacto para a segunda simulação.....	77
Figura 70 – Resultados da tensão de contacto para a terceira simulação.....	78
Figura 71 – Resultados da tensão de contacto para a quarta simulação.....	79
Figura 72 – Resultados da tensão de passo para a quarta simulação.....	79

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Circuitos de Terra	10
Tabela 2 – Valor máximo da resistência do eletrodo de terra das massas [2]	12
Tabela 3 – Tempo de atuação dos dispositivos de proteção	12
Tabela 4 – Tempo de atuação dos dispositivos de proteção [5].....	15
Tabela 5 – Aumento da Resistência em função da seção [12]	15
Tabela 6 – Tempo de atuação dos dispositivos de proteção [2].....	20
Tabela 7 – Seção mínima para as ligações equipotenciais suplementares [1]	23
Tabela 8 – Seção mínima do Condutor PE consoante a seção dos Condutores de Fase [1] ..	25
Tabela 9 – Seção mínima do Condutor de Terra [1].....	25
Tabela 10 – Valores de resistividade para diferentes terrenos [1]	30
Tabela 11 – Variação da resistividade com a temperatura [17]	30
Tabela 12 – Resistência do eletrodo de terra [1]	31
Tabela 13 – Organização dos edifícios por categorias	37
Tabela 14 – Características do circuito 1	53
Tabela 15 – Características do circuito 2	54
Tabela 16 – Dados iniciais	54
Tabela 17 – Resistência para cada seção de condutor.....	55
Tabela 18 – Custo de exploração para cada seção de condutor no circuito 1	55
Tabela 19 – Custo de exploração para cada seção de condutor no circuito 2	56
Tabela 20 – Cálculo da variável A.....	56
Tabela 21 – Custo total para cada seção de condutor ao fim de 20 anos no circuito 1	57
Tabela 22 – Custo total para cada seção de condutor ao fim de 20 anos no circuito 2	57
Tabela 23 – Quedas de tensão máximas admissíveis	63
Tabela 24 – Resistividade do solo na zona de implantação da instalação industrial.....	70
Tabela 25 – Características do cobre [23]	72
Tabela 26 – Ferramentas computacionais utilizadas durante a dissertação	79

Siglas e Acrónimos

BT	Baixa Tensão
CPI	Controlador Permanente de Isolamento
ELT	Esquema de Ligação à Terra
ETAP	<i>Electrical Transient Analyzer Program</i>
frs	<i>Fire Resistant</i>
frt	<i>Fire Retardant</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IT	Esquema de ligação à terra – Partes ativas isoladas da terra ou ligadas à terra por meio de uma impedância e massas ligadas à terra
MCC	<i>Motor Control Center</i>
MT	Média Tensão
PE	Condutor de Proteção
PEN	Condutor de Proteção e Neutro
RTIEBT	Regras Técnicas de Instalações Elétricas em Baixa Tensão
TN	Esquema de ligação à terra – Ponto de alimentação ligado à terra e massas ligadas a este ponto através de condutores de proteção
TN-C	Esquema de ligação à terra – Função do condutor de neutro e do condutor de proteção combinados num único condutor
TN-S	Esquema de ligação à terra – Separação do condutor de neutro e do condutor de proteção
TRP	Tensão Reduzida de Proteção
TRS	Tensão Reduzida de Segurança
TT	Esquema de ligação à terra – Ponto de alimentação ligado diretamente à terra de alimentação e massas ligadas ao eletrodo de terra das massas
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>
zh	<i>Zero Halogen</i>

1. Introdução

A eletricidade é um fator de produção indispensável na indústria. Atualmente, nos processos industriais, verifica-se um aumento de equipamentos com elevada complexidade, muito dependentes da qualidade de energia e cuja interrupção de funcionamento pode provocar perdas económicas muito significativas. Assim, torna-se necessário garantir a segurança na utilização de energia elétrica, mas, também, que o fornecimento de energia elétrica seja assegurado com fiabilidade e qualidade adequada às necessidades da instalação.

Em todos os perfis de utilização, as situações de falha em equipamentos elétricos, provocadas por defeitos de isolamento, refletem um risco significativo para a segurança das pessoas. A norma 60470-1 apresenta os riscos associados à passagem de corrente elétrica pelo corpo humano, dividido em 4 zonas tendo em conta a intensidade de corrente e a duração do contacto. O conhecimento detalhado e pormenorizado dos perigos associados à passagem de corrente é importante na aplicação de medidas de proteção competentes e eficientes para assegurar a proteção dos utilizadores. As medidas de proteção dividem-se em medidas passivas e ativas. As medidas passivas consistem em evitar que a corrente percorra o corpo humano ou de um animal. No entanto, estas medidas podem estar sujeitas a falhas, provocadas por falta de manutenção, desgaste do isolamento ou por atos de irresponsabilidade. Em contrapartida, as medidas ativas limitam a corrente que pode percorrer o corpo humano a um valor inferior ao da corrente de choque. Assim sendo, é necessário que os dispositivos de proteção instalados na instalação atuem num tempo adequado de modo a não comprometer a segurança das pessoas e evitar danos irreversíveis.

O tempo de atuação das proteções é influenciado pelo regime de neutro adotado, devendo garantir, em qualquer circunstância, a segurança das pessoas. Além de que, o dispositivo de proteção adequado à instalação é selecionado em função do valor da corrente de defeito, resultante da malha de defeito cuja constituição varia de acordo com o esquema de ligação à terra utilizado.

A ligação à terra permite a criação de uma malha de defeito e consequentemente a circulação da corrente, na ocorrência de um defeito de isolamento ou um defeito à terra. Assim, garante

um bom funcionamento do dispositivo de proteção e assegura uma diminuição dos riscos de incêndio e eletrocussão. Devido à sua importância, a manutenção e verificação periódica das instalações elétricas na indústria é fundamental para a segurança das pessoas, prevenindo falhas e interrupções, com o objetivo de garantir a eficiência dos processos industriais e a estabilidade operacional.

1.1 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de análises técnico/económicas dos regimes de neutro e elaboração do estudo da rede de terras a adotar numa unidade industrial, constituída por vários edifícios com funcionalidades distintas, situada na zona industrial e logística de Sines.

Este trabalho pode ser dividido em duas etapas. A primeira corresponde à realização do estado da arte sobre a temática enquadrada no tema da dissertação. A segunda será o desenvolvimento do caso de estudo no qual é proposto, sem prejuízo da execução de outras atividades que possam ser pertinentes para cumprir com êxito o propósito definido, a elaboração das seguintes tarefas:

- Conhecimento da instalação, compreensão dos requisitos e das limitações económicas;
- Projeção do esquema de ligação à terra adequado à unidade industrial;
- Estudo económico do cenário implementado;
- Análise da secção económica de canalizações elétricas;
- Estudo do grupo gerador;
- Soluções de redes de terra para aplicação em plantas industriais;
- Identificação das implicações no estabelecimento da rede de terras.

1.2 Apresentação da Empresa

A “Quadrante – Engenharia e consultoria, S.A” foi fundada em 1998, pelos Engenheiros João Silveira Costa, Nuno Pais Costa, Nuno Batista Martins e Tiago Pais Costa.

Atualmente, com uma equipa a rondar os 500 colaboradores e escritórios em três continentes (Europa, África e América Latina), a Quadrante desenvolve um amplo leque de serviços de projeto e consultoria nas áreas de infraestruturas de produção e transporte de energia, instalações elétricas de baixa tensão, média tensão, alta tensão e muito alta tensão, infraestruturas hidráulicas, edifícios, ambiente, aeroportos e gestão e supervisão de obras. Em diversos projetos de enorme valor desenvolvidos pela empresa, podem ser destacados alguns desses empreendimentos:

- Estádio Félix Houphouët-Boigny;
- Terminal Portuário de Alcântara;

- Ampliação do Aeroporto de Marselha;
- Subestação elétrica de Nueva Panquehue;
- Concessão do norte litoral – A28 – reparação e beneficiação;
- Sistemas de Saneamento de quatro cidades no Quênia.

1.3 Apresentação dos Intervenientes

1.3.1 Aluno

O presente trabalho foi realizado pelo aluno Ismael Magalhães Kidai, nascido a 26/01/2002, natural de Paredes, distrito do Porto. Em 2019, terminou o ensino secundário no curso de Ciências e Tecnologias e ingressou na sua primeira experiência no ensino superior na área de Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia.

1.3.2 Orientador no Instituto Superior de Engenharia do Porto

O presente trabalho foi orientado, no Instituto Superior de Engenharia do Porto, pelo Professor António Augusto Araújo Gomes, docente no departamento de Engenharia Eletrotécnica e subdiretor da Licenciatura em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia.

1.3.3 Orientador na Quadrante

Na empresa, o trabalho foi orientado pelo Engenheiro Carlos Souto. Atualmente, desempenha a função de Gestor de Projeto, com enfoque na coordenação e desenvolvimento de estudos de construção elétrica de subestações, linhas elétricas, centrais solares fotovoltaicas e parques eólicos.

1.4 Organização do Relatório

A dissertação encontra-se dividida em 4 capítulos. No presente capítulo, realizou-se a introdução ao tema e a sua importância nas instalações industriais, a indicação dos principais objetivos do trabalho, a apresentação da empresa na qual foi realizado o estágio, bem como a identificação do aluno responsável pelo desenvolvimento da dissertação e dos orientadores do trabalho, seja a nível empresarial como curricular.

No segundo capítulo “Efeitos da corrente elétrica sobre o corpo humano e proteção de pessoas em instalações elétricas” é desenvolvido o estado da arte com os conceitos teóricos necessários e indispensáveis para a elaboração do trabalho prático. Primeiramente, é efetuado um enquadramento do tema, abrangendo os efeitos da corrente elétrica sobre o corpo humano, bem como as medidas de proteção contra contactos diretos e indiretos. De seguida, é realizada

uma análise mais profunda e detalhada sobre os diferentes esquemas de ligação à terra e a constituição da rede de terras.

O terceiro capítulo “Estudo de Caso – Indústria da CALB Europe S.A em Sines” apresenta o trabalho desenvolvido em contexto empresarial. O capítulo começa por uma apresentação e caracterização da indústria e de todos os edifícios que a constituem. De seguida, após a tomada de conhecimento dos requisitos e condições por parte do dono de obra, é efetuada a estimativa de potência, de forma a conseguir elaborar uma análise completa da rede de distribuição. A partir do critério técnico no dimensionamento das canalizações, foi realizado o estudo da secção económica de dois circuitos, com o objetivo de determinar a poupança associada à utilização de uma secção maior. Além disso, devido às características da instalação será utilizado o esquema TN para a alimentação normal, desta forma é elaborado um estudo da viabilidade económica entre o esquema TN-S e TN-C, através de uma ferramenta que utiliza as funcionalidades da linguagem *Visual Basic for Applications* (VBA) associada à ferramenta *Excel*. Também neste capítulo, é considerado o estudo do grupo gerador para alimentação das cargas de emergência, com principal foco no dimensionamento das canalizações e no cálculo das necessidades de ventilação da sala do gerador. Por último, é realizada a validação do projeto do sistema de ligação à terra, através da utilização do *software ELEK SafeGrid Earthing*, o qual permite determinar a resistência do sistema de terra e a verificação das tensões de contacto e de passo.

No quarto e último capítulo foram apresentadas as principais conclusões obtidas durante o desenvolvimento das temáticas e a importância das componentes académicas na realização da dissertação.

2. Efeitos da Corrente Elétrica sobre o Corpo Humano e Proteção de Pessoas em Instalações Elétricas

2.1 Enquadramento

A energia elétrica tem enorme importância no modelo da sociedade moderna. Seja na sua aplicação em equipamentos de utilização doméstica ou ao nível industrial. Devido à sua abrangência e crescente aplicabilidade, os desafios que se colocam à sua utilização segura e eficiente são cada vez mais exigentes.

Em virtude das especificidades e regimes de operação dos equipamentos, são impostas limitações técnicas e necessidades de satisfazer critérios de segurança de bens e pessoas. Estas imposições revelam-se grandes desafios de projeto, para os quais há que selecionar as melhores soluções sob os critérios técnico/económicos e ecologicamente sustentáveis.

Como foi referido anteriormente o objetivo geral do caso de estudo será a implementação de regimes de neutro e redes de terra numa unidade industrial, constituída por vários edifícios com funcionalidades distintas. Assim, no presente capítulo será realizada uma pesquisa sobre as principais temáticas da dissertação e que contribuirá positivamente para o desenvolvimento do caso de estudo.

2.2 Efeitos da Corrente Elétrica Sobre o Corpo Humano

O isolamento dos condutores ativos e dos componentes dos equipamentos é fundamental para a segurança das pessoas e da instalação. O isolamento é definido pela capacidade de resistir a uma diferença de potencial sem comprometer a sua rigidez dielétrica.

De acordo com o isolamento, os equipamentos podem ser classificados em equipamentos de classe 0, I, II e III. Nos equipamentos de classe 0, a proteção contra os contactos elétricos é assegurada unicamente pelo isolamento principal. Nos equipamentos de classe I além da proteção através do isolamento principal é prevista uma medida de segurança complementar, que consiste na ligação das partes condutoras acessíveis a um condutor de proteção ligado à terra. Nos equipamentos de classe II a proteção é assegurada pelo isolamento principal e pelo duplo ou pelo isolamento reforçado. Por último, os equipamentos de classe III asseguram a proteção contra contactos elétricos através da alimentação à tensão reduzida de segurança (TRS) ou à tensão reduzida de proteção (TRP) [1].

A perda de isolamento pode ocorrer devido a fatores como a deterioração das propriedades dielétricas ao longo do tempo, rutura mecânica, ambientes perigosos, sobretensões de origem atmosférica e através da ação de roedores [2]. Uma falha de isolamento pode comprometer a segurança de pessoas devido ao choque elétrico a que as pessoas podem ficar sujeitas. Assim, quanto maior for a intensidade de corrente e a duração do contacto, maior são os perigos que a pessoa pode enfrentar. A Figura 1 define os riscos que podem advir da passagem de corrente pelo corpo humano, de acordo com a norma IEC 60479-1 [3].

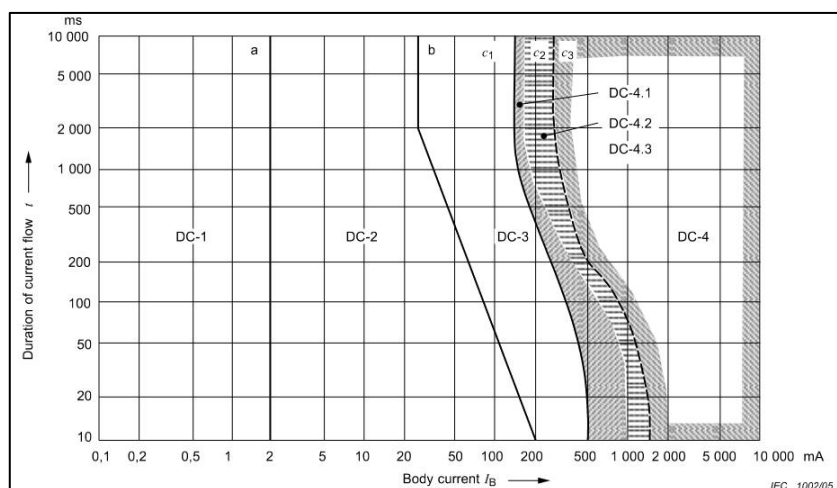


Figura 1 – Riscos associados à passagem de corrente pelo corpo humano segundo o IEC [3]

Os riscos da passagem de corrente podem ser divididos em 4 zonas [2][4]:

1. Na primeira zona, a intensidade de corrente é reduzida e sendo assim, independentemente do tempo, normalmente não ocorre nenhuma reação;
2. Na segunda zona, normalmente não existem danos fisiológicos prejudiciais, no entanto, ocorre um pequeno desconforto;
3. Na terceira zona, pode ocorrer contrações musculares e dificuldade respiratórias;
4. Na quarta zona, a probabilidade de fibrilação ventricular aumenta até aproximadamente 5%, o que corresponde à curva C2 presente na Figura 1, 50% (curva C3) e com o aumento da intensidade de corrente e da duração do contacto maior será esta probabilidade.

2.3 Proteção de Pessoas em Instalações Elétricas

O conhecimento dos riscos associados à passagem de corrente elétrica pelo corpo humano é essencial na implementação de medidas de proteção eficazes. Assim, de forma a garantir a segurança das pessoas e da instalação, é necessário implementar precauções para prevenir e mitigar os choques elétricos. As medidas de proteção podem ser divididas em dois grupos [1]:

- Medidas passivas: impedem a corrente de percorrer o corpo humano ou o corpo de um animal;
- Medidas ativas: limitam a corrente que pode percorrer o corpo humano a um valor inferior ao da corrente de choque.

2.3.1 Proteção contra contactos diretos

O contacto direto é um contacto realizado inadvertidamente com um condutor ativo ou com componentes que se encontram energizados, como se encontra exemplificado na Figura 2 [2].

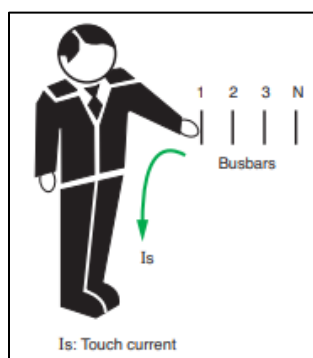


Figura 2 – Contacto Direto [5]

2.3.1.1 Medidas Passivas

As medidas passivas de proteção contra os contactos diretos podem ser caracterizadas em proteções totais e parciais. As proteções totais são preferencialmente utilizadas em instalações onde os utilizadores não possuem conhecimento técnico, evitando o seu contacto involuntário ou propositado com as partes ativas da instalação. Por outro lado, as proteções parciais são utilizadas em locais onde os utilizadores estão conscientes do perigo que podem enfrentar, por conseguinte as medidas de proteção utilizadas são apenas destinadas a choques acidentais [4].

As medidas passivas contra contactos diretos são [2][5][6]:

- Isolamento das partes ativas: este isolamento evita o contacto das pessoas com partes ativas e deve possuir resistência mecânica suficiente para suportar os esforços causados pelo funcionamento normal do equipamento. Esta medida enquadra-se na proteção total;

- Utilização de barreiras ou invólucros: as barreiras ou invólucros garantem uma proteção total, evitando o toque acidental ou propositado nas partes ativas. Os invólucros oferecem proteção de forma completa. Por outro lado, as barreiras concedem proteção unicamente do lado que for possível o contacto com as partes ativas;
- Utilização de obstáculos: esta medida enquadra-se na proteção parcial e consiste na colocação de equipamentos entre as partes ativas e as pessoas. No entanto, estes obstáculos podem ser ultrapassados intencionalmente, pelo que devem ser apenas utilizados em espaços frequentados por pessoas qualificadas;
- Colocação fora do alcance das pessoas: esta medida deve garantir que as partes simultaneamente acessíveis que se encontrem a potenciais diferentes não são colocadas no interior do volume de acessibilidade. Deste modo, é importante garantir uma distância de pelo menos 2,50 m. No entanto, à medida que aumenta o comprimento dos objetos condutores que podem ser manipulados ou transportados nos respetivos locais, a distância deve ser aumentada. Esta medida enquadra-se na proteção parcial.

As medidas passivas de proteção contra contactos diretos podem não ser eficazes devido à ausência de manutenção, desgaste do isolamento ou por atos de irresponsabilidade.

2.3.1.2 Medidas Ativas

Com o objetivo de eliminar os riscos do não funcionamento das medidas passivas recorre-se à utilização de dispositivos de elevada sensibilidade à corrente diferencial residual, destinado a assegurar rapidamente a interrupção da alimentação da instalação elétrica, ou parte desta [1].

2.3.2 Proteção contra contactos indiretos

O contacto indireto consiste numa falha do isolamento que pode deixar exposta uma parte ativa que ao ser tocada em situação de defeito apresenta um determinado potencial, como ilustra a Figura 3.

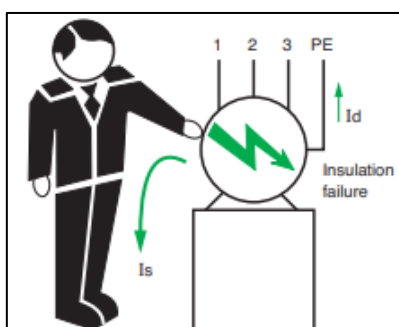


Figura 3 – Contacto Indireto [5]

2.3.2.1 Medidas Passivas

A proteção contra contactos indiretos pode ser garantida sem realizar o corte automático da alimentação e assenta nas seguintes medidas passivas [1][4][6]:

- Uso de equipamento de classe II ou equivalente: caso o isolamento básico não assegure a proteção, é colocado um isolamento complementar formando um isolamento duplo. Esta proteção pode ser realizada pela utilização de apenas um revestimento designado por isolamento reforçado;
- Separação elétrica de circuitos: consiste na utilização de um transformador de classe II de isolamento que estabelece uma separação elétrica entre a fonte e o equipamento;
- Ligação equipotencial de todas as partes condutoras simultaneamente acessíveis;
- Proteção por locais não condutores: estes locais caracterizam-se pelo isolamento do chão e das paredes e pela não ligação à terra dos equipamentos. Neste local, as massas devem ser instaladas de modo a evitar que as pessoas possam entrar em contacto simultâneo com duas massas ou com uma massa e um elemento condutor. No entanto, com a maior presença de elementos condutores e a possibilidade de alteração dos revestimentos dos elementos de construção o que transformaria o local não condutor num condutor, são poucos os locais que conseguem cumprir as condições para aplicar esta medida de proteção.

2.3.2.2 Medidas Ativas

Um defeito num equipamento elétrico origina a circulação de uma corrente que necessita de ser interrompida num tempo compatível com a segurança das pessoas através do corte automático da alimentação. Assim, esta medida de proteção tem como objetivo impedir que, entre partes condutoras simultaneamente acessíveis, possam permanecer tensões de contacto superiores às tensões limites convencionais (50 V em corrente alternada e 120 V em corrente contínua), num período suficiente para criar riscos de efeitos fisiopatológicos graves nas pessoas [1].

O corte da alimentação é baseado na satisfação cumulativa das seguintes condições [2][7]:

- Criação de uma malha de defeito, possibilitando a circulação da corrente de defeito. Esta malha depende do Esquema de Ligação à Terra adotado;
- Seleção do dispositivo de proteção adequado, de forma a efetuar o corte da alimentação num tempo que varia de acordo com a tensão de contacto e a probabilidade de defeitos e de contactos com as partes afetadas, sendo esse tempo estabelecido tendo em conta o conhecimento adquirido sobre os efeitos da corrente elétrica no corpo humano.

2.4 Esquemas de Ligação à Terra

Os regimes de neutro, ou esquemas de ligação à terra (ELT), são importantes na proteção de pessoas contra contactos indiretos. A norma IEC 60364 identifica três tipos de esquemas de

ligação à terra e caracterizam-se por duas ou três letras: TT, TN (TN-C, TN-S e em algumas situações pode existir uma combinação entre estes dois esquemas designado por TN-C-S) e IT. A primeira letra indica a situação da alimentação (normalmente o neutro) em relação à Terra, a segunda letra caracteriza a situação das massas da instalação em relação à Terra e a terceira letra é utilizada, exclusivamente, no esquema TN [7][8].

- Primeira letra:
 - T: A alimentação é ligada diretamente à Terra;
 - I: As partes ativas estão isoladas da terra ou ligadas à Terra por meio de uma impedância.
- Segunda letra:
 - T: As massas encontram-se ligadas diretamente à Terra;
 - N: As massas da instalação encontram-se ligadas ao ponto de alimentação ligado à Terra.
- Terceira letra:
 - C: As funções de neutro e de proteção estão combinadas num só condutor PEN;
 - S: O condutor de neutro está separado do condutor de proteção.

Assim, numa instalação elétrica existem dois tipos de terras: a terra das massas e a terra de alimentação. Caso estas terras se encontrem interligadas em apenas uma, designa-se por terra única, caso contrário são terras distintas, conforme explicitado na Tabela 1 [9].

Tabela 1 – Circuitos de Terra

Terra das massas	À terra das massas são ligados todos os elementos condutores da instalação que, em condições normais, estão sem tensão ou a tensões não perigosas, mas que em caso de defeito podem provocar diferenças de potencial perigosas.
Terra de alimentação	À terra de alimentação são ligados apenas os pontos dos circuitos elétricos de forma a limitar o potencial dos condutores em relação ao solo e garantir o bom funcionamento das proteções.
Terra única	Resulta da conexão da terra de serviço com a terra de proteção.
Terras distintas	Dois circuitos de terra são distintos, caso o potencial de um deles não fique sujeito a uma variação superior a 5 % da que experimenta o outro quando este último é percorrido por uma corrente elétrica.

2.4.1 Esquema TT

O esquema TT caracteriza-se pela interligação das massas de todos os equipamentos elétricos protegidos pelo mesmo dispositivo de proteção e conectados ao mesmo eletrodo de terra e a ligação de um ponto da alimentação à terra de alimentação, conforme representado na Figura 4 [10].

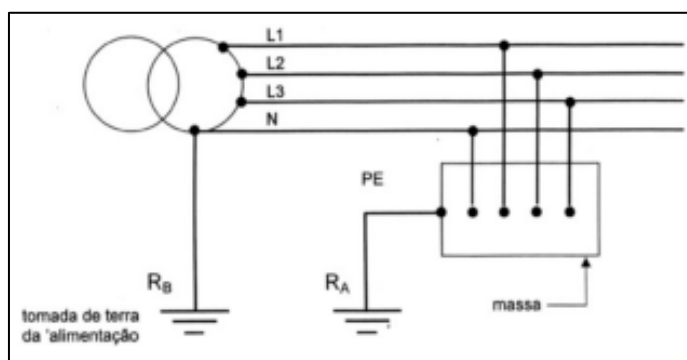


Figura 4 – Esquema de ligação à Terra TT [7]

Numa situação de defeito, é formada uma malha de defeito que é constituída pelo condutor de fase, o condutor de proteção que liga a massa à Terra, a resistência dos elétrodos de terra das massas e da alimentação e o enrolamento secundário do transformador, como ilustrado na Figura 5 [8].

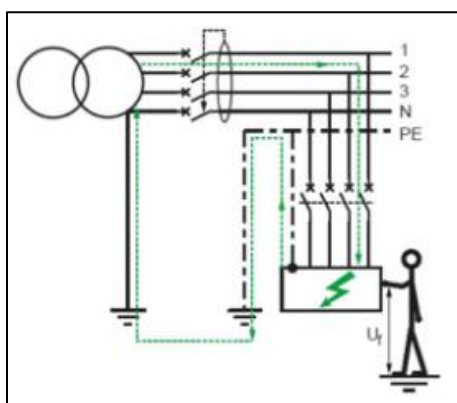


Figura 5 – Malha de defeito no esquema TT [5]

A impedância da malha de defeito pode ser simplificada pela soma das resistências dos elétrodos de Terra das massas e da alimentação, uma vez que apresentam um valor superior em comparação com os restantes constituintes da malha [7]. Desta forma, raramente são utilizados dispositivos de proteção contra sobreintensidades dado que, o valor da soma das resistências dos elétrodos de terra é bastante elevado o que limita o valor da corrente. Assim, utilizam-se regularmente dispositivos diferenciais [1].

A tensão de contacto para a malha de defeito apresentada é obtida através da equação 1.

$$U_c = \frac{R_A}{R_A + R_B} \times U_0 \quad \left. \begin{array}{l} U_c - \text{Tensão de contacto;} \\ R_A - \text{Resistência do elétrodo de terra das massas;} \\ R_B - \text{Resistência do elétrodo de terra da alimentação;} \\ U_0 - \text{Tensão simples nominal.} \end{array} \right| \quad (1)$$

O dispositivo diferencial deve ser escolhido pelo calibre, mas, também, pela sensibilidade, e deve obedecer à condição presente na equação 2.

$$I\Delta n \leq \frac{U_L}{R_A} \quad \left| \begin{array}{l} I\Delta n - \text{Sensibilidade do dispositivo diferencial;} \\ U_L - \text{Tensão limite convencional.} \end{array} \right. \quad (2)$$

Para o cálculo da sensibilidade do dispositivo diferencial apenas é tido em conta a tensão limite convencional U_L e a resistência do eléctrodo de Terra das massas R_A . Segundo as RTIEBT, a tensão de contacto não pode exceder os 50 V ou 25 V, dependendo da classificação atribuída em relação às influências externas. Assim, a equação 2 pode ser manipulada de forma a obter o valor máximo de R_A , para diferentes valores de $I\Delta n$, conforme ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Valor máximo da resistência do eléctrodo de terra das massas [2]

$I\Delta n$	Valores máximos de R_A para $U_L = 50 \text{ V}$	Valores máximos de R_A para $U_L = 25 \text{ V}$
3 A	16 Ω	8 Ω
1 A	50 Ω	25 Ω
500 mA	100 Ω	50 Ω
300 mA	166 Ω	83 Ω
30 mA	1666 Ω	833 Ω

A norma IEC 60364-4-41 indica o tempo máximo de atuação dos dispositivos de proteção contra contactos indiretos. Para circuitos que não excedem os 32 A, o tempo de atuação dos dispositivos de proteção está representado na Tabela 3, em função da tensão nominal (U_0). Para os restantes circuitos o tempo de atuação não deve exceder 1 segundo.

Tabela 3 – Tempo de atuação dos dispositivos de proteção

$U_0 \text{ (V)}$	$T \text{ (s)}$
$50 < U_0 \leq 120$	0,3
$120 < U_0 \leq 230$	0,2
$230 < U_0 \leq 400$	0,07
$U_0 > 400$	0,04

2.4.2 Esquema TN

No esquema TN as massas encontram-se ligadas a um ponto de alimentação ligado à Terra através de condutores de proteção e a proteção contra contactos indiretos pode ser realizada através da junção das funções de neutro e de condutor de proteção num só condutor (TN-C), Figura 6. Por outro lado, a função de neutro e de condutor de proteção podem estar separadas (TN-S), Figura 7 ou, numa parte da instalação, as funções de neutro e de condutor de proteção estão combinadas num único condutor e separados na restante instalação (TN-C-S), Figura 8 [8].

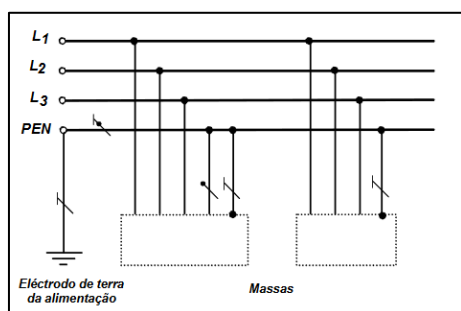


Figura 6 – Esquema de ligação à Terra TN-C [1]

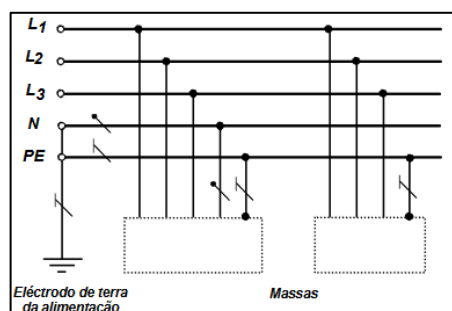


Figura 7 – Esquema de ligação à Terra TN-S [1]

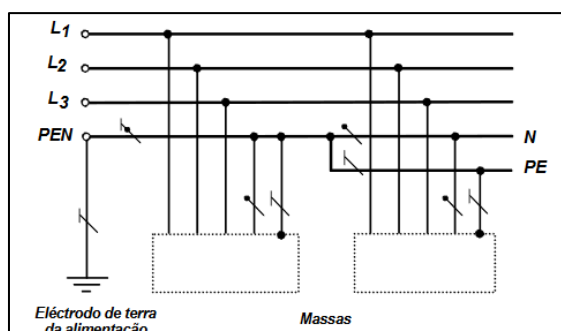


Figura 8 – Esquema de ligação à Terra TN-C-S [1]

No esquema TN-C não devem ser utilizados dispositivos diferenciais pois não se pode interromper o condutor de proteção. Se fosse interrompido, a malha de defeito não se fechava pelo neutro, o dispositivo de proteção não atuava e não era assegurada a proteção das pessoas.

Este esquema pode ser utilizado caso os condutores de fase possuam uma secção igual ou superior a 10 mm^2 se for cobre e 16 mm^2 no caso de alumínio e não pode estar localizado a jusante de um dispositivo diferencial. É extremamente importante que o condutor PEN garanta a secção mínima e seja de material resistente à corrosão, de forma a evitar que ocorra uma interrupção do condutor, pois uma interrupção faria com que as massas dos equipamentos atingissem valores de tensão de contacto à volta dos 230 V. [7].

O esquema TN-C e TN-S podem aparecer na mesma instalação, desde que o esquema TN-C apareça a montante do esquema TN-S. Esta configuração designa-se por TN-C-S e é o mais utilizado uma vez que, os circuitos de alimentação aos quadros apresentam uma secção igual ou superior a 10 mm^2 [7].

Independentemente do esquema TN utilizado, qualquer defeito de isolamento à Terra, resulta num curto-circuito fase-neutro [8]. A Figura 9 apresenta a malha de defeito no esquema TN-C.

Para o esquema TN-S, as correntes de defeito apresentam um valor elevado, pelo que se deve utilizar dispositivos de proteção contra sobretensões. No entanto, quando a corrente de defeito assume valores reduzidos ou a impedância da malha de defeito não pode ser calculada com precisão, utilizam-se dispositivos de proteção diferencial.

A norma IEC 60364-4-41 indica o tempo máximo de atuação dos dispositivos de proteção contra contactos indiretos. Para circuitos que não excedam os 32 A, o tempo de atuação dos dispositivos de proteção está representado na Tabela 4 em função da tensão nominal (U₀). Para os restantes circuitos o tempo de atuação não deve exceder 5 segundos.

Tabela 4 – Tempo de atuação dos dispositivos de proteção [5]

U ₀ (V)	T (s)
50<U ₀ ≤120	0,8
120<U ₀ ≤230	0,4
230<U ₀ ≤400	0,2
U ₀ >400	0,1

A tensão de contacto em caso de defeito é obtida através da manipulação da equação 3 e pela substituição de Z_s segundo a equação 7, culminando na equação 8 [11].

$$\begin{aligned}
 U_C &= R_{pe} \times I_d \Leftrightarrow U_C = R_{pe} \times \frac{k \times U_0}{Z_s} \\
 &\Leftrightarrow U_C = R_{pe} \times \frac{k \times U_0}{\rho \times \frac{1}{S_f} (1 + m)} \\
 &\Leftrightarrow U_C = \rho_{pe} \times \frac{l}{S_{pe}} \times \frac{k \times U_0}{\rho \times \frac{1}{S_f} (1 + m)} \Leftrightarrow k \times U_0 \times \frac{m}{(1 + m)}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

A equação 8 é apenas válida para condutores de secção igual ou inferior a 120 mm². Para secções superiores a resistência aumenta gradualmente, como ilustra a Tabela 5.

Tabela 5 – Aumento da Resistência em função da secção [12]

Secção (mm ²)	Resistência (Ω)
150	Resistência + 15 %
185	Resistência + 20 %
240	Resistência + 25 %

Depois de obter o valor da tensão de contacto em caso de defeito, verifica-se qual o tempo de disparo do dispositivo de proteção e se está de acordo com os valores apresentados na Tabela 4. Após ter assegurado o tempo de disparo, é necessário verificar nas curvas de funcionamento

dos disjuntores (Figura 10) ou fusíveis (Figura 11) se a corrente de atuação do dispositivo de proteção é igual ou inferior à corrente que percorre a malha de defeito [13].

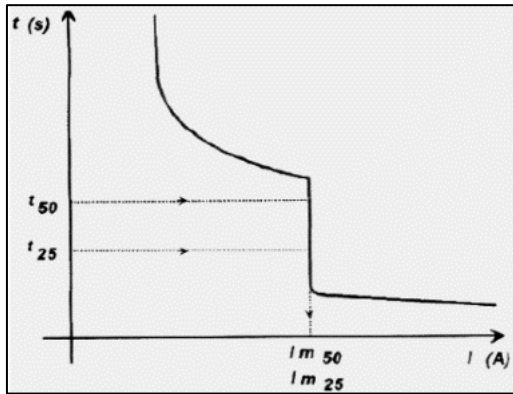


Figura 10 – Curva de funcionamento do disjuntor [13]

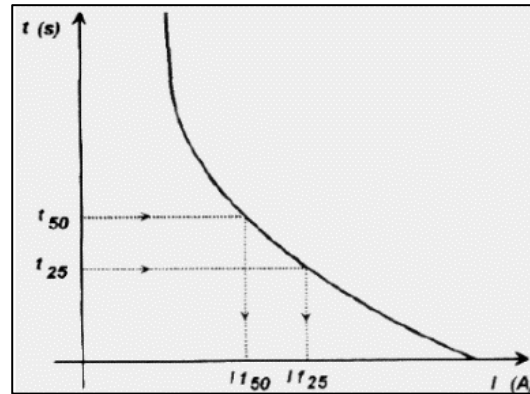


Figura 11 – Curva de funcionamento do fusível [13]

Para a determinação da corrente de defeito, podem ser utilizados três métodos:

- Método das Impedâncias: Neste método é realizada a soma de todas as impedâncias da malha de defeito, como representado na equação 9 [12].

$$I = \frac{U}{\sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X)^2}} \quad (9)$$

- Método da Composição: Este método determina a corrente de curto-circuito no terminal do circuito, com base no conhecimento da corrente de curto-circuito a montante, como ilustrado na equação 10 [12].

$$I = I_{SC} \times \frac{U}{U + Z_s \times I_{SC}} \quad \left| \begin{array}{l} I - \text{Corrente de curto-circuito no terminal do circuito (A);} \\ I_{SC} - \text{Corrente de curto-circuito a montante (A).} \end{array} \right. \quad (10)$$

- Método Convencional: Este método é baseado no uso de tabelas e determina a corrente de curto-circuito mínima no local do defeito. A partir desse método é possível determinar o comprimento máximo da canalização protegido pelo dispositivo de proteção, através da equação 11, que resulta da conjugação da equação 4 e da equação 7 [2].

$$Z_s = \frac{k \times U_0}{I_d} \text{ e } Z_s = \rho \times \frac{1}{S_f} (1 + m) \quad (11)$$

$$\Leftrightarrow I_d = \frac{k \times U_0}{\rho \times \frac{1}{S_f} (1 + m)} \Leftrightarrow I_{m\acute{a}x} \leq \frac{k \times U_0 \times S_f}{\rho \times (1 + m) \times I_d}$$

2.4.3 Esquema IT

O esquema IT caracteriza-se por todas as partes ativas estarem isoladas da terra ou ligadas à terra através de uma impedância de valor muito elevado. As massas encontram-se ligadas à terra de proteção, individualmente ou por grupos [8][11].

Da Figura 12 à Figura 14, está representado esquema IT impeditivo com e sem o neutro distribuído e o esquema IT isolado da terra.

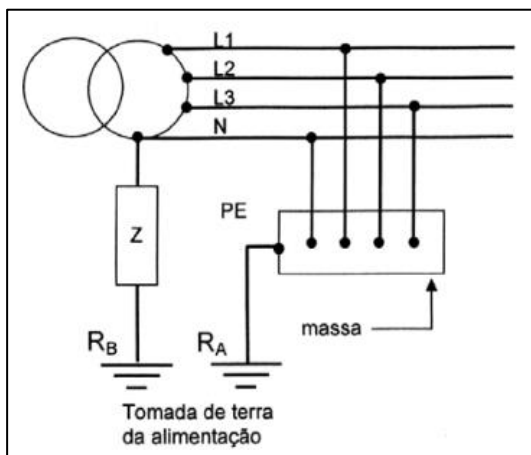


Figura 12 – Sistema IT impeditivo com neutro distribuído [13]

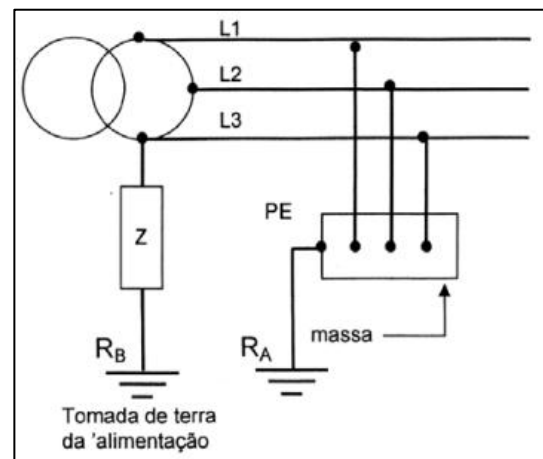


Figura 13 – Sistema IT impeditivo sem neutro distribuído [13]

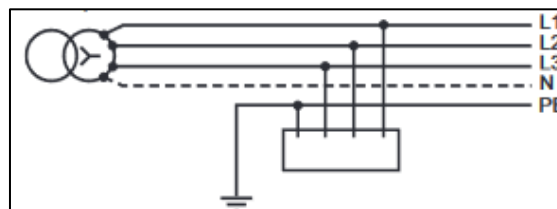


Figura 14 – Sistema IT isolado [5]

Na prática todos os circuitos apresentam uma impedância de fuga à terra. Na Figura 15 observa-se um caminho de fuga resistivo em paralelo com um percurso de fugas capacitivo. Estes dois percursos formam a impedância de fuga normal à terra [14].

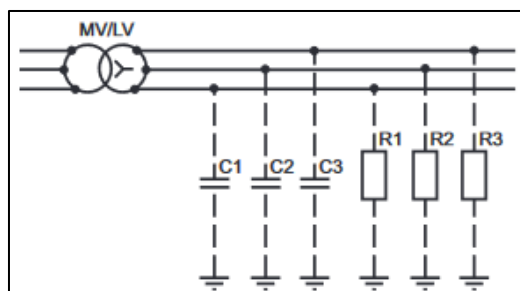


Figura 15 – Impedância de fuga à terra [5]

Em caso de defeito, o valor da corrente é baixo, não sendo necessário a abertura automática ao primeiro defeito. Devido à continuidade de serviço após o primeiro defeito, este esquema é utilizado em hospitais, blocos operatórios, redes elétricas em aeroportos, minas, instalações com risco de incêndio ou explosão, entre outras instalações em que a paragem na atividade ou serviço é bastante dispendiosa e arriscada [8]. Deste modo, é importante excluir as circunstâncias que promovam uma diminuição da confiabilidade, uma dessas situações passa pela não distribuição do neutro, como é demonstrado no esquema presente na Figura 16 [7].

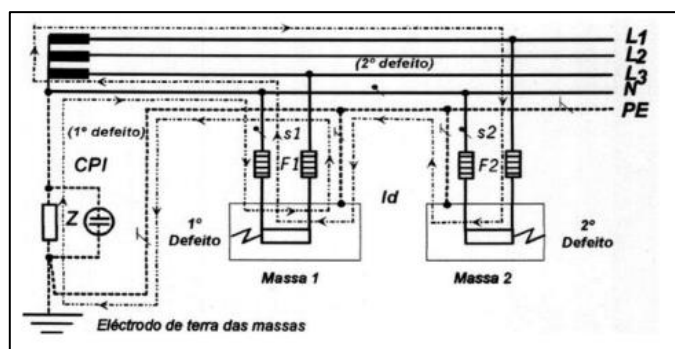


Figura 16 – Inconvenientes na distribuição do condutor neutro [7]

Os inconvenientes da distribuição do neutro são os seguintes [7][11]:

- Na ocorrência de um primeiro defeito na massa 1, a corrente de defeito era de tal forma baixa que não provocava uma queda de tensão aos terminais da impedância Z, o que passava despercebido ao CPI (Controlador Permanente de Isolamento). Num segundo defeito a tensão de contacto pode assumir valores perigosos e o corte teria de ocorrer sem o primeiro ter sido sinalizado e corrigido, tornando a vantagem deste esquema de ligação à terra inutilizada;
- A exigência de utilizar dispositivos de proteção contra sobreintensidades no condutor neutro: Se estes dispositivos não forem utilizados e os condutores do circuito 1 apresentarem uma secção muito inferior à dos condutores do circuito 2, na ocorrência de um defeito que abrangesse o condutor de neutro e o condutor de fase, a corrente seria cortada pelo dispositivo de proteção dimensionado para a secção do circuito 2, o que seria um valor de corrente superior ao estipulado para a proteção dos condutores do circuito 1.

A corrente de defeito é limitada pela soma das resistências dos elétrodos de terra e pela impedância de ligação à terra. Através da aplicação da equação 12, o corte ao primeiro defeito não ocorre, pois, a tensão de contacto não ultrapassa a tensão limite de segurança [4].

$$U_L \geq R \times I_d \quad \left| \begin{array}{l} R - \text{Soma das resistências do elétrodo de terra, dos condutores de} \\ \text{proteção e da impedância Z.} \end{array} \right. \quad (12)$$

Deste modo, logo que ocorra o primeiro defeito, este tem de ser devidamente corrigido antes do segundo defeito para não colocar em causa a segurança das pessoas devido ao contacto com correntes elevadas. A Figura 17 apresenta a malha resultante do primeiro defeito.

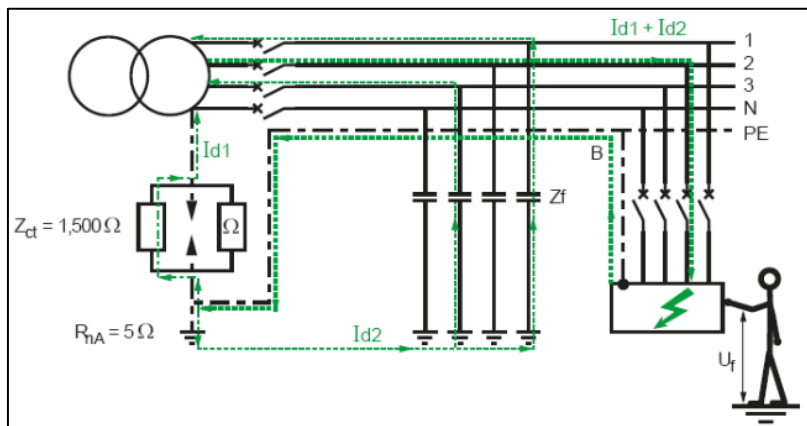


Figura 17 – Malha de defeito no esquema IT ao primeiro defeito [5]

A impedância da malha de defeito é constituída pela impedância de fugas da instalação e pela impedância colocada entre a fonte e a terra. Uma instalação que apresente 1 km de condutores, a impedância de fuga à terra ronda os 3500 Ω (1 μF/Km) por fase, assim a corrente capacitiva de fuga à terra por fase é apresentada na equação 13 [13].

$$\frac{U_0}{Z_f} = \frac{230}{3500} = 66 \text{ mA} \quad (13)$$

Durante o defeito a corrente I_{d2} é a soma vetorial da corrente capacitiva que circula pelas impedâncias de fuga das fases que não apresentam defeito. As tensões nestas fases estão sujeitas a um incremento de $\sqrt{3}$ relativamente à tensão U_0 , como se verifica na Figura 18 e a corrente capacitiva sofre um aumento na mesma proporção. Estas correntes encontram-se desfasadas entre si de 60º e ao realizar a soma vetorial, a corrente I_{d2} apresentará o valor de 198 mA (3 x 66 mA), conforme ilustrado na Figura 19 [5][13].

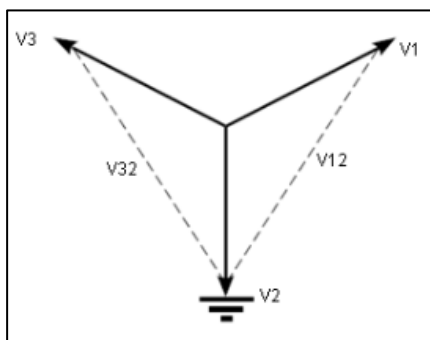


Figura 18 – Soma vetorial das tensões em caso de defeito [13]

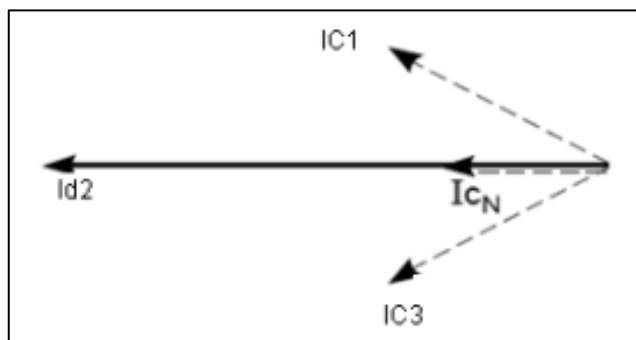


Figura 19 – Soma vetorial das correntes [13]

Assim, a corrente que percorre a malha de defeito, é a soma vetorial da corrente I_{d1} (230 / 1500 = 153 mA) e a corrente I_{d2} , o que resulta em valores muito baixos não provocando o corte da alimentação.

No esquema IT, a proteção contra os contactos indiretos é garantida por:

- CPI: Este dispositivo é importante na monitorização, vigilância e sinalização do primeiro defeito e são imprescindíveis neste esquema de ligação à terra. Além disso, caso seja necessário efetuar o corte ao primeiro defeito, este dispositivo pode exercer essa função [13].
- Proteção contra Sobreintensidades: Os disjuntores e fusíveis são utilizados quando ao segundo defeito este esquema comporta-se como Esquema TN, ou seja, se todas as massas, incluindo as da fonte, estiverem ligadas ao mesmo eletrodo de terra.
- Dispositivos Diferenciais: Estes dispositivos são utilizados quando ao segundo defeito este esquema comporta-se como Esquema TT, ou seja, se as massas estiverem ligadas à terra, individualmente ou por grupos.

Como referido anteriormente, o condutor de neutro pode ou não ser distribuído, sendo para isso necessário utilizar dispositivos de proteção contra sobreintensidades em todos os circuitos, possibilitando o corte dos condutores ativos e o neutro. Assim, nas situações em que o esquema IT comporta-se como um esquema TN, devem ser atendidas as seguintes condições [4]:

- Neutro não distribuído: $Z_s \leq \frac{\sqrt{3} \times U_0}{2 \times I_a}$ (14)
- Neutro distribuído: $Z_s' \leq \frac{U_0}{2 \times I_a}$ (15)

Z_s – Impedância da malha de defeito constituída pelo condutor de fase e pelo condutor de proteção;
 Z_s' – Impedância da malha de defeito constituída pelo condutor de neutro e pelo condutor de proteção;
 U_0 – Tensão entre fase e neutro;
 I_a – Corrente de funcionamento dos dispositivos de proteção.

O tempo de atuação dos dispositivos de proteção deverá agir em conformidade com a distribuição ou não do neutro, como ilustrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Tempo de atuação dos dispositivos de proteção [2]

U0 (V)	Tempo de atuação (s) Neutro não Distribuído	Tempo de atuação (s) Neutro Distribuído
120/240	0,8	5
230/400	0,4	0,8
400/690	0,2	0,4
580/1000	0,1	0,2

Em caso de segundo defeito, é obrigatório o corte da energia. O circuito da malha de defeito com todas as massas equipotencializadas por um único condutor de proteção e ligadas ao mesmo eletrodo de terra, encontra-se representado na Figura 20 [13].

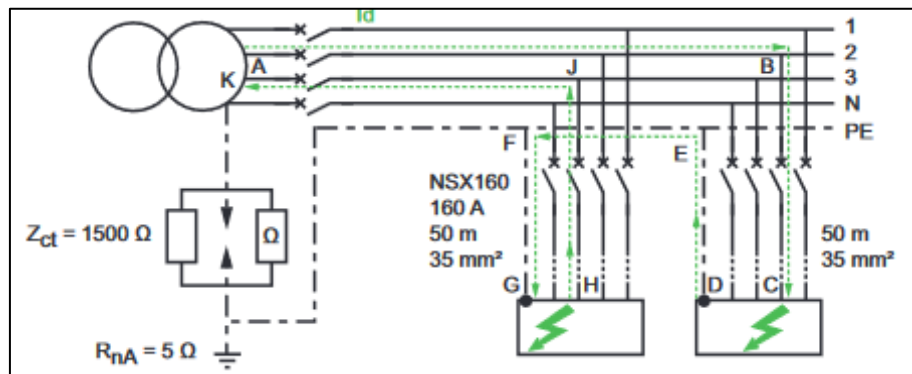


Figura 20 - Malha de defeito no esquema IT ao segundo defeito [5]

Nesta situação a proteção é assegurada pelas mesmas condições que o esquema TN e a resistência da malha de defeito para os pontos (FGHJ) é a indicada na equação 16.

$$R[\text{FGHJ}] = 2 \times R[\text{JH}] = 2 \times \rho \times \frac{l}{S_f} = 2 \times 0,0237 \times \frac{50}{35} = 67,7 \text{ m}\Omega \quad (16)$$

A impedância da malha de defeito apresenta o valor de $2 \times 67,7 = 135 \text{ m}\Omega$ e a corrente de defeito é a ilustrada na equação 17.

$$I_d = \frac{0,8 \times \sqrt{3} \times 230}{135 \times 10^{-3}} = 2361 \text{ A} \quad (17)$$

A proteção contra contactos indirectos pode ser garantida por dispositivos de proteção contra sobrecorrentes pelo que existe a necessidade de verificar o comprimento máximo protegido pelo dispositivo de proteção, através da aplicação da equação 11, com a diferença que o comprimento máximo protegido será metade em comparação com o esquema TN.

A Figura 21 apresenta dois circuitos em que as massas se encontram ligadas à terra, individualmente ou por grupos, nesta situação como referido anteriormente a proteção é assegurada pelas mesmas condições apresentadas no esquema TT.

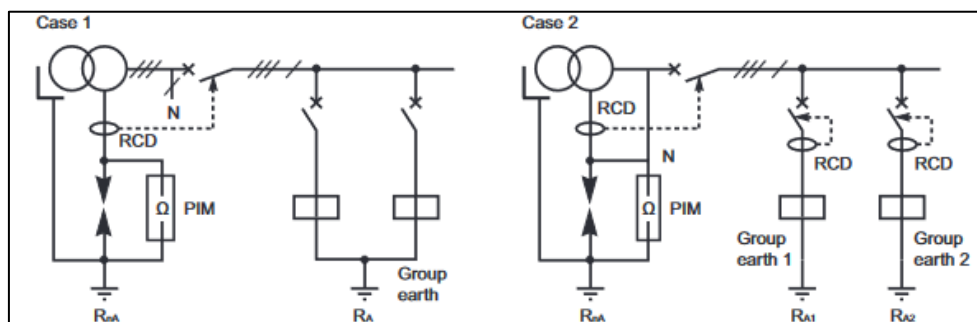


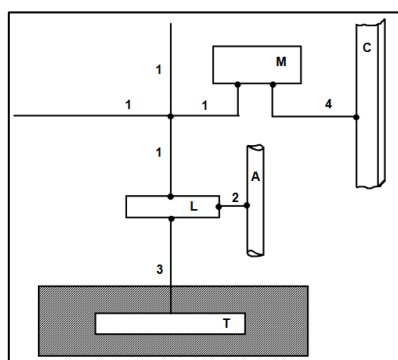
Figura 21 – Sistema IT com as massas ligadas à terra por grupos ou individualmente [5]

2.5 Instalações de Ligação à Terra

A rede de terras permite o escoamento de correntes indesejadas causadas por diferenças de potencial entre dois pontos, garantindo que as tensões presentes na instalação são inferiores aos valores aceitáveis pelo corpo humano. Assim, a rede de terras tem como principal objetivo assegurar a proteção das pessoas e dos equipamentos, oferecendo um percurso alternativo e de menor resistência para a corrente se dissipar, reduzindo o risco de incêndio e eletrocussão.

2.5.1 Constituição de uma instalação de ligação à terra

Uma instalação de ligação à terra compreende um ou vários elétrodos de terra interligados e os condutores de proteção e de terra correspondentes, conforme representado na Figura 22 [7].



- 1 – Conductor de proteção;
- 2 – Conductor da ligação equipotencial principal;
- 3 – Conductor de terra;
- 4 – Conductor de equipotencialidade suplementar;
- A – Canalização metálica principal de água;
- C – Elemento condutor;
- L – Terminal principal de terra;
- M – Massa.

Figura 22 – Instalação de Ligação à Terra [1]

2.5.1.1 Massa

A massa é a parte condutora de um equipamento elétrico, capaz de ser tocada e que em regra encontra-se isolada das partes ativas, mas, em caso de defeito, pode ficar sob tensão. Deste modo, são consideradas massa as partes metálicas dos equipamentos, as armaduras metálicas dos cabos e as condutas metálicas, com condutores isolados. Por outro lado, não são consideradas massa todas as partes metálicas dos equipamentos de classe II [1].

2.5.1.2 Ligação Equipotencial

A ligação equipotencial é uma ligação elétrica destinada a colocar ao mesmo potencial massas e elementos condutores. Esta ligação pode ser dividida, principalmente, em ligação equipotencial principal e suplementar.

A ligação equipotencial principal impede que em caso de defeito no exterior do edifício surja uma diferença de potencial entre os elementos condutores do edifício. À ligação equipotencial principal devem ser ligados os seguintes condutores [7]:

- O condutor principal de proteção;

- O condutor de terra ou o terminal principal de terra;
- As canalizações metálicas de alimentação, localizadas no interior, e as canalizações de aquecimento central e de ar condicionado, se possível;
- Os elementos metálicos da construção.

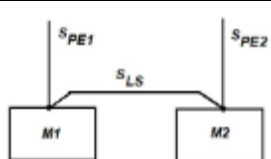
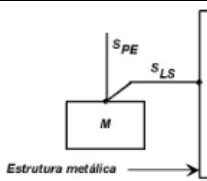
A secção das ligações equipotenciais principais, deverá ser igual ou superior à maior secção do condutor de proteção existente na instalação, com o valor mínimo de 6 mm² e limitado a 25 mm² se for cobre, ou uma secção equivalente, caso se trate de outro metal [1].

A ligação equipotencial suplementar deve associar todas as partes condutoras simultaneamente acessíveis, tanto as massas dos equipamentos fixos como os elementos condutores e ainda, caso seja plausível, as armaduras principais do betão usado na construção. Além destas ligações, recomenda-se a ligação dos condutores de proteção de todos os equipamentos a este sistema equipotencial [7].

Este tipo de ligação é importante quando, numa situação de defeito, não consigam ser verificadas as condições de corte automático da alimentação num período que não comprometa a segurança das pessoas.

Uma vez que a ligação equipotencial suplementar interliga todas as massas dos equipamentos, é necessário garantir que duas massas pertencentes a circuitos com secções diferentes não provocam, no condutor de proteção de menor secção, uma passagem de corrente superior à que o condutor pode suportar [7]. Desta forma, quando duas massas se encontram associadas por condutores de equipotencialidade suplementar, a secção destes condutores deve ser igual ou superior à menor secção dos condutores de proteção ligado à massa. Por outro lado, caso o condutor de equipotencialidade suplementar interligue uma massa com um elemento condutor, a secção do condutor de equipotencialidade deverá ser igual ou superior à metade da secção do condutor de proteção ligado à massa. Estas duas situações são apresentadas na Tabela 7 [1].

Tabela 7 – Secção mínima para as ligações equipotenciais suplementares [1]

Duas massas	Uma massa e uma estrutura metálica
	
$S_{PE1} \leq S_{PE2} \Rightarrow S_{LS} \geq S_{PE1}$	$S_{LS} \geq \frac{S_{PE}^{(*)}}{2}$ <p>A secção dos condutores de proteção apresenta um mínimo de 2,5 mm² para condutores mecanicamente protegidos ou 4 mm² sem proteção.</p>
S_{PE} – Secção do condutor de proteção; S_{LS} – Secção da ligação suplementar.	

2.5.1.3 Terminal Principal de Terra

Todas as instalações devem possuir terminal principal de terra. Em instalações de grandes dimensões pode ser instalado mais do que um. Ao terminal principal de terra são ligados os seguintes elementos [10]:

- Condutores de terra;
- Condutores de proteção;
- Condutor de ligação equipotencial principal;
- Caso seja preciso, os condutores de ligação à terra funcional.

2.5.1.4 Condutor de Proteção

O condutor de proteção é utilizado em determinadas medidas de proteção contra os contactos elétricos e é responsável pela ligação elétrica dos seguintes elementos [7]:

- Massas;
- Elementos condutores;
- Terminal principal de terra;
- Eléctrodo de terra;
- Ponto de alimentação à terra.

São utilizados como condutores de proteção, condutores pertencentes a cabos multicondutores, condutores isolados ou nus que estejam envolvidos no mesmo invólucro que os condutores ativos, condutores separados, nus ou isolados, revestimentos metálicos, condutas metálicas e além disso podem ser utilizados certos elementos condutores [7].

Os condutores de proteção devem escoar a corrente máxima de defeito sem provocar o aquecimento do condutor, de forma a não comprometer a sua preservação e continuidade. Deste modo a secção deve satisfazer as seguintes regras, indicadas nas regras técnicas de instalações elétricas em baixa tensão (RTIEBT) [1]:

- Para tempos de atuação do dispositivo de proteção igual ou inferior a 5 segundos, a secção dos condutores deve ser igual ou superior ao resultado da aplicação da equação 18.

$$S = \frac{I\sqrt{t}}{k} \left| \begin{array}{l} S - \text{Secção do condutor de proteção em mm}^2; \\ I - \text{Valor da corrente, em caso de defeito de impedância desprezável, que} \\ \text{é capaz de percorrer o dispositivo de proteção, em A;} \\ t - \text{Tempo de funcionamento do dispositivo de proteção, em s;} \\ k - \text{Variável que depende das características do condutor e do possível} \\ \text{aquecimento, tendo em conta a temperatura do condutor no momento} \\ \text{que ocorre o defeito.} \end{array} \right| \quad (18)$$

- Nesta situação não é necessário validar a condição anteriormente estabelecida, no entanto é importante garantir que os condutores de proteção e os condutores de fase têm a alma

condutora do mesmo material. Caso não se verifique os condutores de proteção necessitam de apresentar uma secção que garanta uma condutibilidade similar. As secções mínimas são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Secção mínima do Condutor PE consoante a secção dos Condutores de Fase [1]

Secção dos condutores de fase - SF (mm²)	Secção mínima dos condutores de proteção - SPE (mm²)
$S_F \leq 16$	$S_{PE} = S_F$
$16 < S_F \leq 35$	$S_{PE} = 16$
$S_F > 35$	$S_{PE} = \frac{S_F}{2}$

- Caso os condutores de proteção não estejam inseridos na canalização de alimentação, estes devem ter uma secção igual ou superior a 2,5 mm² para condutores com proteção mecânica e, igual ou superior a 4 mm² para condutores sem proteção mecânica, ambos para cobre.
- Nas situações em que o condutor de proteção pertença a vários circuitos, a secção deste condutor terá de ser dimensionada para a secção que apresentar o maior valor dos condutores de fase.

2.5.1.5 Condutor de Terra

O condutor de terra liga o terminal principal de terras ao elétrodo de terra, e a sua ligação deve ser devidamente realizada. A utilização de ligadores não deve comprometer a fiabilidade dos elementos do elétrodo de terra nem do condutor de terra [7].

Nos condutores de terra deve ser colocado, numa zona acessível, um ligador de terras que facilite a medição do valor da resistência do elétrodo de terra das massas. Este dispositivo pode encontrar-se associado ao terminal principal de terras [7].

Os condutores de terra, no caso de serem enterrados, devem ter uma secção que cumpra os valores mínimos indicados na Tabela 9, de acordo com as RTIEBT.

Tabela 9 – Secção mínima do Condutor de Terra [1]

Condutor de terra	Protegido mecanicamente	Não protegido mecanicamente
Protegido contra a corrosão	Nesta situação são aplicadas as regras indicadas para o condutor de proteção	16 mm ² se for de cobre nu ou aço galvanizado
Não protegido contra a corrosão	25 mm ² se o condutor for de cobre e 35 mm ² se o condutor for de aço galvanizado	

2.5.1.6 Eléctrodo de Terra

O eléctrodo de terra é um condutor metálico ou um sistema de condutores metálicos introduzidos no solo que assegura a ligação eléctrica com a terra [15]. Os eléctrodos de terra podem ser idealizados para o efeito ou serem constituídos pelas estruturas metálicas enterradas, designados por “Eléctrodos de terra de fato”.

Normalmente são utilizados os seguintes elementos metálicos [10]:

- Tubos, varetas ou perfilados;
- Fitas, varões ou cabos nus;
- Chapas;
- Anéis de fitas ou cabos nus situados nas fundações dos edifícios;
- Armaduras do betão imerso no solo;
- Canalizações metálicas de água – este tipo de solução apenas é utilizado como eléctrodo de terra caso exista acordo com o distribuidor de água e qualquer modificação que ocorra nas canalizações de água, o responsável pela instalação deve ser devidamente avisado.

A melhor solução são os anéis situados nas fundações dos edifícios. Esta solução apresenta as seguintes vantagens [1]:

- Os anéis são realizados no momento da construção do edifício, diminuindo a necessidade de trabalhos adicionais;
- São colocados a uma profundidade que garante uma boa resistência de contacto e não fica sujeito às variações sazonais;
- Garantem um bom contacto com o solo;
- Utilizam a área do edifício permitindo reduzir o valor da resistência de terra;
- Como são realizados no início da construção pode ser útil como eléctrodo de terra para as instalações do estaleiro.

Este anel pode ser formado por [10]:

- 1 cabo nu de cobre com secção mínima de 25 mm^2 ;
- 1 fita de aço galvanizado com secção mínima de 100 mm^2 e 3 mm de espessura ou 1 cabo de aço galvanizado com secção mínima de 100 mm^2 , embebido no betão de preparação das fundações ou no próprio betão.

A Figura 23 apresenta os diferentes tipos de eléctrodos e as dimensões mínimas, dimensionados para riscos de deterioração mecânica e química. No entanto, para situações onde seja necessário antever os riscos de corrosão, devem ser tomadas as devidas precauções.

Tipos de eléctrodos		Material constituinte	Superfície de contacto com a terra (m ²)	Espessura (mm)	Diâmetro exterior (mm)	Comprimento (m)	Dimensão transversal (mm)	Secção (mm ²)	Diâmetro dos fios constituintes (mm)
H O R	Cabos nus	Cobre	1	-	-	-	-	25	1,8
		Aço galvanizado ⁽¹⁾	1	-	-	-	-	100	1,8
R I	Fitas	Cobre	1	2	-	-	-	25	-
		Aço galvanizado ⁽¹⁾	1	3	-	-	-	100	-
Z	Varões	Aço galvanizado ⁽¹⁾	1	-	10	-	-	-	-
V E R	Chapas	Cobre	1	2	-	-	-	-	-
		Aço galvanizado ⁽¹⁾	1	3	-	-	-	-	-
T	Varetas	Cobre	-	-	15	2	-	-	-
		Aço revestido a cobre	-	0,7 ⁽²⁾	15	2	-	-	-
		Aço galvanizado ⁽¹⁾	-	-	15	2	-	-	-
T	Tubos	Cobre	-	2	20	2	-	-	-
		Aço galvanizado ⁽¹⁾	-	2,5	25	2	-	-	-
	Perfilados	Aço galvanizado ⁽¹⁾	-	3	-	2	60	-	-

Figura 23 – Tipos de eléctrodos e respetivas dimensões [1]

Assim, a colocação dos eléctrodos de terra deve respeitar as seguintes regras [1][7]:

- Os eléctrodos de terra constituídos por condutores enterrados horizontalmente podem ser colocados em anel nas fundações dos edifícios com o mesmo perímetro que a instalação ou em valas horizontais a uma profundidade de 1 metro, em que são preenchidas com terra capaz de armazenar e reter a água, sendo compostos por:
 - Condutores unifilares ou multifilares em cobre ou cobertos por uma bainha de chumbo e de secção igual ou superior a 25 mm²;
 - Condutores de alumínio cobertos com uma bainha de chumbo e de secção igual ou superior a 35 mm²;
 - Fitas de cobre de secção igual ou superior a 25 mm² e uma espessura igual ou superior a 2 mm;
 - Fitas de aço macio galvanizado com uma secção igual ou superior a 100 mm² e uma espessura igual ou superior a 3 mm;
 - Cabos de aço galvanizado de secção igual ou superior a 100 mm².
- As chapas finas enterradas, usualmente, utilizam placas retangulares de 0,5 m x 1 m a uma profundidade de aproximadamente 0,8 m, e a sua espessura deve ser igual ou superior a 2 mm ou a 3 mm se de cobre ou aço galvanizado, respetivamente.
- Os eléctrodos verticais, com exceção dos eléctrodos em chapa, podem ser constituídos por:
 - Varetas de cobre ou de aço com diâmetro mínimo de 15 mm;
 - Tubos de aço galvanizado com diâmetro exterior igual ou superior a 25 mm;
 - Perfis de aço macio galvanizado com 60 mm de lado.

Relativamente ao eléctrodo de terra de fato, existem estruturas metálicas que podem ser utilizadas como eléctrodos, tais como [7]:

- Tubos e condutas, metálicos, privados: Esta estrutura pode ser utilizada caso não sejam referentes à alimentação do edifício, tais como água, aquecimento, entre outros. Neste tipo

de estrutura é importante garantir que a continuidade elétrica é assegurada, e necessitam de ser ligados em paralelo com o eletrodo de terra da instalação;

- Pilares metálicos enterrados;
- Estruturas em betão armado, no entanto ainda se encontra em estudo este tipo de solução.

2.5.2 Resistividade

No estabelecimento da rede de terras, a resistência de terra e a resistividade são dois parâmetros essenciais, que devem ser controlados e estudados no local onde for implementada a rede.

A resistência de um eletrodo de terra está diretamente relacionada com a resistividade que se verifica no solo. Assim a medição e o conhecimento deste parâmetro são essenciais para o projeto de rede de terras de forma a garantir o valor de resistência de terra pretendido e manter um valor aceitável durante a vida útil da instalação [16][17].

A medição da resistividade pode ser realizada através dos seguintes métodos [10][9][17]:

- Medição por amostragem: este método é realizado através de amostras do local, no entanto não é um modo muito seguro de medição, uma vez que não é garantido que as amostras recolhidas no local apresentam as mesmas propriedades em todo o solo;
- Medição local: o método mais utilizado nesta medição é o método de Wenner. Este método consiste na colocação de dois eletrodos de corrente e dois eletrodos de tensão igualmente separados. Primeiramente é injetada uma corrente nos dois eletrodos auxiliares de corrente obtendo o valor da tensão nos dois eletrodos auxiliares de tensão, conforme ilustrado na Figura 24.

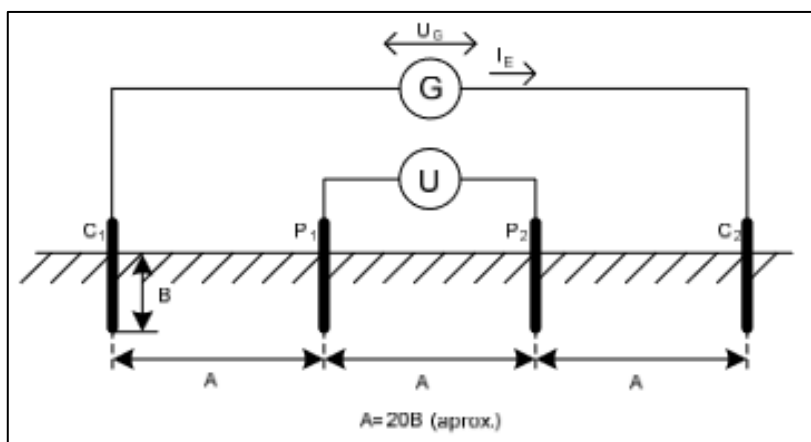


Figura 24 – Esquema do princípio de funcionamento do método de Wenner [9]

Através da lei de Ohm obtém-se o valor da resistência e de seguida considerando que o solo é homogêneo, a resistividade é obtida através da equação 19.

$$\rho E = \frac{4 \times \pi \times A \times R_m}{1 + \frac{2 \times A}{\sqrt{A^2 + 4 \times B^2}} - \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}} \quad (19)$$

ρE – Resistividade do solo ($\Omega.m$);
 A – Distância entre os elétrodos auxiliares (m);
 B – Profundidade dos elétrodos auxiliares (m);
 R_m – Valor da resistência entre dois elétrodos auxiliares de tensão (Ω).

Esta equação pode ser simplificada, caso seja garantido que os elétrodos de terra se encontram separados a uma distância muito superior em relação à profundidade, culminando na equação 20.

$$\rho E = 2 \times \pi \times A \times R_m \quad (20)$$

De forma a obter uma análise mais completa do solo, aumenta-se a profundidade dos elétrodos auxiliares, sendo possível desenvolver 3 tipos de curvas de resultados, como representando na Figura 25.

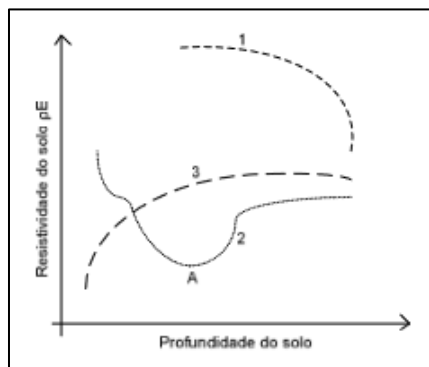


Figura 25 – Curvas relativas à variação da resistividade com a profundidade [9]

Relativamente à curva 1 pode-se concluir que com o aumento da profundidade, o valor da resistividade é mais baixo, o que significa que a rede de terras pode ser concebida a uma maior profundidade, em relação à curva 2 o valor da resistividade diminui até uma certa profundidade pelo que a rede de terras deve ser realizada até essa profundidade, por fim a curva 3 indica que com o aumento da profundidade, a resistividade aumenta, assim a rede de terras deve ser concebida a uma profundidade menor.

O tipo de solo, a humidade, a temperatura e a quantidade de sais são fatores que influenciam a resistividade, deste modo é necessário ter em conta estas condições na elaboração da rede de terras.

Na Tabela 10 são representados valores de resistividade para alguns tipos de terrenos, onde se conclui que a resistividade assume diferentes valores devido ao tipo de solo e também dentro da mesma natureza do solo podem ser encontrados valores diferentes de resistividade [18].

Tabela 10 – Valores de resistividade para diferentes terrenos [1]

Natureza dos terrenos	Resistividade ($\Omega.m$)
Terreno pantanoso	1 a 30
Lama	20 a 100
Húmus	10 a 150
Mármore e argilas compactas	100 a 200
Areia argilosa	50 a 500
Areia silicosa	200 a 3000
Solo pedregoso nu	1500 a 3000
Solo pedregoso recoberto de relva ou erva curta	300 a 500
Calcários compactos	1000 a 5000
Xistos	50 a 300

A resistividade, com o aumento da humidade, tende a diminuir, como representado na Figura 26. No entanto, é importante realçar que os eléctodos de terra não podem estar mergulhados na água, nem em poças de água ou em rios, uma vez que além da má condutibilidade da água existe a possibilidade das pessoas entrarem em contacto com a água quando ocorre o defeito, o que pode comprometer a sua segurança [16][17].

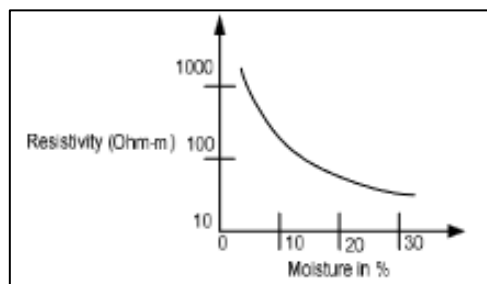


Figura 26 – Variação da resistividade com a humidade [19]

Para temperaturas superiores, a resistividade tende a diminuir, como ilustrado na Tabela 11. Os valores obtidos foram realizados para um solo com mistura de areia e argila e um teor de humidade a rondar os 15% [1][16][17].

Tabela 11 – Variação da resistividade com a temperatura [17]

Temperatura ($^{\circ}C$)	Resistividade (Ωm)
20	72
10	99
0 (água)	138
0 (gelo)	300
-5	790
-15	3300

Relativamente aos sais existentes na terra, quando dissolvidos na água, diminuem a resistividade. Apenas uma pequena quantidade de sal pode reduzir bastante a resistividade da terra, como é possível verificar pela Figura 27.

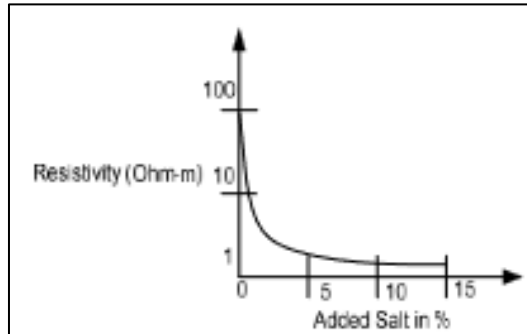


Figura 27 – Variação da resistividade com a presença de sais no solo [19]

2.5.3 Estimativa da resistência de terra

A resistência é a característica do condutor que se opõe ao fluxo de corrente elétrica quando é aplicada uma tensão nas duas extremidades. Conforme a constituição do eletrodo de terra, verificam-se expressões diferentes para a obtenção do valor da resistência, conforme representado na Tabela 12.

Tabela 12 – Resistência do eletrodo de terra [1]

Elétrodo de Terra	Equação
Condutores enterrados horizontalmente	$R = 2 \times \frac{\rho}{L} \quad (21)$ <p>L – Comprimento da vala ocupada pelo condutor (m).</p>
Chapas finas enterradas	$R = 0,8 \times \frac{\rho}{L} \quad (22)$ <p>L – Comprimento da vala ocupada pelo condutor (m).</p>
Elétrodos verticais	$R = \frac{\rho}{L} \quad (23)$ <p>L – Comprimento do elemento (m).</p>
Pilares metálicos enterrados	$R = 0,366 \times \frac{\rho}{L} \times \log_{10} \frac{3L}{d} \quad (24)$ <p>L – Comprimento enterrado do pilar (m); d – Diâmetro do cilindro circunscrito do pilar (m).</p>

2.5.4 Medição da resistência de terra

A medição da resistência de terra pode ser realizada através da criação de um circuito fechado pela terra, induzindo uma corrente entre dois pontos minimamente afastados, o que provocará

tensões no solo. Assim, com o valor da corrente e da tensão e através da aplicação da lei de Ohm, obtém-se a resistência de terra. Habitualmente, as medições são realizadas pelos seguintes métodos [9]:

- Método das quedas de tensão: este método consiste na utilização de três elétrodos, um elétrodo auxiliar de tensão (P), um elétrodo auxiliar de corrente (C) e o elétrodo de terra a medir (E), conforme ilustrado na Figura 28.

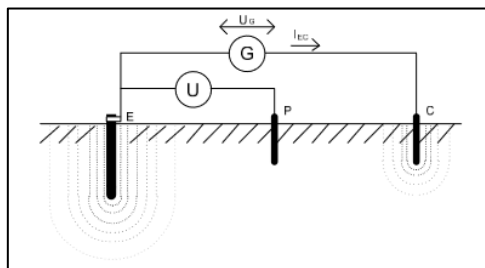


Figura 28 – Distribuição dos elétrodos [9]

De forma a garantir que não existe influência entre os elétrodos, o elétrodo auxiliar de tensão é movido entre os dois elétrodos e devem ser registados os valores de forma a conseguir realizar uma curva com os resultados. A configuração deve ser idêntica à demonstrada na Figura 29.

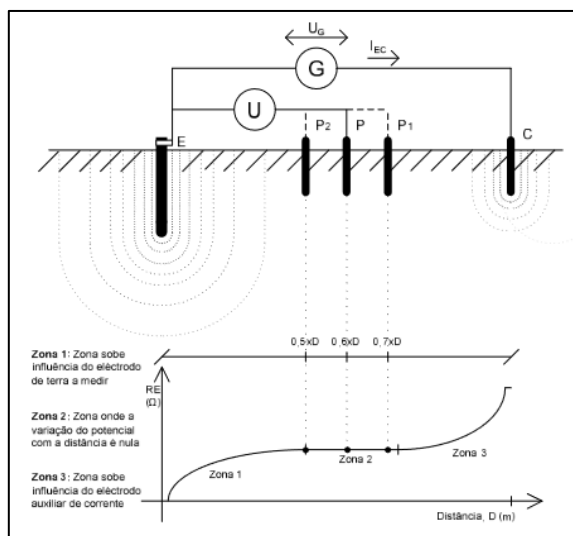


Figura 29 – Método das quedas de tensão e curva de resultados [9]

Nesta situação, os valores obtidos são plausíveis, pois na zona 2 o valor da resistência de terra é constante, sendo esse o valor final. No entanto, caso o elétrodo de terra a medir e o elétrodo auxiliar de corrente estejam na mesma zona de influência, não seria possível colocar o elétrodo auxiliar de tensão pois não existiria uma zona onde a variação do potencial com a distância fosse nula. Assim, a solução passava por afastar o elétrodo auxiliar de corrente.

- Método Seletivo: em comparação com o método anteriormente apresentado, este método apenas se diferencia no modo como se consegue obter o valor da corrente no elétrodo de terra a medir. Neste método recorre-se à utilização de uma pinça auxiliar de corrente medindo diretamente a corrente que circula no elétrodo de terra, como se encontra representado na Figura 30, em que o objetivo passa por determinar o valor da resistência de terra de serviço de um posto de transformação.

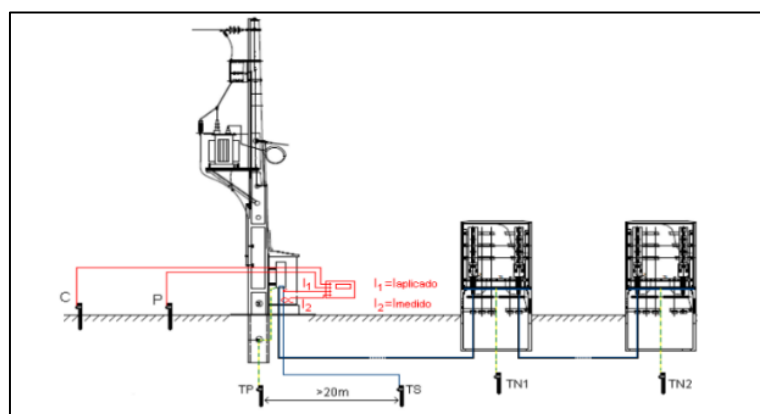


Figura 30 – Princípio de funcionamento do método seletivo [9]

A corrente utilizada na lei de Ohm será a corrente medida e não a corrente aplicada, como se verifica na equação 25.

$$R_{TS} = \frac{V_{\text{medido}}}{I_{\text{medido}}} \quad (25)$$

As condições referidas para o método das quedas de tensão também devem ser tidas em conta para este método.

- Método *Clamp-On*: este método é caracterizado pela ausência de elétrodos auxiliares, obtendo o valor da resistência de terra por aproximação. Este método apenas pode ser utilizado caso exista uma ou mais ligações à terra em paralelo com o elétrodo de terra a medir de forma a garantir que existe um caminho para o retorno da corrente, como se encontra ilustrado na Figura 31.

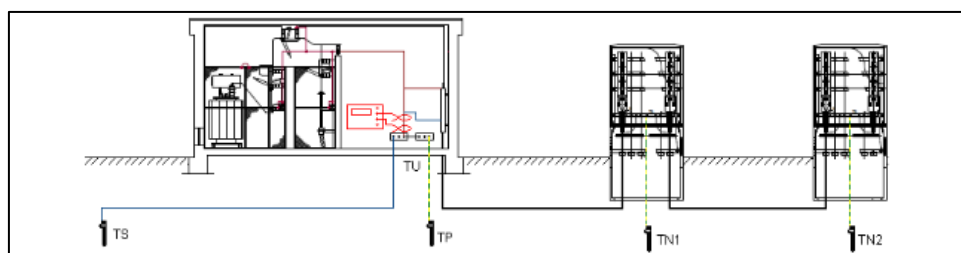


Figura 31 – Princípio de funcionamento do método *Clamp-On* [9]

O equipamento de medida obtém o valor da resistência de terra através da aplicação da equação 26.

$$R_{\text{medido}} = R_{\text{TU}} + \frac{R_{\text{TN1}} \times R_{\text{TN2}}}{R_{\text{TN1}} + R_{\text{TN2}}} \quad (26)$$

2.5.5 Melhoramento da resistência de terra

Em algumas situações existem valores muito altos da resistência de terra pelo que se torna importante implementar determinadas técnicas de forma a reduzir este valor, as técnicas comuns mais utilizadas são [20][16]:

- Aumento da profundidade do eléctrodo de terra: este método é bastante utilizado, caso se verifique que o solo apresenta camadas mais profundas com menor resistividade;
- Aumento do diâmetro do eléctrodo de terra: este método não tem muita interferência no valor da resistência de terra, aumentar o diâmetro para o dobro apenas reduz a resistência em 10%;
- Aumento do número de eléctrodos em paralelo: estes eléctrodos devem encontrar-se minimamente afastados para não existir efeitos de resistência mútua;
- Tratamento do Solo: este método não é uma solução permanente, uma vez que podem ser eliminados pela chuva;
- Conceção do sistema de Terra: as redes de terras podem ser realizadas de uma forma mais simples ou complexa. As redes complexas aumentam o contacto com a terra envolvente diminuindo a resistência do solo.

3. Estudo de Caso – Unidade Industrial de Produção de Baterias de Lítio

3.1 Enquadramento

As instalações industriais, devido à sua crescente dimensão, processos mais complexos e tecnologias mais recentes, tornaram-se cada vez mais dependentes de sistemas elétricos adequados e fiáveis.

Face à intensificação da concorrência no mercado, as indústrias exploram ao máximo a capacidade produtiva das suas máquinas. No entanto, o regime intensivo de trabalho, eleva significativamente o risco de falhas, ameaçando as metas de produção da fábrica e comprometendo a segurança das pessoas.

Consequentemente, a rentabilidade de uma instalação industrial está diretamente relacionada com a disponibilidade de energia. A interrupção da produção pode resultar em perdas financeiras devido, principalmente, ao tempo de inatividade dos trabalhadores e das máquinas responsáveis pela produção, à incapacidade de cumprir os prazos de entrega e à deterioração dos materiais em processamento.

Além disso, a segurança das pessoas deve ser a principal prioridade no dimensionamento e operação de uma instalação elétrica industrial, exigindo o rigoroso cumprimento das normas e regulamentações aplicáveis em todas as etapas do projeto. A eletricidade apresenta riscos que, se não forem avaliados e mitigados adequadamente, podem resultar em choques elétricos para todos os usuários da instalação.

O presente capítulo oferece uma visão aprofundada do trabalho desenvolvido em contexto empresarial, iniciando com uma descrição da indústria e dos seus edifícios.

Em seguida, a partir das condições e requisitos especificados pelo dono de obra, realizou-se uma estimativa de potência, fornecendo uma base sólida para o dimensionamento da rede de distribuição.

Com base nas características da instalação, o esquema TN foi selecionado para a alimentação normal. A fim de determinar a solução economicamente mais vantajosa entre o esquema TN-S e TN-C, foi realizado um estudo da viabilidade económica utilizando uma ferramenta desenvolvida em *Visual Basic for Applications* (VBA).

A partir do critério técnico de dimensionamento das canalizações, realizou-se um estudo da secção económica de dois circuitos, com o objetivo de determinar, principalmente, o tempo de retorno do investimento na utilização de uma secção maior.

O capítulo também aborda o estudo do grupo gerador para alimentação das cargas de emergência, com foco principal no dimensionamento das canalizações e no cálculo das necessidades de ventilação da sala do grupo gerador.

Por fim, a validação do projeto do sistema de ligação à terra foi realizada com o auxílio do *software ELEK SafeGrid Earthing*, permitindo uma análise mais abrangente e precisa, concentrando-se na determinação da resistência do sistema de terra e na verificação das tensões de contacto e de passo, a fim de garantir que estas tensões são inferiores aos valores máximos tolerados pelo corpo humano.

3.2 Caracterização da Indústria

A CALB Europe S.A pretende construir em Portugal, na zona industrial e logística de Sines, uma nova unidade de produção de baterias de lítio, que inclui todo o processo, desde o fabrico dos eléctrodos até à célula, módulo ou bateria final.

A unidade industrial será implementada numa área de aproximadamente 93 hectares, sendo constituída por um conjunto de edifícios, como ilustrado na Figura 32.



Figura 32 – Planta da Instalação Industrial de Produção de Baterias de Lítio

Os edifícios da instalação industrial são divididos em quatro categorias principais, conforme representado na Tabela 13.

Tabela 13 – Organização dos edifícios por categorias

Categoria	Edifício	Função
Oficina de fabrico	M1 – Oficina de eléctrodos; M2 – Oficina de Células; M3 – Oficina de Formação; M4 – Oficina de Embalagem; M5 – Oficina de Peças.	Relacionada com a função de produção/fabrico de células/baterias.
Armazém	W1 – Armazém.	Dedicado ao armazenamento.
Escritório Administrativo Terciário	L2 – Laboratório; R1 – Edifício de investigação e desenvolvimento.	Edifícios com funções principalmente terciárias, que incluem investigação e desenvolvimento, administração e instalações para os trabalhadores.
Instalações utilitárias e de apoio	C1 – Edifício central de serviços públicos; N1 e N2 – Estação de purificação; C2 – Armazenamento de produtos químicos; T1 – Tratamento de águas residuais.	Edifícios que compreendem equipamento utilitário e/ou funções de apoio relacionadas com o processo de produção.

3.3 Estimativa de Potência

3.3.1 Enquadramento

A unidade industrial será alimentada por uma subestação de 400/30 kV, a partir da qual será realizada a distribuição de energia aos diversos postos de transformação instalados nos edifícios.

O trabalho desenvolvido no presente estágio cingiu-se ao projeto do Edifício M2, constituído por três pisos, pois apenas existia para este edifício a localização de equipamentos e respetivas especificações técnicas. Para os restantes edifícios havia uma estimativa de potência realizada internamente na empresa.

Para alimentação ao edifício foram considerados 4 postos de transformação, dois situados no piso 2 e outros dois situados no piso 3. Não foi considerada a instalação de postos de transformação no piso 1 (Rés-do-chão) devido à ausência de uma área técnica no projeto de arquitetura.

As instalações de utilização de energia elétrica em baixa tensão do piso 1 (rés-do-chão) serão alimentadas pelos Quadros Gerais de Baixa Tensão dos postos de transformação do piso 2, que também alimentarão as instalações desse mesmo piso. As instalações de utilização do piso três serão alimentadas pelos Quadros Gerais de Baixa Tensão dos postos de transformação desse mesmo piso.

No âmbito do presente trabalho, os Quadros Gerais de Baixa Tensão dos Postos de Transformação serão designados por Centro de Controlo de Motores (MCC), que é a terminologia solicitada pelo dono de obra.

3.3.2 Potência Instalada nos Postos de Transformação do Edifício M2

Para definição da potência instalada em cada um dos Postos de Transformação do Edifício M2, foi considerada a informação relativa à localização dos diversos equipamentos instalados assim como os coeficientes de simultaneidade e de utilização indicados pelo dono de obra.

Para apoio à realização deste trabalho foi utilizada uma ferramenta informática interna da empresa, de suporte ao balanço de cargas que permitiu uniformizar a potência dos transformadores a instalar em cada Posto de Transformação, tendo-se adotado a instalação de dois postos de transformação no piso dois e de dois postos de transformação no piso três, sendo os postos de transformação do piso dois equipados com dois transformadores de 2500 kVA, cada um, e os postos de transformação do piso três equipados com um transformador de 2500 kVA, cada um. A Figura 33 mostra um extrato da ferramenta informática utilizada e dos resultados obtidos.

4 Áreas Técnicas (Duas no piso 2 e duas no piso 3)						
Área Técnica	Área Técnica M2 - 2 - 016		Área Técnica M2 - 2 - 017		Área Técnica M2 - 3 - 004	Área Técnica M2 - 3 - 008
MCC	MCC - M2 - 016 - 1	MCC - M2 - 016 - 2	MCC - M2 - 017 - 1	MCC - M2 - 017 - 2	MCC - M2 - 004 - 1	MCC - M2 - 3 - 008 - 1
Potência	1906.85 kVA	2177.15 kVA	2374.58 kVA	2292.27 kVA	1151.95 kVA	1279.07 kVA
Divisões	1-042, 1-043, 1-046, 1-048, 1-062, 1-066, 1-067, 1-070, 1-074, 1-076, Área Técnica	2-011, 2-014, 2-019, 2-049, 2-050, 2-052, 2-053, 2-054, 2-062, 2-104, 2-192, 2-204	2-027, 2-041, 2-084, 2-078, 2-079, 2-082, Área Técnica	1-021, 1-023, 1-064, 1-125, 1-134	3-001, 3-002, 3-003, 3-004	3-005, 3-006, 3-007, Área Técnica
Resumo	6 Transformadores 30/0.4 kV de 2500 kVA no total. Piso 2 - Cada área técnica será composta por 2 transformadores. Piso 3 - Um transformador em cada área técnica					

Figura 33 – Potência instalada nos postos de transformação

3.3.3 Potência Instalada na Subestação

Para alimentar a unidade industrial foi considerada a instalação de uma subestação, que não foi objeto do presente trabalho, com ligação à rede pública de distribuição de energia elétrica em muito alta tensão, 400 kV, do tipo *Gas Insulated Substation* (GIS).

A partir da referida subestação serão alimentados os diversos edifícios da unidade industrial, conforme representado na Figura 34.

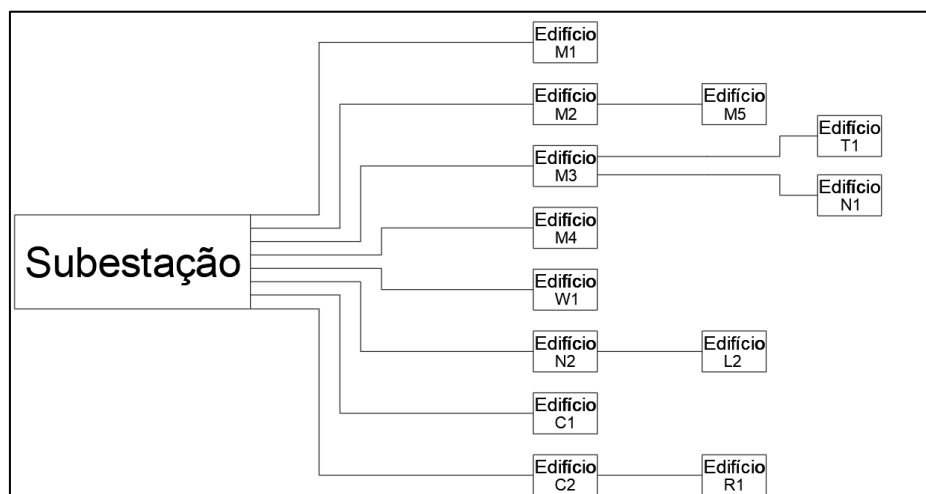


Figura 34 – Alimentação da unidade industrial

Para definição da potência a instalar na subestação foi considerada a potência instalada nos diversos edifícios da unidade industrial, considerando um fator de simultaneidade de 0,8, baseado na experiência do gabinete de engenharia em projetos similares.

Para apoio à realização deste trabalho foi utilizada uma ferramenta informática interna da empresa, que permitiu obter uma potência de 150 MVA para a subestação.

A Figura 35 mostra o resultado do estudo de estimativa de potência realizado.

EDIFÍCIO	POTÊNCIA [MVA]
V1 - Subestação	137.58
C1	13.79
C2 + R1	21.37
M1	15.36
M2 + M5	15.63
M3 + T1 + N1	42.45
M4	16.59
W1	2.16
N2 + L2	10.23

Figura 35 – Determinação da potência na subestação

Na subestação serão instalados dois transformadores de 150 MVA, um para serviço normal e outro para reserva de forma a garantir a continuidade de funcionamento da instalação em caso de manutenção e/ou avaria de um dos transformadores.

3.4 Distribuição de Energia

3.4.1 Enquadramento

Para auxiliar no dimensionamento da rede de distribuição de energia, foi utilizado o *software* ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*), que é uma ferramenta de modelação e simulação de redes elétricas que permite analisar a dinâmica do sistema elétrico de energia para os diversos níveis de tensão.

Esta ferramenta é usada pela empresa neste tipo de estudos e que nunca tinha sido utilizada na formação académica, o que permitiu adquirir mais conhecimentos e ter novas experiências.

3.4.2 Solução Técnica de Distribuição

3.4.2.1 Muito alta tensão

A subestação de Sines apresenta-se como a opção ideal para interligação à rede pública, em virtude de sua proximidade com a indústria, disponibilidade de espaço e capacidade de receber uma nova instalação.

A subestação será alimentada por duas linhas aéreas simples de 400 kV, devido à disponibilidade para ligação, permitindo otimizar o planeamento e os recursos. Esta solução assegura a máxima segurança e fiabilidade no fornecimento de energia.

No barramento principal da subestação será adotado o barramento duplo, após avaliação cuidadosa da complexidade do sistema, orçamento e nível de fiabilidade pretendido. A configuração em barramento duplo liga os circuitos a dois barramentos, com um disjuntor de conexão entre eles, permitindo que cada circuito esteja ligado a pelo menos um barramento, assegurando uma excelente fiabilidade e flexibilidade de operação. Em caso de avaria e/ou manutenção de um barramento, o outro barramento pode assumir a responsabilidade e o controlo do sistema, minimizando o tempo de inatividade.

A Figura 36 apresenta o diagrama simplificado de distribuição de energia elétrica em muito alta tensão.

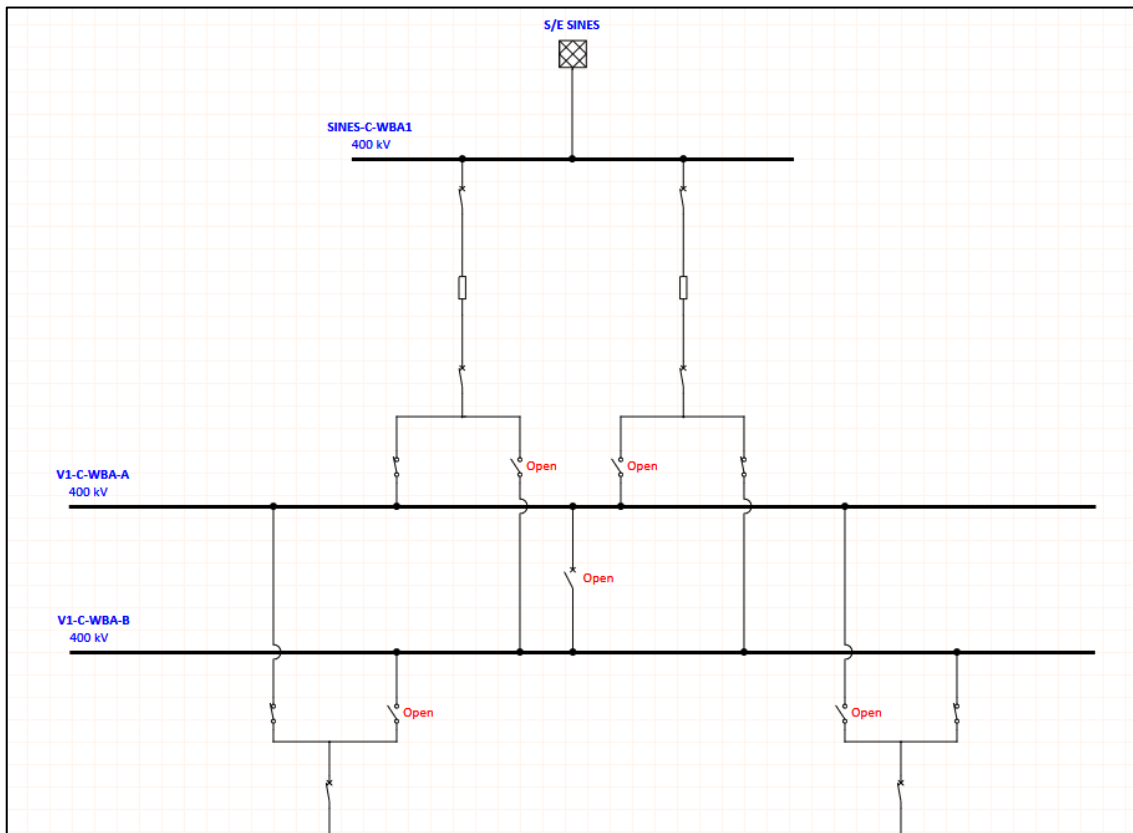


Figura 36 – Diagrama simplificado de distribuição de energia elétrica em muito alta tensão

3.4.2.2 Média Tensão

A distribuição em média tensão será realizada a 30 kV, nível de tensão definido após realização de um estudo técnico e económico.

Este estudo contemplou a tensão de 15 kV e 30 kV, demonstrando que para a mesma potência transmitida, a distribuição em 30 kV resulta em correntes menores, perdas reduzidas e permite o uso de condutores de menor secção. Em contrapartida, a distribuição em 15 kV, implica correntes mais altas, perdas mais significativas e a necessidade de condutores de maior secção.

A distribuição de energia é um fator importante no sistema elétrico, no qual é necessário garantir que a energia é entregue aos utilizadores de forma segura, confiável e eficiente. Contudo, as redes de distribuição podem estar sujeitas a falhas ou distúrbios que podem comprometer a qualidade e a continuidade de serviço. Desta forma, considerou-se dois circuitos de 30 kV, permitindo aumentar a segurança e a eficiência do fornecimento de energia e a redução do risco de interrupções de serviço.

A Figura 37 apresenta o diagrama simplificado de distribuição de energia elétrica em média tensão.

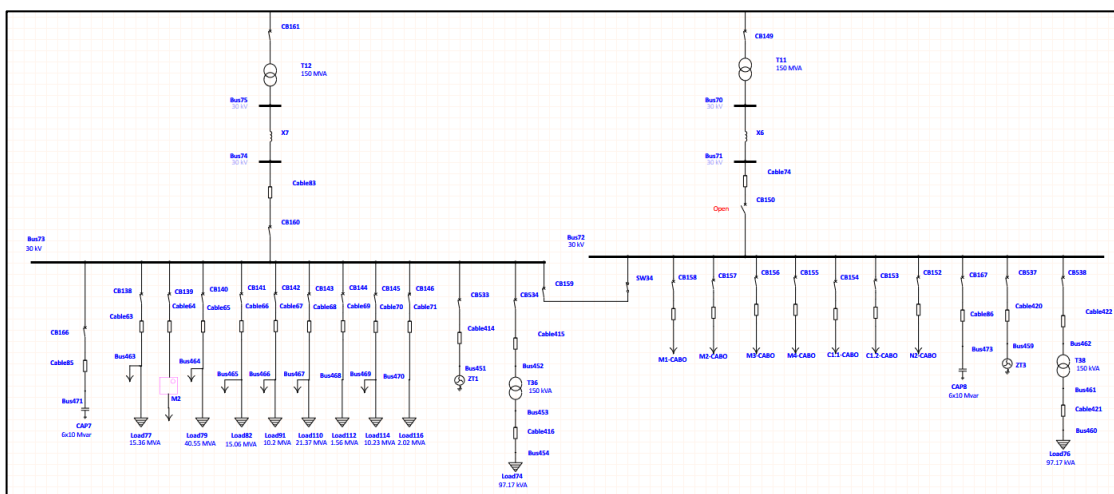


Figura 37 – Diagrama simplificado de distribuição de energia elétrica em média tensão

No barramento de 30 kV é realizada a compensação do fator de potência através do banco de condensadores, contribuindo para a estabilização da tensão, aumento da capacidade de carga e otimização da utilização da energia elétrica. A definição da capacidade do banco de condensadores seguiu valores pré-determinados por outras equipas.

Além disso, no barramento de 30 kV, está representada a carga associada a cada edifício, com exceção do edifício alvo de estudo (M2), no qual foi criado um bloco, dedicado exclusivamente à sua distribuição de energia elétrica em baixa tensão, permitindo organizar o projeto de uma forma mais estruturada, como observa-se na Figura 38.

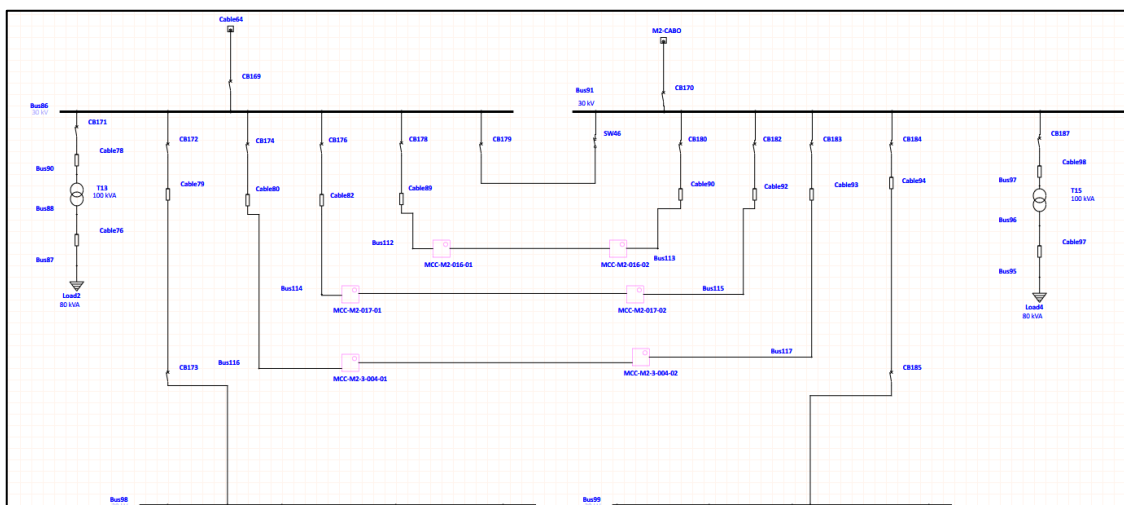


Figura 38 – Diagrama simplificado da distribuição de energia no edifício M2

3.4.2.3 Baixa Tensão

A distribuição de energia elétrica em baixa tensão considera postos de transformação internos, a partir dos quais se desenvolve a rede de distribuição de energia do edifício.

De acordo com a informação recebida por parte do dono de obra, os equipamentos são divididos em 2 grupos: equipamentos de processo e equipamentos de utilidades. Os equipamentos de processo, estão diretamente envolvidos na produção principal da instalação e são essenciais para a conceção dos produtos finais. Por outro lado, os equipamentos de utilidades, fornecem suporte e auxílio para as operações principais da instalação industrial, de forma a garantir que os trabalhos ocorrem de modo eficiente. Esta distinção entre os equipamentos foi importante para o desenvolvimento da rede em baixa tensão, uma vez que, a pedido do dono de obra, a alimentação aos equipamentos de utilidades será realizada através de canalização pré-fabricada enquanto para os equipamentos de processo, será utilizado cabo.

A canalização pré-fabricada tem duas funções principais: distribuição e transporte. Na distribuição, a canalização pré-fabricada ramifica-se em diversas saídas, adaptando-se à quantidade de equipamentos a serem alimentados. Em contrapartida, no transporte, a canalização pré-fabricada efetua apenas a alimentação entre dois pontos. Independentemente da sua função, a canalização pré-fabricada oferece inúmeras vantagens à instalação, tais como:

- Enorme flexibilidade, permitindo investir nas necessidades existentes sem afetar negativamente a expansão futura;
- A canalização pré-fabricada é testada em fábrica, tornando o processo de instalação no local mais simples e rápido;
- A adição, o deslocamento ou a substituição das cargas são efetuadas rapidamente, com o sistema energizado e sem interrupção de serviço;
- Na ocorrência de grandes modificações, a canalização pré-fabricada é facilmente desmontável e reutilizável;

3.5.2 Seleção

A seleção do esquema de ligação à terra é um tema bastante importante para os engenheiros que se dedicam ao projeto e à definição das condições de exploração da rede. A escolha sobre o ELT a adotar na instalação é determinada pelos seguintes fatores:

- Regulamentos e práticas locais/nacionais que, em certas situações, impõem esquemas de ligação à terra específicos;
- Decisão do proprietário caso o fornecimento seja efetuado através de um transformador privado MT/BT ou devido à existência de uma fonte de energia privada.

A instalação em estudo enquadra-se na segunda condição. Assim, o proprietário possui, efetivamente, a capacidade de selecionar o esquema de ligação à terra, tendo sido realizados debates com a empresa de engenharia para a decisão do ELT adequado à unidade industrial.

O esquema TT não será utilizado devido à necessidade de os elétrodos de terra serem distintos, ou seja, a obrigatoriedade da existência de duas terras (a terra das massas e a terra de alimentação) não se consegue garantir. Em zonas urbanas e fortemente povoadas, com edifícios de grandes dimensões e infraestruturas desenvolvidas, é extremamente difícil ou mesmo impossível, instalar elétrodos de terra eletricamente independentes. Aplica-se de modo idêntico nas instalações industriais no qual estejam presentes postos de transformação no seu interior.

Consequentemente, a impedância da malha de defeito aproxima-se do esquema TN, sendo de valor bastante reduzido e apenas restringido pelos condutores do circuito. A corrente de defeito será elevada, pelo que se torna necessário utilizar dispositivos de proteção contra sobreintensidades.

O esquema IT será usado exclusivamente no gerador de emergência devido à necessidade de garantir a continuidade do fornecimento de energia aos equipamentos essenciais à segurança das pessoas.

3.5.3 Análise económica entre TN-S e TN-C

3.5.3.1 Enquadramento

No âmbito do projeto eletrotécnico, a utilização de ferramentas de apoio tornou-se uma prática comum, impulsionada pela sua capacidade de otimizar o processo, proporcionando maior simplicidade, agilidade e eficiência nas tarefas.

A análise da viabilidade económica de uma determinada solução é fundamental para o sucesso do projeto. Através de um estudo dos custos e benefícios, é possível avaliar as diversas opções e analisar comparativamente os cenários possíveis, contribuindo para a sustentabilidade financeira do projeto.

3.5.3.2 Ferramenta informática desenvolvida

Com o propósito de identificar a solução mais vantajosa em termos financeiros entre o esquema TN-S e o esquema TN-C, foi desenvolvida uma ferramenta, utilizando as funcionalidades da linguagem *Visual Basic for Applications (VBA)* associado ao *software Excel*.

A ferramenta permite analisar economicamente o custo do disjuntor, cabo ou canalização pré-fabricada para o esquema TN-S e TN-C, a partir da análise do fluxo de cargas e do estudo de curto-circuito realizado no *software ETAP*, que permitiu determinar a secção da canalização, calibre do disjuntor, poder de corte e corrente de serviço da canalização pré-fabricada.

Para este efeito, a ferramenta é constituída por três páginas principais:

- Página inicial



Figura 40 – Capa da ferramenta informática desenvolvida

Esta página representa o ponto de partida da ferramenta. Após carregar no botão “Iniciar”, será exibida uma página destinada a guardar a informação, juntamente com uma *Userform*, que constitui o único meio para introduzir os parâmetros dos circuitos.

- Base de Dados

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
Origem	Destino	Comprimento	Tipo de Alimentação	Tipo de Condutor	Cabo Barramento	Regime de Neutro	Calibre do Disjuntor	Tipo de Disjuntor	Curva	Poder de Corte	Secção do Condutor	Secção do Neutro	Função do Barramento	Corrente de Serviço	Caixa de Ligação	Caixa de Derivação	Preço Disjuntor
																	0
																	Preço Cabo
																	0
																	Preço Barramento
																	0
																	Preço TOTAL
																	0

Figura 41 – Página destinada à gravação dos dados

Esta página guarda os parâmetros dos circuitos e é responsável pela apresentação do preço do cabo, disjuntor e canalização pré-fabricada e o preço total para todos os circuitos inseridos na base de dados.

- *Userform*

The image shows a web-based user form for data entry. At the top, there are logos for 'ISEP INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO' and 'QUADRANTE'. The form is organized into several sections:

- Origin and Destination:** 'Origem:' and 'Destino:' text input fields.
- Length:** 'Comprimento (m):' text input field.
- Feeding Type:** 'Tipo de Alimentação:' dropdown menu.
- Conductor Type:** 'Tipo de Conductor:' dropdown menu.
- Cable or Busbar:** 'Cabo ou Barramento' dropdown menu.
- Neutral Regime:** 'Regime de Neutro:' dropdown menu.
- Reduction of PE and Neutral Conductor Section:** A checkbox labeled 'Redução da Secção do Conductor PE e Neutro?'.
- Conductor Selection:** A complex field with a dropdown, a bracketed area containing 'X' and a plus sign, and another dropdown.
- Disruptor Parameters:** 'Calibre Disjuntores:', 'Poder de Corte:', and 'Tipo de Disjuntor:' dropdown menus.
- Curve:** 'Curva:' dropdown menu.
- Busbar Function and Service Current:** 'Função do Barramento' and 'Corrente de serviço' dropdown menus.
- Box Selection:** 'Caixa de Ligação' and 'Caixa de Derivação' dropdown menus.
- Action Buttons:** A vertical column of buttons on the right: 'Adicionar', 'Finalizar', 'Excluir', 'Apagar', and 'Preço'.

Figura 42 – Introdução dos dados

Uma *Userform* é uma caixa de diálogo personalizada, que torna a introdução dos dados mais acessível, permitindo economizar tempo e simplificar processos.

A *Userform* é constituída por parâmetros que devem ser preenchidos de forma a efetuar o estudo económico pretendido. Os dois primeiros parâmetros (“Origem” e “Destino”) foram criados para caracterizar o circuito que será alvo de estudo. De seguida, é extremamente necessário conhecer o comprimento da alimentação devido ao seu forte impacto no preço do cabo e da canalização pré-fabricada. Imediatamente a seguir, no “Tipo de Alimentação” deverá ser selecionado entre trifásico e monofásico. Relativamente ao “Tipo de Conductor”, a lista de opções é constituída por alumínio e cobre. Neste projeto, deverá ser selecionada a opção de cobre, devido à utilização de cabos XZ1. Contudo, o código já se encontra preparado para futuros projetos em que sejam utilizados cabos LXZ1.

No próximo parâmetro é necessário efetuar a distinção entre cabo ou barramento. Após a seleção de uma destas opções, é importante impossibilitar a realização de alterações nos parâmetros associados à outra alternativa, como ilustrado na Figura 43 e na Figura 44.



Figura 43 – Bloqueio das características associadas à canalização pré-fabricada

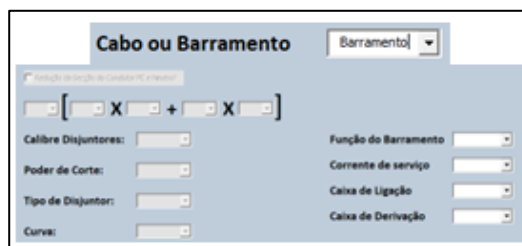


Figura 44 – Bloqueio das características associadas ao cabo

Caso seja utilizado cabo, será necessário preencher a configuração da canalização, conforme representado na Figura 45.

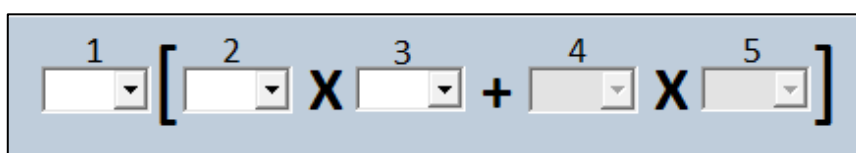


Figura 45 – Configuração da canalização

- 1- Número de circuitos em paralelo
- 2- Número de condutores de fase
- 3- Secção dos condutores de fase
- 4- Número de condutores de neutro/PE
- 5- Secção dos condutores de neutro/PE

No momento inicial, o número de condutores e secção do neutro/proteção encontra-se bloqueada. Para ativar estes parâmetros é necessário seleccionar a opção “Redução da Secção do Condutor PE e Neutro”, como detalhado na Figura 46.

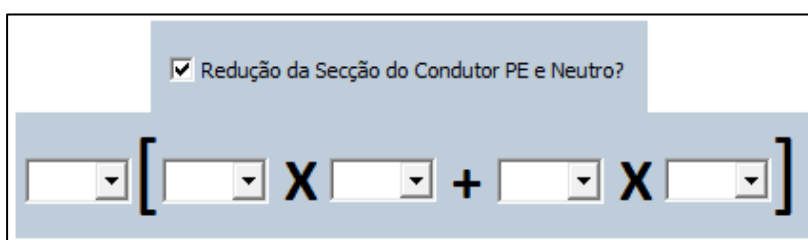


Figura 46 – Funcionalidade da opção “Redução da Secção do Condutor PE e Neutro”

Após a seleção do esquema de ligação à terra, o código em VBA foi automatizado, preenchendo automaticamente as caixas de texto e as listas de opções, tendo em consideração os seguintes parâmetros:

- No esquema TN-C as funções de neutro e de condutor de proteção estão combinadas num único condutor. Por outro lado, no esquema TN-S as funções de neutro e de condutor de proteção estão separadas;

- O esquema TN-C deve ser utilizado somente quando os condutores de fase possuem uma secção igual ou superior a 10mm² se for cobre e 16 mm² no caso de alumínio;
- O condutor de proteção não pode ser interrompido. Assim, num sistema monofásico, os dispositivos de proteção devem ser de 1 polo (1P) quando o circuito inclui um condutor PEN (TN-C) e de 2 polos (2P) ou 1 polo mais neutro (1P + N) quando o condutor neutro e de proteção estão separados. Em contrapartida, num sistema trifásico, os dispositivos de proteção devem ser de 3 polos (3P) no esquema TN-C e de 4 polos (4P) ou 3 polos mais neutro (3P + N) no esquema TN-S.

Relativamente ao barramento, é necessário, primeiramente, identificar a função do mesmo, mediante a distinção entre transporte e distribuição. Na canalização pré-fabricada destinada ao transporte é imprescindível ligar uma caixa de ligação em cada ponto, que é responsável pela conexão entre os dois pontos. Por outro lado, na canalização pré-fabricada com função de distribuição, as caixas de derivação assumem um papel crucial, permitindo ligar e desligar cargas ou percursos secundários sem interromper o serviço, garantindo uma excelente continuidade operacional.

Assim, a ferramenta desenvolvida garante que a caixa de ligação é bloqueada em canalização pré-fabricadas com função de distribuição, enquanto nas canalizações com função de transporte, o bloqueio aplica-se à caixa de derivação.

The screenshot shows a configuration window titled 'Função do Barramento' with a dropdown menu set to 'Distribuição'. Below the title, there are four rows of controls: 'Corrente de serviço' with a dropdown menu, 'Caixa de Ligação' with a disabled dropdown menu (greyed out), and 'Caixa de Derivação' with an active dropdown menu.

Figura 47 – Bloqueio das características associadas à função de transporte

The screenshot shows a configuration window titled 'Função do Barramento' with a dropdown menu set to 'Transporte'. Below the title, there are four rows of controls: 'Corrente de serviço' with a dropdown menu, 'Caixa de Ligação' with an active dropdown menu, and 'Caixa de Derivação' with a disabled dropdown menu (greyed out).

Figura 48 – Bloqueio das características associadas à função de distribuição

As linhas de código desenvolvidas para o sucesso e realização do estudo pretendido, podem ser consultadas no Anexo II.

3.5.3.3 Resultados

Como referido anteriormente, através da modelização da rede de distribuição em baixa tensão no ETAP foi possível obter todos os parâmetros essenciais para a comparação da viabilidade económica entre o esquema TN-S e o esquema TN-C.

Conforme previsto, o esquema TN-S apresenta um custo bastante superior comparativamente com o esquema TN-C, como demonstrado na Figura 49 e na Figura 50.

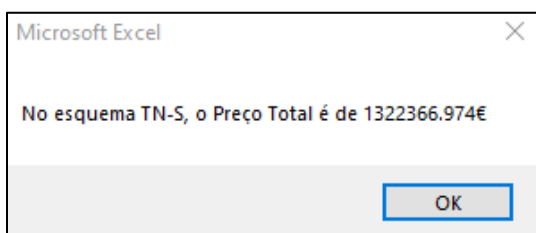


Figura 49 – Preço total do esquema TN-S

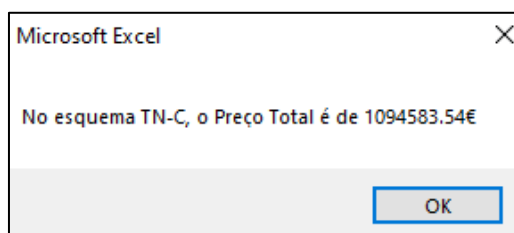


Figura 50 – Preço total do esquema TN-C

O esquema TN-C proporciona uma economia na instalação de aproximadamente 230 mil euros. Esta diferença de preço, tanto na utilização de cabo ou barramento, é claramente evidenciada na Figura 51 e na Figura 52, em que apresentam a comparação económica entre o esquema TN-S e TN-C em toda a instalação e em cada MCC, respetivamente.

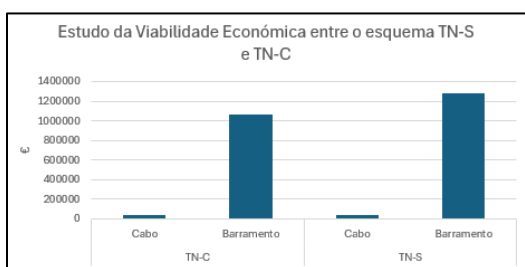


Figura 51 – Comparação da viabilidade económica em toda a instalação

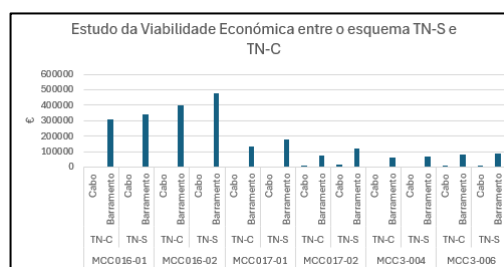


Figura 52 – Comparação da viabilidade económica em cada MCC

Embora a canalização pré-fabricada ofereça diversas vantagens e cumpra os requisitos do dono de obra, apresenta um custo consideravelmente superior ao uso de cabos, sendo o principal fator de discrepância no preço total da instalação.

Considerando os resultados obtidos, o esquema TN-C configura-se como a solução económica mais viável para a instalação elétrica em baixa tensão.

3.6 Secção Económica de Canalizações Elétricas

3.6.1 Enquadramento

O dimensionamento das canalizações baseia-se em critérios técnicos que determinam a secção mínima necessária para garantir a proteção de pessoas e instalações. Estes critérios consideram principalmente as condições de aquecimento, sobrecarga, queda de tensão e de curto-circuito. No entanto, os aspetos técnicos contrastam necessariamente com os critérios económicos, exigindo uma ponderação cuidadosa entre estas duas perspetivas divergentes para determinar a solução ideal para a instalação.

Uma menor secção do condutor, implica uma maior resistência elétrica e, conseqüentemente, maior será a perda de energia ao longo do circuito. A energia dissipada precisa de ser paga, traduzindo-se em acréscimos de custos que se estende por toda a vida útil do cabo. Desta forma, o método da determinação da secção económica, além do investimento inicial do cabo, tem em consideração as perdas por efeito de Joule durante o funcionamento da unidade industrial, que em média pode considerar-se 20 anos.

Esta secção caracteriza a metodologia da norma IEC 60287-4-3 para o dimensionamento económico, aplicando-a concretamente a dois circuitos da instalação.

3.6.2 Dimensionamento Económico

A norma IEC 60287-4-3 apresenta duas abordagens para o cálculo da secção económica: a primeira define as gamas económicas de corrente através da determinação do limite superior e inferior de corrente para uma determinada secção, enquanto a segunda calcula a secção económica do circuito e opta-se pela secção padronizada mais próxima. Como este estudo envolve dois circuitos já estabelecidos, a segunda abordagem é mais apropriada.

O principal objetivo do cálculo passa por determinar uma secção que reduza o custo da energia desperdiçada, sem incorrer num investimento inicial excessivo na compra e instalação do cabo. Assim, a secção económica é obtida quando a soma dos custos futuros das perdas de energia e a soma do investimento inicial são minimizados. Na Figura 53 encontra-se representado graficamente o método a ser aplicado, com o objetivo de encontrar o ponto de menor custo total.

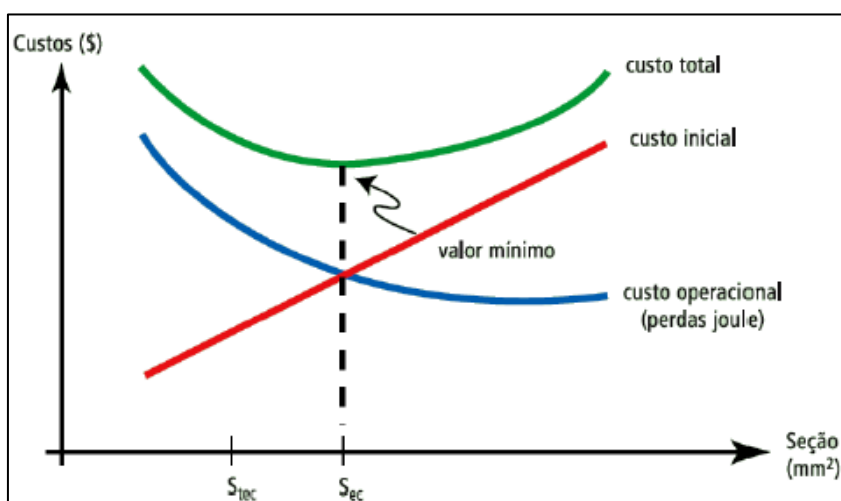


Figura 53 – Custo dos cabos em função da secção

A análise da Figura 53 mostra que a soma das curvas “Custo inicial” e “Custo operacional”, num determinado instante, permite obter o custo total do cabo ao longo da sua vida útil.

$$CT = CI + CE \quad \left| \begin{array}{l} CT - \text{Custo total durante a vida útil do cabo;} \\ CI - \text{Custo de investimento (Compra + instalação do cabo);} \\ CE - \text{Custo de exploração (Custo da energia desperdiçada ao longo do} \\ \text{tempo).} \end{array} \right. \quad (27)$$

O custo de investimento do cabo é determinado em função da equação 28.

$$CI = (A \times S + C) \times L \quad \left| \begin{array}{l} A - \text{Componente variável do custo, dependente da} \\ \text{secção do cabo;} \\ S - \text{Secção do cabo;} \\ C - \text{Termo constante;} \\ L - \text{Comprimento da canalização.} \end{array} \right. \quad (28)$$

Relativamente ao custo de exploração, este valor é obtido através da equação 29.

$$CE = I_{\max}^2 \times R \times L \times F \quad \left| \begin{array}{l} I_{\max} - \text{Corrente de pico do diagrama;} \\ R - \text{Resistência por unidade de comprimento;} \\ F - \text{Valor auxiliar.} \end{array} \right. \quad (29)$$

A resistência (R) tem em consideração os efeitos pelicular e de proximidade (y_s e y_p) e as perdas em ecrãs metálicos e armaduras (λ_1 e λ_2), como se verifica na equação 30.

$$R = \frac{\rho_{20} \times B \times [1 + \alpha_{20}(\theta_m - 20)]}{S} \times 10^6 \quad \left| \begin{array}{l} \rho_{20} - \text{Resistividade do condutor a } 20 \\ \text{°C;} \\ B - \text{Termo dado pela seguinte fórmula:} \\ (1 + y_s + y_p) (1 + \lambda_1 + \lambda_2); \\ \alpha_{20} - \text{Coeficiente de variação da} \\ \text{resistência com a temperatura a } 20^\circ \text{C} \\ (\text{Cu} - 0,00393, \text{Al} - 0,00403); \\ \theta_m - \text{Temperatura média;} \\ S - \text{Secção do cabo.} \end{array} \right. \quad (30)$$

A temperatura do condutor será distinta da temperatura associada à corrente máxima admissível. Desta forma, a norma assume uma temperatura média, através da aplicação da equação 31.

$$\theta_m = \frac{\theta - \theta_a}{3} + \theta_a \text{ (°C)} \quad \left| \begin{array}{l} \theta - \text{Temperatura correspondente a } I_z; \\ \theta_a - \text{Temperatura ambiente;} \\ 3 - \text{Fator empírico.} \end{array} \right. \quad (31)$$

O número de horas de utilização das perdas foi estimado por meio da aplicação da equação 32, num período de 1 ano (8760 horas).

$$T = \mu \times 8760$$

$$\mu = p \times f_c + (1 - p) \times f_c^2$$

μ – Fator de carga das perdas;

p – Coeficiente que assume o valor de 0,3 para redes de transporte e 0,2 para redes de distribuição;

f_c – Fator de carga.

(32)

De forma a conseguir efetuar a soma dos dois parâmetros é necessário exprimir os valores à mesma época. Assim, os custos futuros das perdas de energia são convertidos em valores atualizados à data presente da instalação do cabo, através do processo de amortização.

$$F = N_p \times N_c \times (T \times P) \times \frac{Q}{(1 + \frac{i}{100})^N}$$

$$Q = \frac{1 - r^N}{1 - r}$$

$$r = \frac{(1 + a)^2 \times (1 + b)}{1 + i}$$

N_p – Número de condutores sob idênticas condições;

N_c – Número de circuitos idênticos;

T – Número de horas de utilização das perdas;

P – Custo do Wh;

Q – Coeficiente que tem em conta o aumento da carga (a), o aumento do custo da energia elétrica (b) e a taxa de atualização (i);

N – Nº de anos de vida média da unidade industrial.

(33)

A secção económica é determinada de acordo com a equação 34.

$$S_{ec} = 1000 \times I_{max} \times \sqrt{\frac{F \times \rho_{20} \times B[1 + \alpha_{20}(\theta_m - 20)]}{A}} \text{ mm}^2$$

(34)

É pouco provável que a secção obtida pela equação 34, seja exatamente igual a uma secção nominal padronizada. Sendo assim, o custo deverá ser calculado para as secções nominais padronizadas adjacentes e escolhida a mais económica.

3.6.3 Estudo de Caso

No estudo de caso foram considerados dois circuitos de alimentação de cargas de processo, em que a secção dos condutores foi determinada com base em critérios técnicos de dimensionamento. A Tabela 14 e a Tabela 15 apresentam as principais características dos respetivos circuitos.

Tabela 14 – Características do circuito 1

Circuito	Comprimento	Potência	Corrente	Secção Técnica
MCC-006-1 – Carga1	63 metros	105 kVA	151,6 A	$S_F = 70 \text{ mm}^2$ $S_N = 35 \text{ mm}^2$

Tabela 15 – Características do circuito 2

Circuito	Comprimento	Potência	Corrente	Secção Técnica
MCC-006-1 – Carga2	50 metros	70 kVA	101 A	$S_F = 50 \text{ mm}^2$ $S_N = 25 \text{ mm}^2$

O edifício em análise apresenta inúmeros processos contínuos, assegurando a utilização constante da capacidade instalada, o que contribui para uma excelente eficiência operacional. Considerando os processos e o funcionamento da indústria, assumiu-se um fator de carga de 0,8.

A partir do fator de carga pode ser obtido o número de horas de utilização das perdas através da aplicação da equação 32.

$$\mu = 0,2 \times 0,8 + (1 - 0,2) \times 0,8^2 = 0,672$$

$$T = 0,672 \times 8760 = 5886,7 \text{ h}$$

Após a obtenção do número de horas de utilização das perdas, foi realizado um levantamento dos dados presentes na Tabela 16, de acordo com a informação dos circuitos e do mercado.

Tabela 16 – Dados iniciais

Parâmetros	Variável	Valor
Número de condutores sob idênticas condições	N_P	3
Número de circuitos idênticos	N_C	1
Aumento anual da carga	a	1,20%
Aumento anual do custo de energia	B	4%
Taxa de atualização	i	6%
Custo do kWh	P	0,1556
Número de anos de vida média da unidade industrial.	N	20

A partir da equação 33 e utilizando os dados da Tabela 16, é possível determinar os seguintes parâmetros, que são idênticos para ambos os circuitos.

$$r = \frac{\left(1 + \frac{1,20}{100}\right)^2 \times \left(1 + \frac{4}{100}\right)}{1 + \frac{6}{100}} = 1,0048$$

$$Q = \frac{1 - 1,0048^{20}}{1 - 1,0048} = 20,943$$

$$F = 3 \times 1 \times \left(5886,7 \times \frac{0,1556}{1000}\right) \times \frac{20,943}{\left(1 + \frac{6}{100}\right)} = 54,29$$

Segundo as RTIEBT, a temperatura máxima da alma condutora para condutores isolados a polietileno reticulado (XLPE) é de 90 °C, para uma temperatura ambiente de 30 °C. Assim, para a determinação da temperatura média utilizou-se a equação 31.

$$\theta_m = \frac{90 - 30}{3} + 30 = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Deste modo, é possível obter o valor da resistência, através da aplicação da equação 30, considerando desprezável os efeitos pelicular e de proximidade (y_s e y_p) e as perdas em ecrãs metálicos e armaduras (λ_1 e λ_2).

$$\begin{aligned} \text{Circuito 1} - R(70) &= \frac{= 17,24 \times 10^{-9} \times 1 \times [1 + 0,00393(50 - 20)]}{70} \times 10^6 \\ &= 2,75 \times 10^{-4} \text{ } \Omega/\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Circuito 2} - R(50) &= \frac{= 17,24 \times 10^{-9} \times 1 \times [1 + 0,00393(50 - 20)]}{50} \times 10^6 \\ &= 3,85 \times 10^{-4} \text{ } \Omega/\text{m} \end{aligned}$$

Com base na mesma equação, foi obtido o valor da resistência para cada secção, como ilustrado na Tabela 17. As secções consideradas foram maiores que 50 mm², pois a secção económica será superior à solução técnica obtida.

Tabela 17 – Resistência para cada secção de condutor

Secção (mm ²)	Resistência (Ω/m)
50	$3,85 \times 10^{-4}$
70	$2,75 \times 10^{-4}$
95	$2,03 \times 10^{-4}$
120	$1,61 \times 10^{-4}$
150	$1,28 \times 10^{-4}$
185	$1,04 \times 10^{-4}$
240	$8,03 \times 10^{-5}$
300	$6,42 \times 10^{-5}$

Neste momento, é possível obter o valor do custo de exploração, com recurso à equação 29.

$$\text{Circuito 1} - CE(70) = 151,6^2 \times 2,75 \times 10^{-4} \times 63 \times 54,29 = 21616,8 \text{ } \text{€}$$

Tabela 18 – Custo de exploração para cada secção de condutor no circuito 1

Secção (mm ²)	CE (€)
70	21616,8
95	15957,13

120	12655,66
150	10061,64
185	8175,08
240	6312,1
300	5046,54

Circuito 2 – $CE(50) = 101^2 \times 3,85 \times 10^{-4} \times 50 \times 54,29 = 10660,89 \text{ €}$

Tabela 19 – Custo de exploração para cada secção de condutor no circuito 2

Secção (mm^2)	CE (€)
50	10660,89
70	7614,9
95	5621,19
120	4458,2
150	3544,4
185	2879,8
240	2223,56
300	1777,74

Uma vez determinado o custo de exploração, procede-se ao cálculo do custo do investimento. Para tal, é necessário determinar a variável A, cujo cálculo encontra-se detalhado na Tabela 20. Para a realização do cálculo foi crucial realizar uma análise dos preços de mercado, incluindo o custo do próprio cabo, acessórios e mão de obra. A norma recomenda a realização da média dos valores de A para a determinação da secção económica.

Tabela 20 – Cálculo da variável A

Secção (mm^2)	Custo Inicial Cabo (€/m)	Custo Inicial Instalação do cabo (€/m)	Custo Inicial Total (€/m)	A (€/m. mm^2)
50	9,9	3,7	13,6	-
70	14,1	5,1	19,2	$(19,2 - 13,6) / (70 - 50) = 0,28$
95	22,1	5,4	27,6	$(27,6 - 19,2) / (95 - 70) = 0,33$
120	31,2	6,8	38,0	$(38 - 27,6) / (120 - 95) = 0,42$
150	38,7	7,2	45,9	$(45,9 - 38) / (150 - 120) = 0,26$
185	49,1	8,4	57,5	$(57,5 - 45,9) / (185 - 150) = 0,33$
240	62,2	9,7	71,9	$(71,9 - 57,5) / (240 - 185) = 0,26$
300	74	14,1	88,1	$(88,1 - 71,9) / (300 - 240) = 0,27$
Média				0,31

Assim, encontram-se reunidas todas as condições para obter o custo total para cada um dos circuitos, como ilustrado na Tabela 21 e Tabela 22. De realçar que, para o custo inicial do cabo

e da instalação do mesmo, será necessário multiplicar os valores presentes na Tabela 20 pelo comprimento do circuito.

Tabela 21 – Custo total para cada secção de condutor ao fim de 20 anos no circuito 1

Secção (mm ²)	Custo Inicial Cabo (€)	Custo Inicial Instalação (€)	Custo Inicial Total (€)	Custo de Exploração (€)	Custo Total (€)
70	888,3	321,3	1209,6	21616,8	22826,4
95	1392,3	340,2	1732,5	15957,13	17689,63
120	1965,6	428,4	2394	12655,66	15049,66
150	2438,1	453,6	2894,4	10061,64	12956,04
185	3093,3	529,2	3622,5	8175,08	11797,58
240	3918,6	611,1	4529,7	6312,1	10841,8
300	4662	888,3	5550,3	5046,54	10596,84

Tabela 22 – Custo total para cada secção de condutor ao fim de 20 anos no circuito 2

Secção (mm ²)	Custo Inicial Cabo (€)	Custo Inicial Instalação (€)	Custo Inicial Total (€)	Custo de Exploração (€)	Custo Total (€)
50	495	185	680	10660,89	11340,89
70	705	255	960	7614,9	8574,9
95	1105	270	1375	5621,19	6996,19
120	1560	340	1900	4458,2	6358,2
150	1935	360	2295	3544,4	5839,4
185	2455	420	2875	2879,8	5754,8
240	3110	485	3595	2223,56	5818,56
300	3700	705	4405	1777,74	6182,74

O próximo passo envolve a obtenção da secção económica para os dois circuitos, através da aplicação da equação 34.

Circuito 1

$$S_{ec} = 1000 \times 151,6 \times \sqrt{\frac{54,29 \times 17,24 \times 10^{-9} \times 1[1 + 0,00393(50 - 20)]}{0,31}}$$

$$S_{ec} = 279,62 \text{ mm}^2$$

Circuito 2

$$S_{ec} = 1000 \times 101 \times \sqrt{\frac{54,29 \times 17,24 \times 10^{-9} \times 1[1 + 0,00393(50 - 20)]}{0,31}}$$

$$S_{ec} = 186,29 \text{ mm}^2$$

De forma a confirmar os valores obtidos foram realizados dois gráficos, para ambos os circuitos, semelhantes à Figura 53, que ajudam na interpretação dos resultados obtidos e identificação da secção económica.

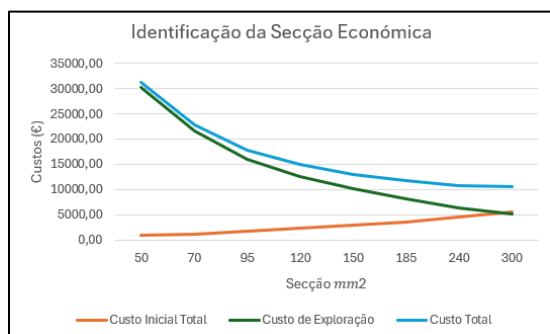


Figura 54 – Secção económica para o circuito 1

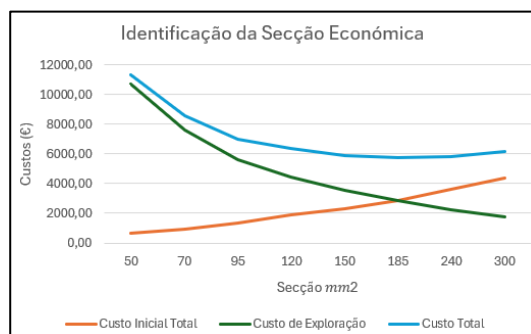


Figura 55 – Secção económica para o circuito 2

As secções económicas obtidas para ambos os circuitos não são padronizadas. No entanto, relativamente ao circuito 2, por observação do gráfico e pelo cálculo realizado, não há dúvidas que a secção económica é de 185 mm^2 . Para o circuito 1, devido à proximidade dos valores e à possibilidade de interpretação incorreta do gráfico, é aconselhável consultar a Tabela 21 para determinar a secção com menor custo total. Deste modo, conclui-se que 300 mm^2 é a secção económica para o circuito 1.

Com o objetivo de garantir a viabilidade económica do investimento, é fundamental assegurar que o tempo de recuperação do investimento ocorre dentro da vida útil da unidade industrial.

- Diferença entre o custo inicial total da secção técnica e económica

Circuito 1: $5550,30 - 1209,6 = 4340,7 \text{ €}$

Circuito 2: $2875 - 680 = 2195 \text{ €}$

- Diferença entre o custo de exploração da secção técnica e económica

Circuito 1: $21616,8 - 5046,54 = 16570,26 \text{ € em 20 anos} = 828,51 \text{ € por ano}$

Circuito 2: $10660,89 - 2879,8 = 7781,09 \text{ € em 20 anos} = 389,05 \text{ € por ano}$

- Tempo de recuperação do investimento

Circuito 1: $4340,7/828,51 \approx 5,24 \text{ anos}$

Circuito 2: $2195/389,05 \approx 5,64 \text{ anos}$

Com a intenção de conferir a veracidade dos cálculos efetuados foi realizado um gráfico para cada circuito, com a representação do custo total da secção económica e técnica, em cada ano.

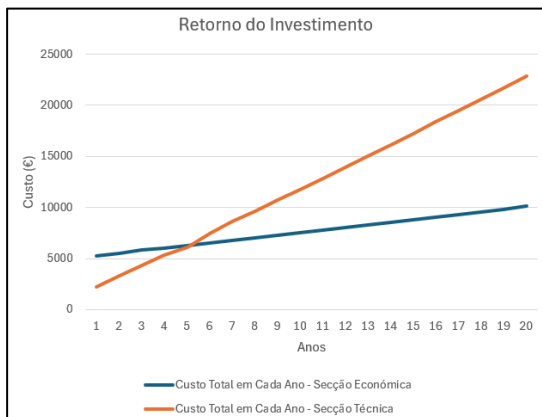


Figura 56 – Retorno do investimento para o circuito 1

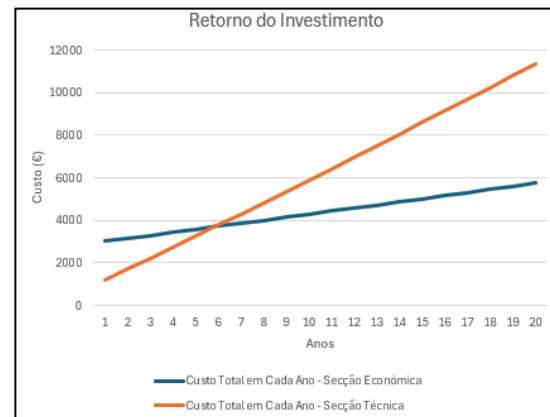


Figura 57 – Retorno do investimento para o circuito 2

A partir do momento em que a curva da secção técnica interceta a curva da secção económica, o investimento efetuado para a secção superior é recuperado, no qual os circuitos apresentaram um tempo de retorno do investimento de aproximadamente 6 anos. Considerando uma vida útil estimada de 20 anos para a unidade industrial, a utilização de um cabo dimensionado para a secção económica, apesar do custo inicial elevado, proporciona 14 anos de poupança, configurando-se como uma vantagem significativa do ponto de vista financeiro.

3.7 Alimentação de Socorro

3.7.1 Enquadramento

No edifício M2 será instalado um gerador de emergência, com o objetivo de garantir o funcionamento dos sistemas de controlo de fumo em caso de falha de energia.

Estes sistemas permitem que, em caso de incêndio, os fumos e gases tóxicos sejam direcionados para o exterior, desimpedindo os caminhos de evacuação e facilitando a saída das pessoas do interior da indústria, além de proporcionar condições mais favoráveis para o combate ao incêndio pelos bombeiros.

3.7.2 Distribuição de Energia

A alimentação dos equipamentos de emergência será realizada por dois circuitos distintos: um proveniente da rede elétrica convencional e outro de um grupo gerador.

Na eventualidade de uma falha na rede elétrica, o grupo gerador assume a função de manter os equipamentos de emergência em operação até o restabelecimento da fonte principal de energia.

A Figura 58 apresenta o diagrama de alimentação dos quadros de emergência, quadros estes que serão responsáveis pela alimentação dos equipamentos de emergência.

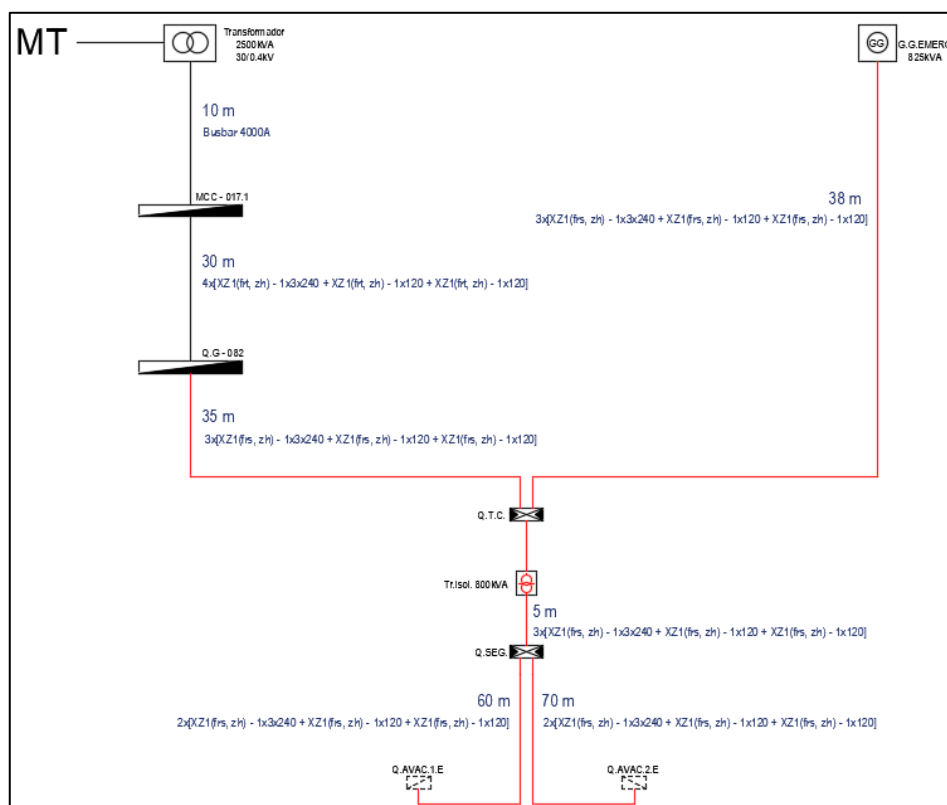


Figura 58 – Diagrama de alimentação dos quadros de emergência

O quadro de transferência de cargas será responsável pela alternância entre a alimentação da rede elétrica e a alimentação do grupo gerador, utilizando um inversor de rede. O inversor de rede é constituído por dois aparelhos de corte e manobra, com comando elétrico de abertura e fecho, encravados entre si, elétrica e mecanicamente, com o objetivo de efetuar a transferência da alimentação dos equipamentos de emergência da rede elétrica para o grupo gerador, ou vice-versa.

Com o objetivo de reforçar a fiabilidade da rede de emergência, será adotada a configuração de ligação à terra IT. Para esta solução, é essencial a instalação de um transformador de isolamento, o qual garante isolamento galvânico entre o circuito primário e o circuito secundário, evitando a criação de um circuito de defeito, diminuição das perturbações da rede, proteção contra picos de energia e flutuações de tensão, reduzindo o risco de falhas.

O neutro do transformador será ligado à terra através de uma impedância de 1500 Ω, com o objetivo de diminuir a corrente de defeito, complementada por um sistema de controlo permanente de isolamento, conforme representado na Figura 59.

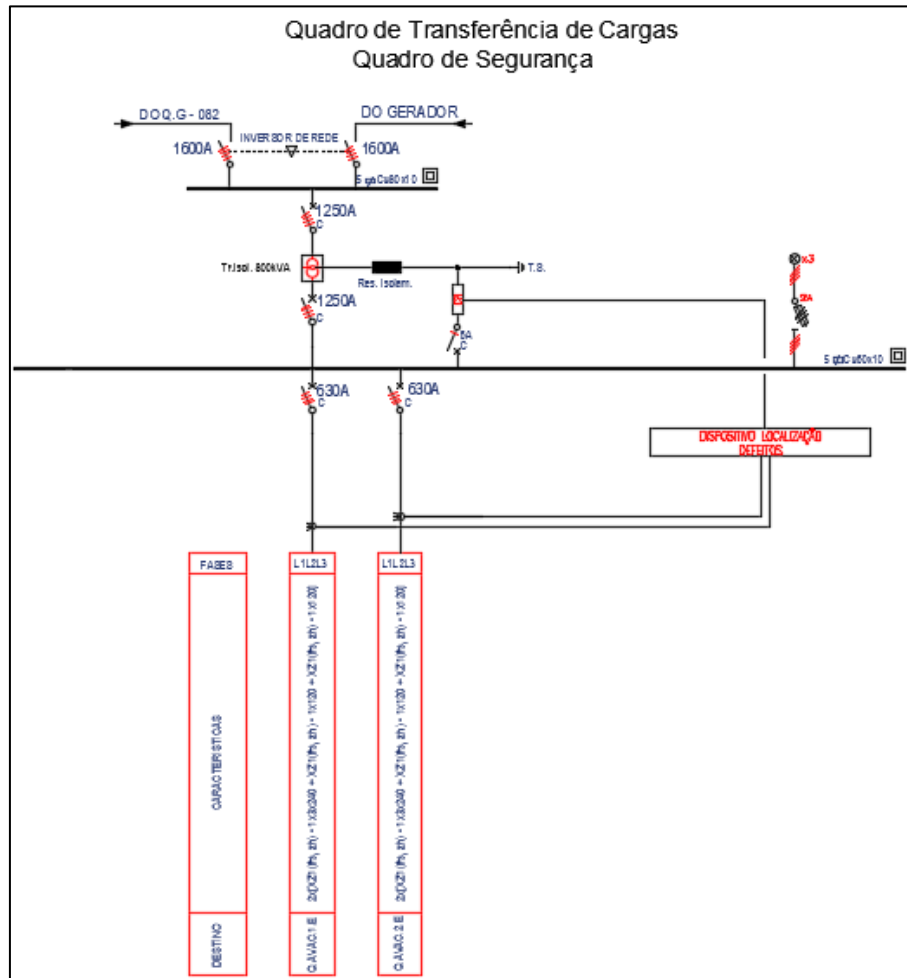


Figura 59 – Esquema unifilar do quadro de transferência de cargas e do quadro de segurança

3.7.3 Sala Técnica do Grupo Gerador

O grupo gerador será instalado no interior de uma sala, dispensando proteção integrada contra as condições climáticas, classificando-o como grupo não canopiado.

Descreve-se em seguida os principais elementos considerados para a instalação do grupo gerador em sala técnica:

- Dimensão suficiente para a instalação de todos os equipamentos e um espaço livre em volta do grupo gerador de aproximadamente 1 metro, para a realização da manutenção sem obstáculos;

- O gerador produz energia vibratória, podendo ser transmitidas à laje a partir do chassis. Para garantir a estabilidade e operação segura do gerador, a laje deve ser suficientemente resistente para suportar o peso dos equipamentos e manter-se perfeitamente nivelada;
- Arrefecimento do equipamento e ventilação da sala técnica;
- Sistema de escape de gases de combustão;
- Abastecimento do combustível, considerando que em edifícios de altura não superior a 28 metros, a quantidade máxima de combustível da 1ª categoria (gasolina e GPL) e da 2ª categoria (petróleo) não deve ser superior a 15 litros se a alimentação for feita por gravidade e 50 litros se a alimentação for realizada por bombagem. Para combustíveis de 3ª categoria (gasóleo), a quantidade de combustível deve ser limitada a 500 litros.

A sala técnica tem um quadro destinado à alimentação desse espaço, principalmente para as tomadas de uso gerais, iluminação normal e de segurança.

3.7.3.1 Potência do grupo gerador

O edifício M2 possui dois quadros destinados à alimentação dos equipamentos responsáveis pelo controlo de fumo, cada um com potência de 353 kVA, resultando numa potência total de 706 kVA. O valor de 353 kVA foi obtido a partir de uma estimativa com base em dados fornecidos pelo dono de obra.

Considerando este valor, optou-se por um transformador de isolamento 400/400 V com capacidade de 800 kVA, superior à potência total dos equipamentos.

O gerador de emergência terá uma potência de 825 kVA (ESP – *Standby Power*), em que o número de horas de funcionamento do grupo gerador não deve ultrapassar as 200 h/ano.

3.7.4 Dimensionamento e Cálculos

O dimensionamento foi realizado para os dois circuitos de alimentação dos quadros de emergência.

Primeiramente, foi definido o modo de instalação das canalizações, tendo-se optado pela utilização de cabos monocondutores isolados a polietileno reticulado (XLPE), em caminhos de cabos perfurados, solução que exige o uso do quadro 52-C12 das RTIEBT para a realização do dimensionamento.

A escolha dos cabos monocondutores justifica-se pelas secções elevadas existentes no circuito, facilitando a sua instalação. Para simplificar e agilizar ainda mais a execução, evitou-se a utilização de secções superiores a 240 mm², optando pela aplicação de circuitos em paralelo com uma secção mais baixa.

Os caminhos de cabos perfurados oferecem inúmeras vantagens nas instalações industriais, devido às frequentes modificações e à presença de circuitos com secção elevada. Comparados

aos restantes modos de instalação, os caminhos de cabos perfurados proporcionam uma ventilação e dissipação do calor eficiente pelos orifícios, prolongando a vida útil dos cabos. Além disso, o fácil acesso aos cabos, contribui para a simplicidade da instalação e da manutenção, permitindo inspeções e correções rápidas e eficientes.

Conforme as RTIEBT, a alimentação dos equipamentos de emergência deve ser realizada por cabos resistentes ao fogo, devido à sua capacidade de preservar a funcionalidade do circuito em caso de incêndio. Relativamente à alimentação normal, foram utilizados cabos retardantes ao fogo, projetados para resistir ao fogo e reduzir a propagação das chamas. Em ambas as situações, optou-se por cabos livres de halogéneos, priorizando a baixa emissão de gases tóxicos e corrosivos em caso de incêndio.

Na ligação entre o transformador e o MCC, optou-se pela utilização da canalização pré-fabricada, em virtude da elevada potência e do comprimento reduzido do circuito. O dimensionamento deste tipo de canalização exigiu a consulta das especificações técnicas do fornecedor, permitindo obter os valores de quedas de tensão, resistência de fase e impedância total a utilizar no curto-circuito mínimo e máximo.

O dimensionamento rigoroso dos circuitos exigiu a garantia e o cumprimento das seguintes condições:

i. Aquecimento

$$I_b \leq I_n \leq I_z \quad | \quad (35)$$

ii. Sobrecarga

$$I_2 \leq 1,45I_z \quad | \quad (36)$$

iii. Queda de tensão

A queda de tensão entre a origem da instalação e qualquer ponto de utilização, expressa em função da tensão nominal da instalação, não deve ser superior aos valores indicados na Tabela 23.

Tabela 23 – Quedas de tensão máximas admissíveis

Utilização	Iluminação	Outros usos
A – Instalações alimentadas diretamente a partir de uma rede de distribuição (pública) em baixa tensão	3 %	5 %
B – Instalações alimentadas diretamente a partir de um Posto de Transformação de Média/Baixa Tensão	6 %	8 %

Para a instalação em estudo, as quedas de tensão não devem exceder o proposto na situação B. No entanto, de acordo com a nota presente nas RTIEBT, o dimensionamento foi realizado com o objetivo de manter as quedas de tensão nos circuitos finais abaixo dos limites estabelecidos para a situação A.

As quedas de tensão devem ser determinadas em conformidade com a secção 525 das RTIEBT, através da equação 37.

$$u = b \times \left(p \times L \times \frac{\cos \varphi}{S} + \lambda \times L \times \sin \varphi \right) \times I_b \quad (37)$$

$$\Delta u = 100 \times \frac{u}{U_0}$$

iv. Curto-Circuito

No dimensionamento das canalizações de uma instalação elétrica devem ser determinados os valores das correntes de curto-circuito máximo e mínimo nos diversos pontos da rede. Estes valores dependem, não só das características das canalizações, como também são condicionados pela potência de curto-circuito no ponto de interligação da instalação com a rede de distribuição.

Os dispositivos de proteção a adotar na instalação devem interromper as correntes de curto-circuito antes que estas se tornem perigosas em virtude dos efeitos térmicos e mecânicos que se produzem nos condutores e nas ligações. A verificação da proteção contra as correntes de curto-circuito envolve dois fatores importantes:

- Poder de corte adequado do aparelho de proteção

Determinado pela corrente de curto-circuito máxima: o poder de corte não deve ser inferior à corrente de curto-circuito máxima no ponto em que o dispositivo for instalado.

Para o dimensionamento da rede elétrica considerou-se o valor da impedância a montante do transformador, obtido a partir da potência de curto-circuito, fornecida pela E-Redes, para a tensão nominal de 30 kV. Além disso, foi considerada a potência do transformador e a tensão de curto-circuito correspondente, o comprimento e a secção do circuito em estudo.

Relativamente à alimentação de emergência, o gerador apresenta correntes de curto-circuito consideravelmente menores em virtude da sua elevada impedância interna. A impedância do gerador é calculada com base na reatância sub-transitória, valor este que é fornecido pelo fabricante.

Considerando que a rede elétrica apresenta valores superiores de corrente, será esta fonte de energia a impor o valor da corrente de curto-circuito máximo.

$$I_{CC_{max}} = \frac{C \times m \times U_0}{Z} \quad (38)$$

C – Fator de tensão ($C_{max} = 1,05$);
 m – Fator de carga = 1,05;
 U_0 – Tensão nominal da instalação entre fase e neutro (V);
 Z – Impedância da malha de defeito (Ω).

$$Z_g = \frac{X_d}{100} \times \frac{U_n^2}{Sr_g} \quad \left| \begin{array}{l} X_d - \text{Reatância sub-transitória;} \\ U_n - \text{Tensão composta (V);} \\ Sr_g - \text{Potência estipulada do gerador (kVA).} \end{array} \right. \quad (39)$$

- Garantia de que o corte da alimentação é realizado antes da deterioração, por efeitos térmicos, da canalização

Determinado pela corrente de curto-circuito mínima: o tempo de corte da corrente resultante de um curto-circuito que ocorre num ponto do circuito deve ser inferior ao tempo necessário para elevar a temperatura dos condutores até ao seu limite admissível. Desta forma, a seguinte equação deve ser validada.

$$\text{Tempo de atuação das proteções} \leq \text{Tempo de fadiga Térmica} \quad (40)$$

Para determinar a corrente de curto-circuito mínima, é necessário avaliar a situação mais desfavorável entre os dois circuitos de alimentação aos equipamentos de emergência, identificando o percurso com uma corrente de curto-circuito menor. Como o gerador de emergência possui uma impedância mais elevada, o cálculo da corrente de curto-circuito mínima deverá ser realizado para esta fonte de energia.

Após a determinação da corrente de curto-circuito mínima é possível determinar o tempo de fadiga térmica através da seguinte equação.

$$T_{ft} = (k \times \frac{S_{neutro}}{I_{CC_{min}}})^2 \quad (41)$$

O valor da constante k depende do tipo de condutor e do respetivo isolamento, podendo ser consultado na Parte 4/Secção 43 das RTIEBT.

Sabendo o $I_{CC_{min}}$ e a corrente estipulada do dispositivo de proteção (I_n), é possível determinar o tempo de atuação da proteção tendo em conta a curva característica de funcionamento do dispositivo de proteção.

v. Comprimento máximo

O dispositivo de proteção garante a segurança da canalização, desde que o comprimento do circuito seja inferior ao comprimento máximo determinado pela equação 42.

$$l_{máx} \leq \frac{k \times U_0 \times S_f}{\rho \times (1 + m) \times I_d} \quad (42)$$

3.7.4.1 Resultados

Para apoio à realização do dimensionamento foi utilizada uma ferramenta informática interna da empresa, que permitiu obter os resultados presentes na Figura 60.

Origem	Destino	Potência Aparente (kVA)	Comprimento (m)	Canalização	In (A)	L. Máx (m)	Cumpre
Gerador	Transformador de Isolamento/QTC	825	38	3x[XZ1(frs, zh) - 1x3x240 + XZ1(frs, zh) - 1x120 + XZ1(frs, zh) - 1x120]	1250	67,5665	Sim
Transformador de Isolamento/QTC	Q. SEG 052	825	5	3x[XZ1(frs, zh) - 1x3x240 + XZ1(frs, zh) - 1x120 + XZ1(frs, zh) - 1x120]	1250	67,5665	Sim
Q. SEG 052 (E)	HVAC.1 (E)	353	60	2x[XZ1(frs, zh) - 1x3x240 + XZ1(frs, zh) - 1x120 + XZ1(frs, zh) - 1x120]	630	125,123	Sim
Q. SEG 052 (E)	HVAC.2 (E)	353	70	2x[XZ1(frs, zh) - 1x3x240 + XZ1(frs, zh) - 1x120 + XZ1(frs, zh) - 1x120]	630	125,123	Sim
Transformador - 017.1	MCC - 017.1	2500	10	Canalização Pré-Fabricada 4000A	4000		
MCC - 017.1	Quadro Geral - 082	1100	30	4x[XZ1(frt, zh) - 1x3x240 + XZ1(frt, zh) - 1x120 + XZ1(frt, zh) - 1x120]	1600	54,7414	Sim
Quadro Geral - 082	Transformador de Isolamento/QTC	800	35	3x[XZ1(frs, zh) - 1x3x240 + XZ1(frs, zh) - 1x120 + XZ1(frs, zh) - 1x120]	1250	67,5665	Sim
Transformador de Isolamento/QTC	Q. SEG 052	800	5	3x[XZ1(frs, zh) - 1x3x240 + XZ1(frs, zh) - 1x120 + XZ1(frs, zh) - 1x120]	1250	67,5665	Sim
Q. SEG 052	HVAC.1	353	60	2x[XZ1(frs, zh) - 1x3x240 + XZ1(frs, zh) - 1x120 + XZ1(frs, zh) - 1x120]	630	125,12	Sim
Q. SEG 052	HVAC.2	353	70	2x[XZ1(frs, zh) - 1x3x240 + XZ1(frs, zh) - 1x120 + XZ1(frs, zh) - 1x120]	630	125,12	Sim

Figura 60 - Resultados do dimensionamento

O dimensionamento foi realizado para os dois circuitos de alimentação dos equipamentos de emergência, no qual é possível verificar, através da Figura 60, o comprimento dos seguintes parâmetros:

- A utilização de circuitos em paralelo, evitando a aplicação de secções superiores a 240 mm²;
- O uso de cabos resistentes ao fogo na alimentação dos equipamentos de emergência (frs) e de cabos retardantes ao fogo na alimentação normal (frt), bem como a utilização de cabos livres de halogéneos (zh), nas duas situações;
- O comprimento máximo protegido pelo dispositivo de proteção é superior ao comprimento do circuito, garantindo a fiabilidade da proteção.

3.7.5 Cálculo das Necessidades de Ventilação

A sala onde será instalado o grupo gerador precisa de ventilação para remover o calor dissipado pelo motor e outros equipamentos constituintes do grupo, arrefecimento do radiador e conduzir o ar fresco até ao motor.

Para os cálculos efetuados, foi considerado o valor do fluxo do ventilador (1020 m³/min) e do fluxo do ar de combustão (45 m³/min), com base nas especificações técnicas do gerador fornecidas pelo fabricante.

i. Cálculo da área de admissão de ar

- Área livre de admissão de ar

A área livre é a diferença entre a área total e a área de todos os elementos que impossibilitam a ventilação, sendo obtida através da seguinte equação.

$$A_{le} = \frac{Q_e}{v_e \times 60}$$

$$A_{le} = \frac{1020 + 45}{4 \times 60} = 4,4375 \text{ m}^2$$

A_{le} – Área livre de entrada de ar (m²);
 Q_e – Caudal de ar necessário para o grupo gerador (refrigeração e combustão) (m³/min);
 v_e – Velocidade de entrada de ar (m/s) – Não foi considerada uma velocidade natural de 2 m/s devido à existência de um elemento mecânico.
Contudo, a ventilação não pode ser considerada

(43)

mecânica (10 m/s), uma vez que o ventilador está associado ao radiador que impõe uma perda de velocidade.

- Área total de admissão de ar

A equação 44 é utilizada para determinar a área total de admissão de ar, considerando um fator de retenção do ar de 0,645.

$$A_{Te} = \frac{A_{Le}}{f} = \frac{4,4375}{0,645} \approx 6,88 \text{ m}^2 \quad \left| \begin{array}{l} A_{Te} - \text{Área total de entrada de ar (m}^2\text{);} \\ f - \text{Fator de retenção do ar.} \end{array} \right. \quad (44)$$

ii. Cálculo da área de extração de ar

- Área livre de extração de ar

Para o cálculo da área livre de extração de ar deve ser seguida a seguinte equação.

$$A_{LS} = \frac{Q_S}{v_S \times 60} \quad \left| \begin{array}{l} A_{LS} - \text{Área livre de saída de ar (m}^2\text{);} \\ Q_S - \text{Fluxo de descarga do ventilador acoplado ao} \\ \text{motor (m}^3\text{/min);} \\ v_S - \text{Velocidade de saída de ar (m/s).} \end{array} \right. \quad (45)$$

$$A_{Le} = \frac{1020}{4 \times 60} = 4,25 \text{ m}^2$$

- Área total de extração de ar

A área total de extração de ar é calculada através do mesmo método utilizado para a obtenção da área total de admissão de ar, como evidenciado na equação 46.

$$A_{TS} = \frac{A_{LS}}{f} = \frac{4,25}{0,645} \approx 6,59 \text{ m}^2 \quad \left| \begin{array}{l} A_{TS} - \text{Área total de saída de ar;} \\ f - \text{Fator de retenção do ar.} \end{array} \right. \quad (46)$$

De acordo com os resultados obtidos, a escolha das grelhas recaiu no cumprimento dos mesmos. Deste modo, para a admissão do ar fresco a área mínima das grelhas é de 6,88 m², enquanto para a extração do ar quente a área mínima das grelhas é de 6,59 m². As grelhas de admissão e extração de ar, devem ser posicionadas em paredes opostas permitindo a circulação eficiente do ar por todo o grupo gerador, facilitando o seu arrefecimento.

3.7.6 Extração dos Gases de Escape

Os gases gerados pela combustão devem ser evacuados diretamente para o exterior, evitando que se expandam para áreas acessíveis ao público e para os caminhos de evacuação.

A evacuação dos gases de escape é realizada para o exterior do edifício através de condutas estanques, construídas com materiais incombustíveis, classificados como A1 na reação ao fogo [21].

A descarga dos gases para a atmosfera é efetuada a partir de uma chaminé de altura adequada para permitir uma boa dispersão dos poluentes, sem colocar em risco o ambiente e a saúde das pessoas. As aberturas exteriores das condutas devem ser instaladas [22]:

- A uma altura mínima de 0,5 metros acima da cobertura do edifício;
- A uma distância, medida na horizontal, em que qualquer obstáculo que lhes seja mais elevado não seja inferior à diferença de alturas, com um máximo permitido de 10 metros;
- De forma que o acesso seja garantido para limpeza, manutenção ou intervenção em caso de incêndio.

3.8 Redes de Terra

3.8.1 Enquadramento

As redes de terra desempenham um papel crucial na proteção de pessoas e equipamentos, razão pela qual é exigido um dimensionamento e execução com a máxima precisão e cuidado.

Ao nível da instalação elétrica, a validação do projeto de ligação à terra, tem como objetivo garantir, tanto em funcionamento normal como na presença de defeitos, os seguintes requisitos:

- Assegurar que as pessoas que se encontrem nas proximidades das instalações não fiquem expostas ao perigo de serem eletrocutadas;
- Fornecer meios para conduzir correntes elétricas para a terra em condições normais ou em situações de defeito, sem exceder os limites de funcionamento do equipamento ou afetar a continuidade de serviço;
- Fornecer uma referência de ligação à terra para a instalação.

Para o dimensionamento da rede de terras, recorreu-se à ferramenta computacional *ELEK SafeGrid Earthing*. O software adota algoritmos baseados em métodos de elementos finitos, permitindo uma análise mais pormenorizada e rigorosa, principalmente, na determinação da resistência do sistema de terra e na verificação das tensões de contacto e de passo, a fim de garantir que estas tensões são inferiores aos valores máximos tolerados pelo corpo humano.

A validação da rede de terras foi realizada com base na metodologia de cálculo descrita na norma IEEE 80-2013 (“IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”) [23] e detalhada na Figura 61.

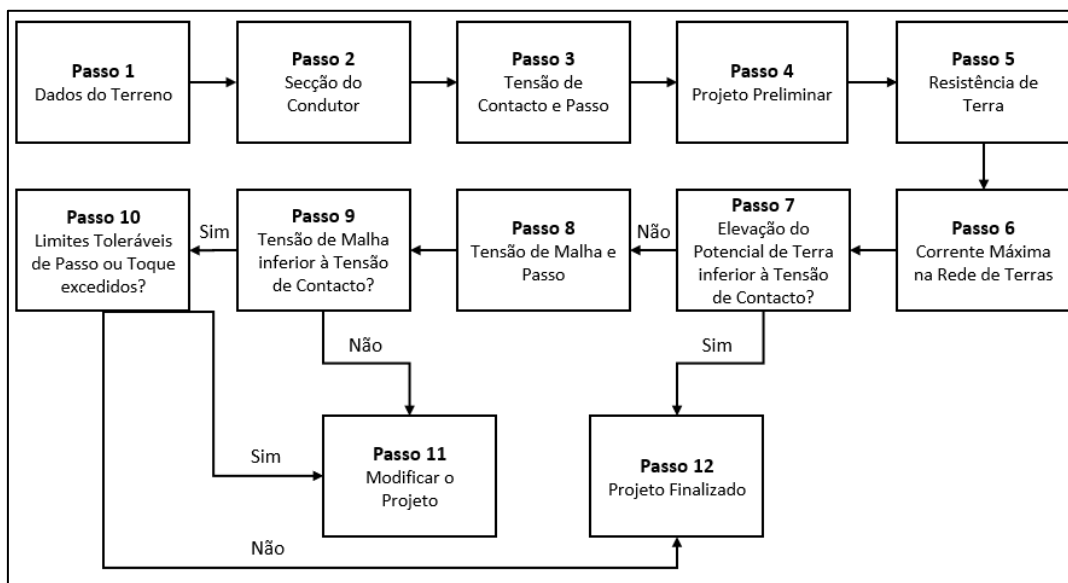


Figura 61 – Diagrama da metodologia de dimensionamento da rede de terras

3.8.2 Dados do Terreno

O estudo geotécnico ao local de implantação da instalação é essencial para determinar a composição e o grau de homogeneidade do solo. Esta etapa é essencial para a obtenção dos valores de resistividade, que variam horizontal e verticalmente, e que são fundamentais para o cálculo da resistência de terra, das tensões de passo e de contacto da instalação.

Os ensaios em pontos estratégicos do terreno, utilizando, normalmente, o método de Wenner, fornecem informações valiosas sobre a presença de diferentes camadas e o tipo de solo em cada uma. Com base nessas informações, o *Safegrid* constrói um modelo preciso de solo, com indicação do erro quadrático médio associado ao número de camadas.

De uma forma geral, os modelos de solo mais comuns são o modelo de solo uniforme e o modelo de duas camadas. O modelo uniforme de solo deve ser usado apenas quando existe uma variação moderada de resistividade, sendo suficientemente preciso para solos com distribuição homogénea, o que raramente acontece. Por outro lado, o modelo de duas camadas constitui frequentemente uma boa aproximação para a maioria dos tipos de solo. Este modelo consiste numa camada superior com uma profundidade finita e numa camada inferior com profundidade infinita. Contudo, para solos de maior complexidade, o modelo de duas camadas é pouco eficiente, pelo que é necessário utilizar modelos de solo multicamadas.

De acordo com o relatório fornecido pela empresa responsável pelo estudo geotécnico, os valores de resistividade são apresentados na Tabela 24, em função da profundidade e do espaçamento entre os elétrodos auxiliares.

Tabela 24 – Resistividade do solo na zona de implantação da instalação industrial

Profundidade (m)	Espaçamento (m)	Resistividade ($\Omega.m$)
0,625	0,833	1827,93
1,938	2,584	1630,35
3,381	4,508	1124,94
4,969	6,625	747,67
6,716	8,955	510,60
8,638	11,52	407,19
10,752	14,34	334,35

A partir destes valores, O *Safegrid* apresentou o modelo de duas camadas como o modelo que oferece maior fiabilidade para o desenvolvimento do estudo da rede de terras, com um erro quadrático de apenas 1,25%.

A Figura 62 ilustra o modelo de solo adotado pelo *software*, indicando a resistividade de cada camada e o comprimento da primeira camada.

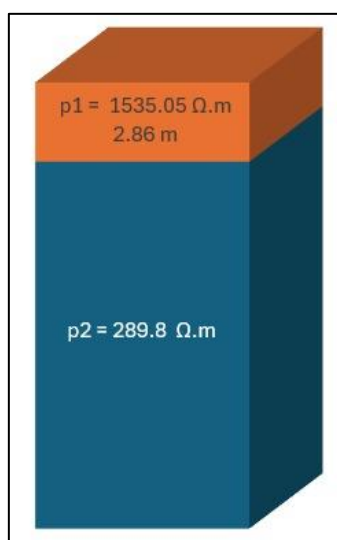


Figura 62 – Modelo de solo considerado para a área da instalação

A segunda camada tem uma resistividade abaixo dos valores ilustrados na Tabela 24, o que se justifica pela profundidade infinita desta camada. A Tabela 24 não apresenta valores da resistividade para além de uma profundidade de 10,752 m, não conseguindo capturar a resistividade decrescente além dessa profundidade. O valor estimado pelo software de 289,8 $\Omega.m$, representa a melhor aproximação possível com base nos dados disponíveis.

3.8.3 Cálculo da Corrente na Rede de Terras

Para garantir o correto dimensionamento da rede de terras, foi fundamental identificar o percurso da corrente de defeito desde a sala técnica até ao eletrodo de terras.

As salas técnicas dos edifícios possuem um barramento de terras perimetral que interliga o MCC às duas baixadas do edifício, que por sua vez conduzem a corrente de defeito para o solo, como ilustrado na Figura 63.

O barramento de terras perimetral, amplamente utilizado em ambientes industriais, principalmente em salas sujeitas a correntes de defeito elevadas, oferece um caminho de baixa resistência para as correntes, reduzindo significativamente o risco de choque elétrico para as pessoas e danos nos equipamentos.

A utilização das duas baixadas garante redundância e um elevado nível de fiabilidade, permitindo que a corrente seja dissipada para o solo por dois caminhos distintos.

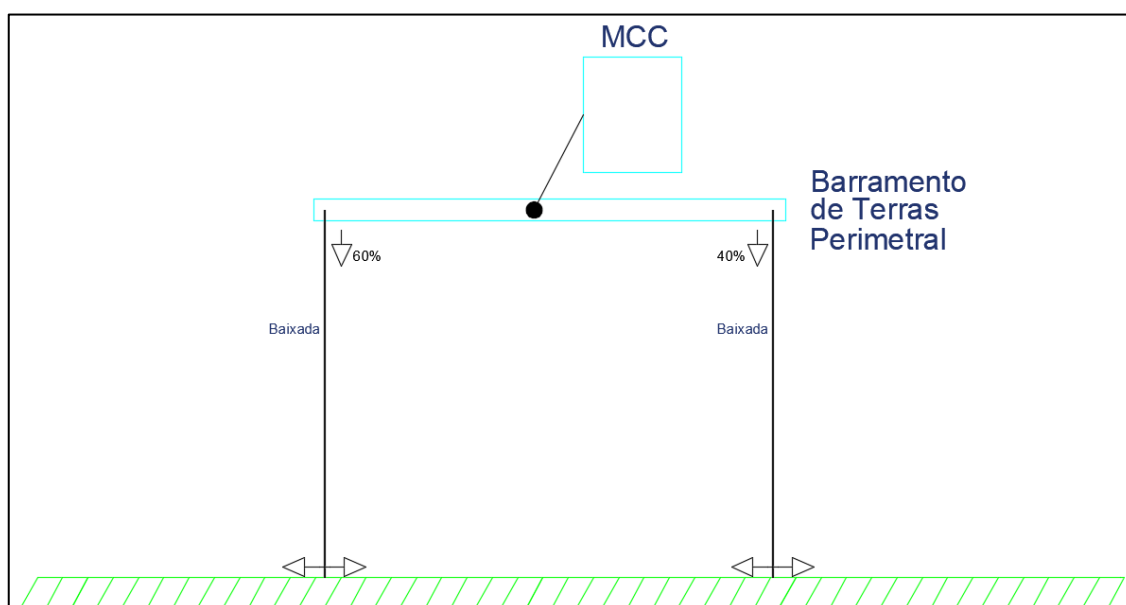


Figura 63 – Percurso da corrente de defeito até ao solo

O primeiro passo consistiu na determinação da corrente de curto-circuito de todos os edifícios, através do *software* ETAP, com o intuito de encontrar o valor mais elevado na instalação. A rede de distribuição em baixa tensão foi modelada no *software* e o estudo de curto-circuito realizado, obtendo um valor máximo de 34 kA.

A corrente máxima no barramento de terras perimetral é igual ao valor obtido pelo estudo do curto-circuito (34 kA).

Relativamente às baixadas considerou-se uma divisão da corrente de 60% para uma baixada e 40% para outra, culminando numa corrente máxima de 20,4 kA ($60\% \times 34 \text{ kA}$). Embora as duas baixadas apresentem as mesmas características, não se considerou uma divisão uniforme da corrente entre as baixadas de forma a prevenir excedentes de corrente que possam ocorrer.

Por último, para determinar com precisão a corrente máxima que percorre o eletrodo de terra, realizou-se uma simulação no *Software ELEK SafeGrid Earthing*, tendo obtido uma corrente de aproximadamente 18,5 kA, conforme ilustrado na Figura 64.

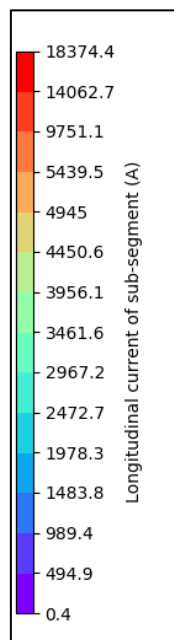


Figura 64 – Corrente máxima que percorre o eletrodo de terra

3.8.4 Secção dos Condutores

A rede de terras será constituída por cabo de cobre, aproveitando as suas vantagens relativamente à alta condutividade e resistência à corrosão, em comparação com outros metais.

A partir das características do cobre presente na Tabela 25 e com base no valor da corrente de defeito, foi determinada a secção mínima do barramento de terras, baixadas e do eletrodo de terra, através da utilização da equação 47, de acordo com a norma IEEE Std 80-2013.

$$S_{\min} = \frac{I_f}{\sqrt{\left(\frac{\text{TCAP} \times 10^{-4}}{t_f \times \alpha_r \times \rho_r}\right) \times \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad \left. \begin{array}{l} S_{\min} - \text{Secção mínima (mm}^2\text{);} \\ I_f - \text{Corrente de defeito (kA);} \\ t_f - \text{Tempo de extinção do defeito (s);} \\ T_a - \text{Temperatura ambiente (}^\circ\text{C).} \end{array} \right| (47)$$

Tabela 25 – Características do cobre [23]

Variável	Significado	Valor
TCAP	Capacidade térmica do condutor por unidade de volume (J/cm ³ .°C)	3,42
α _r	Coefficiente de variação da resistividade para a temperatura de 20 °C (°C ⁻¹)	0,00381
ρ _r	ρ _r – Condutividade do condutor a 20 °C (μΩ/cm)	1,78
K ₀	K ₀ – Variável obtida a partir de:	242

	$\frac{1}{\alpha_r} - T_a (^{\circ}C)$	
T_m	T_m – Temperatura de fusão do condutor ($^{\circ}C$)	1084

Considerando uma temperatura ambiente de 20 $^{\circ}C$, um tempo de atuação das proteções de 0,2 segundos com base no dimensionamento realizado em baixa tensão, nas características do cobre presentes na Tabela 25 e a corrente de defeito para cada percurso, obteve-se uma secção mínima para o barramento de terras de 53,17 mm², 31,9 mm² para as baixadas e 28,9 mm² para o elétrodo de terra. No *ELEK SafeGrid Earthing*, foram introduzidas as secções padronizadas: 70 mm² para o barramento de terras e 50 mm² para as baixadas e para o elétrodo de terra.

3.8.5 Tensões de Passo e de Contacto

No dimensionamento da rede de terras, é fundamental considerar os perigos dos circuitos acidentais, situações em que o corpo humano torna-se involuntariamente um condutor de corrente elétrica.

As situações que caracterizam um circuito acidental pelo corpo humano são: tensão de passo e tensão de contacto. A tensão de passo é a diferença de potencial à superfície da terra, que uma pessoa pode estar sujeita, quando os seus pés estão afastados um metro e sem contacto com objetos ligados à terra. Por outro lado, a tensão de contacto é a tensão que, em caso de defeito, aparece entre partes simultaneamente acessíveis.

Como referido no capítulo anterior, os efeitos da corrente elétrica no corpo humano tornam-se mais perigosos com o aumento da intensidade e duração da corrente de defeito. Desta forma, estudos realizados por Dalziel [24] demonstram uma relação entre a intensidade e a duração da corrente, resultando na equação 48.

$$S_b = I_b^2 \times t_s \quad \left| \begin{array}{l} S_b - \text{Constante empírica que relaciona a intensidade e a} \\ \text{duração da corrente de defeito;} \\ I_b - \text{Intensidade de corrente suportada pelo corpo} \\ \text{humano (A);} \\ t_s - \text{Tempo de duração da passagem de corrente (s).} \end{array} \right. \quad (48)$$

Com base nos resultados dos estudos de Dalziel, foi estabelecido o limite máximo de corrente que o corpo humano pode suportar sem risco de fibrilação ventricular. Estima-se que 99,5 % da população consegue tolerar a passagem de uma corrente determinada pela equação 49.

$$I_b = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (49)$$

A constante k está relacionada com a constante empírica S_b , como se verifica na equação 50.

$$k = \sqrt{S_b} \quad | \quad (50)$$

A influência do peso corporal no limite da corrente tolerável pelo corpo humano foi demonstrada por Dalziel, revelando que, para um indivíduo de 50 kg, o valor de S_b é de 0,0135, enquanto para um indivíduo de 70 kg, o valor é de 0,0246.

No dimensionamento da rede de terras, optou-se pelo peso de 50 kg, uma escolha conservadora que visa garantir e assegurar maior segurança para a instalação.

De forma a garantir a segurança das pessoas, é necessário prevenir situações em que a quantidade de energia absorvida durante a presença de um defeito é superior ao valor máximo admissível pelo corpo humano. Assim, quando submetido a correntes contínuas e alternadas, o corpo humano pode ser modelado como um circuito de referências, conforme ilustrado na Figura 65 e na Figura 66.

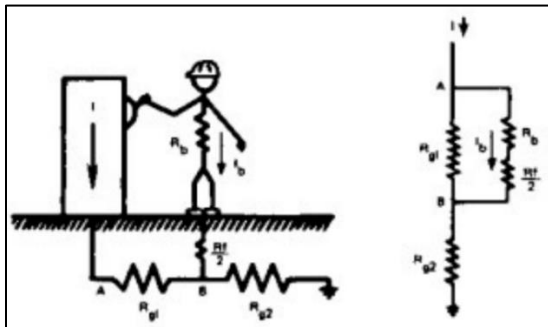


Figura 65 – Esquema e circuito equivalente da tensão de contacto

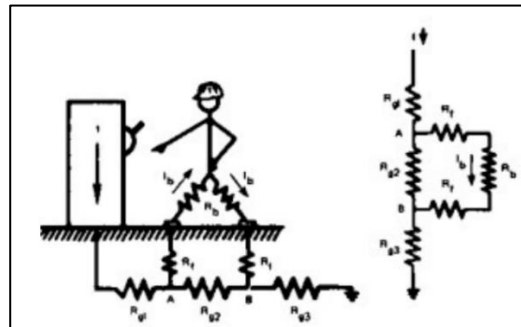


Figura 66 – Esquema e circuito equivalente da tensão de passo

Devido às suas distintas configurações, as duas situações apresentam resistências diferentes durante a passagem da corrente através do corpo para o solo. Essa diferença é refletida na equação 51 e na equação 52.

$$R_{\text{Contacto}} = R_b + \frac{R_f}{2} \quad | \quad (51)$$

$$R_{\text{Passo}} = R_b + 2R_f \quad | \quad (52)$$

A norma IEEE 80-2013 simplifica a resistência R_f ao considerá-la como um disco metálico condutor. Esta simplificação permite desconsiderar as resistências adicionais introduzidas por elementos como o vestuário, sendo determinada pela equação 53.

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \quad | \quad (53)$$

Com base na norma, o raio b foi definido como 0,08 m e a resistência R_f estimada como três vezes a resistividade do solo.

$$R_f = 3\rho \quad | \quad (54)$$

Relativamente à resistência do corpo humano R_b , os estudos realizados por Dalziel demonstram que, na situação mais desfavorável, a resistência assume um valor de 1333Ω . No entanto, para fins práticos e de segurança, a norma IEEE 80-2013 adota um valor preventivo de 1000Ω .

Assim, através da combinação das equações apresentadas, é possível determinar o limite máximo da tensão de contacto e de passo, através da equação 55 e da equação 56, respetivamente.

$$V_{\text{Contacto}(50 \text{ kg})} = (1000 + 1,5\rho) \times \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (55)$$

$$V_{\text{Passo}(50 \text{ kg})} = (1000 + 6\rho) \times \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (56)$$

A área ao redor dos edifícios é predominantemente coberta por vegetação e relva, com exceção das zonas de cargas e descargas e nas portas principais, que possuem uma camada superficial de betão.

A alta resistividade da camada superficial de betão aumenta significativamente o limite máximo da tensão de contacto e de passo. No entanto, tendo em conta as áreas de vegetação e de relva, a camada superficial não foi considerada, levando à escolha da situação mais desfavorável, o que diminui drasticamente os valores da tensão de contacto e de passo.

Para a obtenção do limite máximo da tensão de contacto e de passo, foi utilizado o *software ELEK SafeGrid Earthing*, que através da modelização do solo apresenta uma solução rápida e precisa.

$$V_{\text{Contacto}(50 \text{ kg})} = 1271 \text{ V}$$

$$V_{\text{Passo}(50 \text{ kg})} = 4305,86 \text{ V}$$

3.8.6 Elevação do Potencial de Terra

A elevação do potencial de terra (GPR) é o potencial elétrico máximo que um elétrodo de terra pode atingir em relação a um ponto de terra distante.

O cálculo da elevação do potencial de terra é crucial no estudo da rede de terras, pois um valor de GPR inferior à tensão máxima admissível de contacto, indica a finalização e validação do projeto. A elevação do potencial de terra é calculada pela equação 57.

$$GPR = I_G \times R_g = 18500 \times 0,300 = 5550 \text{ V} \quad \left. \begin{array}{l} I_g - \text{Corrente máxima na rede de} \\ \text{terras (A);} \end{array} \right| (57)$$

R_g – Resistência da rede de terras, obtido a partir do ELEK SafeGrid Earthing (Ω).

Como o valor de GPR é superior à tensão máxima admissível de contacto, 1271 V, a validação da rede de terras exige medidas adicionais.

Assim, é fundamental proceder com a verificação das tensões de passo e de contacto presentes na instalação, de forma a garantir que estes valores não excedem os valores máximos admissíveis pelo corpo humano.

3.8.7 Validação das Tensões de Passo e de Contacto

Os valores das tensões de passo e de contacto existentes na instalação são obtidos pelo *ELEK SafeGrid Earthing*.

Estes resultados permitem uma análise detalhada da rede de terras, identificando possíveis problemas em localizações específicas da instalação.

Com o objetivo de validar as tensões de passo e de contacto, foram realizadas diversas simulações, implementando várias estratégias para reduzir os valores dessas tensões abaixo dos limites máximos toleráveis.

Durante as simulações, apenas considerou-se a tensão de contacto, uma vez que este valor é significativamente inferior à tensão de passo. Após a validação da rede de terras para a tensão de contacto verifica-se as tensões de passo presentes na instalação que, normalmente, também confirma a validação da rede de terras.

i. Primeira simulação

Colocação dos condutores do elétrodo de terra em valas horizontais à volta de todos os edifícios, enterrados a uma profundidade de 1 metro, como ilustrado na Figura 67.

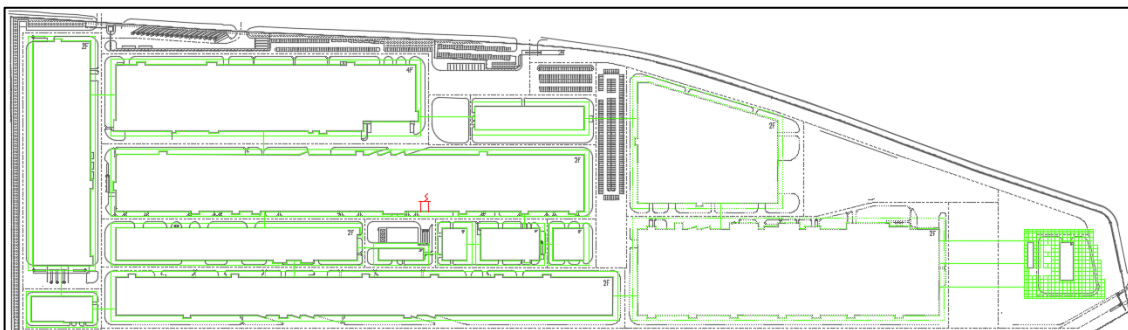


Figura 67 – Representação da rede enterrada a 1 metro de profundidade

Em diversos pontos da instalação, o condutor enterrado a 1 metro de profundidade não foi suficiente para reduzir a tensão de contacto a níveis aceitáveis, como pode ser observado na

Figura 68, na qual o código de cores fornecido pelo *software* permite identificar rapidamente as áreas de maior risco, facilitando a análise e a tomada de decisões.

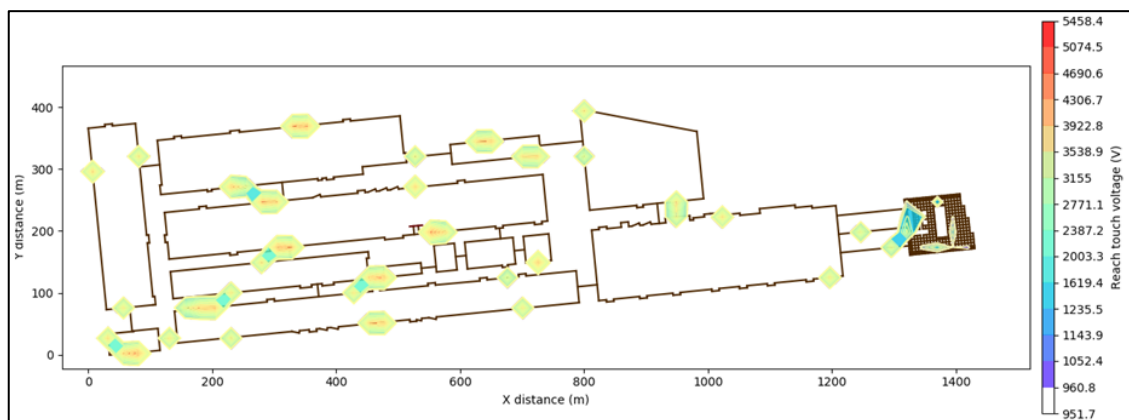


Figura 68 – Resultados da tensão de contacto para a primeira simulação

ii. Segunda simulação

Na segunda simulação, foi considerada a colocação, para além da vala indicada na primeira simulação, uma segunda vala a 5 metros de profundidade nos edifícios que exigem um controlo mais rigoroso da tensão de contacto.

Considerando a análise do tipo de solo, presente na Tabela 24, conclui-se que a resistividade diminui com a profundidade. Simulações realizadas computacionalmente demonstraram que a profundidade ideal para a abertura da vala é de 5 metros, pois a partir desta profundidade a redução da resistividade e da tensão de contacto é pouco significativa, evidenciando que a escavação a uma profundidade maior não será economicamente viável.

Os resultados para esta simulação são apresentados na Figura 69.

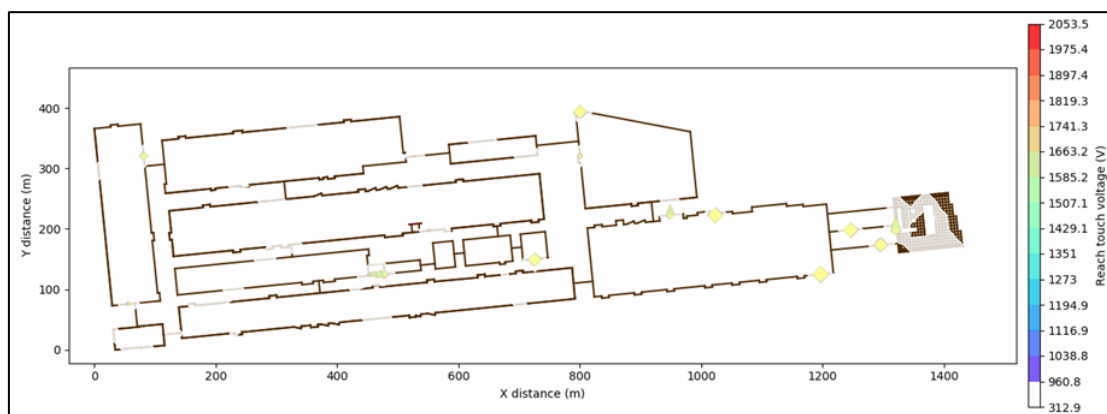


Figura 69 – Resultados da tensão de contacto para a segunda simulação

Esta solução reduziu substancialmente o valor máximo da tensão de contacto. No entanto, existem zonas que excedem o máximo permitido, indicando a necessidade de medidas complementares para alcançar o nível ideal de segurança.

iii. Terceira simulação

Com o objetivo de resolver os pontos específicos da instalação onde as tensões de contacto são superiores à tensão máxima tolerável pelo corpo humano, foram introduzidos elérodos verticais nessas zonas. Os elérodos aumentam a área de contacto com o solo, permitindo a dissipação da corrente por uma área maior.

Os elérodos de terra do tipo vertical foram colocados na vala a 1 metro de profundidade. O comprimento dos elérodos foi determinado com base na metodologia apresentada na simulação anterior, resultando na utilização de elérodos com 6 metros de comprimento.

Os resultados para esta simulação são apresentados na Figura 70.

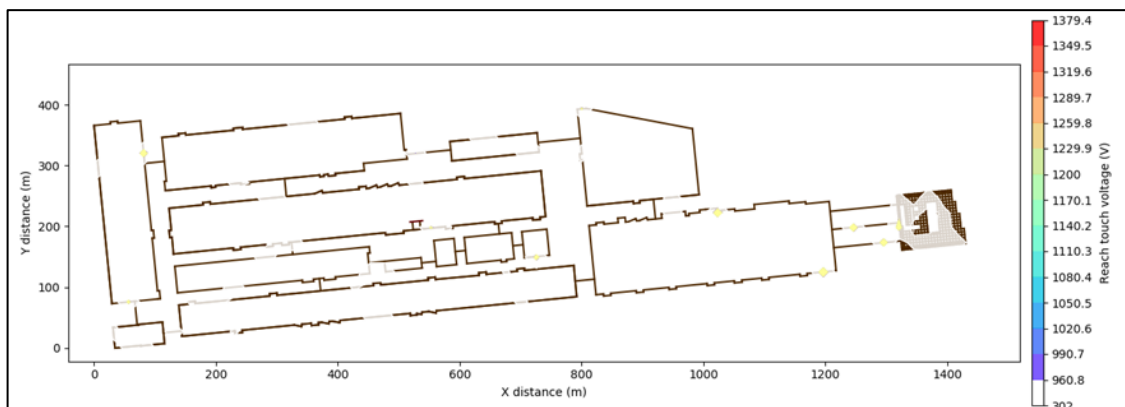


Figura 70 – Resultados da tensão de contacto para a terceira simulação

A implementação desta solução diminui as zonas com tensões de contacto acima do limite máximo tolerável. No entanto, foi necessário efetuar pequenas modificações na disposição dos elérodos nessas áreas, de forma a obter tensões de contacto inferiores a 1271 V, como evidenciado na simulação seguinte.

iv. Quarta simulação

Instalação de mais elérodos nas zonas críticas, diminuindo o espaçamento entre os mesmos e, consequentemente, o aumento da área de contacto com o solo.

Os resultados para a tensão de contacto e de passo são apresentados na Figura 71 e na Figura 72, respetivamente.

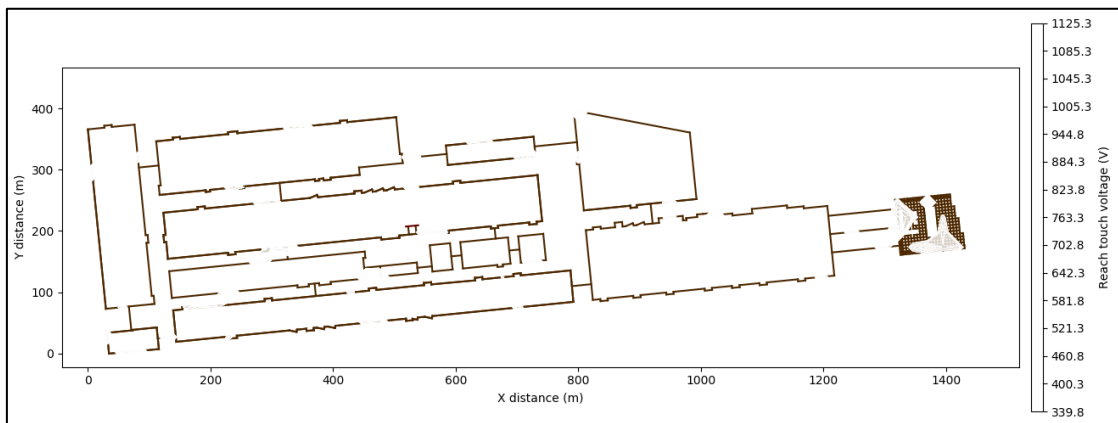


Figura 71 – Resultados da tensão de contacto para a quarta simulação

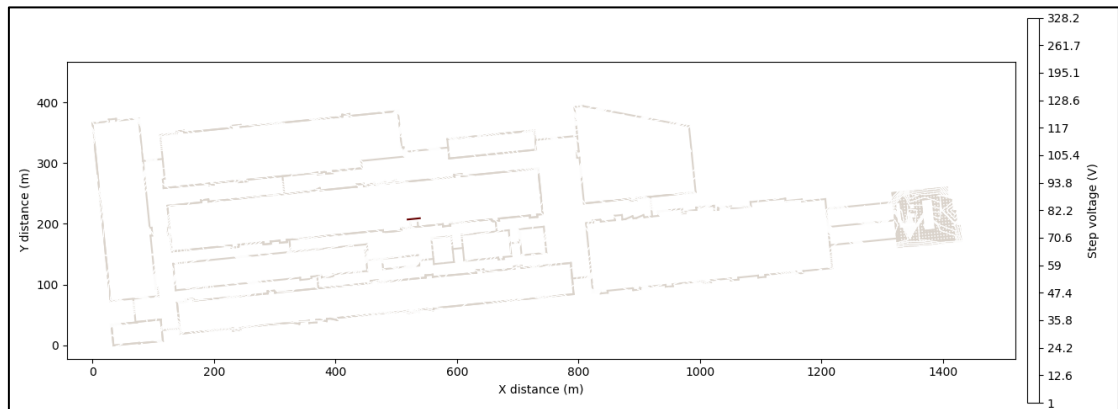


Figura 72 – Resultados da tensão de passo para a quarta simulação

As tensões de contacto e de passo existentes na instalação são inferiores aos valores máximos toleráveis pelo corpo humano (1271 V para a tensão de contacto e 4305,86 para a tensão de passo), garantindo a validação da rede de terras e a segurança na instalação.

3.9 Ferramentas Computacionais

Ao longo do desenvolvimento da presente dissertação, foram usados diversos *softwares* que garantiram o suporte necessário à realização das temáticas apresentadas, como representado na Tabela 26.

Tabela 26 – Ferramentas computacionais utilizadas durante a dissertação

Software	Finalidade
<i>Microsoft Excel</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Organização dos equipamentos associados ao edifício M2 e realização da estimativa de potência; - Desenvolvimento de gráficos relativos ao estudo da viabilidade económica entre o esquema TN-S e TN-C e à análise da secção económica de canalizações elétricas;

	- Dimensionamento de canalizações no estudo do grupo gerador e cálculo das necessidades de ventilação.
<i>ETAP</i>	- Modelagem, simulação e análise da rede, permitindo obter os parâmetros necessários para a análise da viabilidade económica entre o esquema TN-S e TN-C e para o estudo da rede de terras.
<i>VBA</i>	- Linguagem de programação associada à ferramenta <i>EXCEL</i> , que permitiu realizar o estudo económico entre os ELT.
<i>AutoCad</i>	- Representação do diagrama de alimentação dos equipamentos de emergência e apresentação do esquema unifilar do quadro de transferência de cargas e do quadro de segurança; - Preparação da planta da unidade industrial para o estudo da rede de terras.
<i>ELEX SafeGrid Earthing</i>	- Dimensionamento da rede de terras.

Conclusão

A presente dissertação foi desenvolvida em contexto empresarial na “Quadrante – Engenharia e consultoria, S.A”, tendo sido realizados diversos projetos com base na unidade industrial da CALB Europe S.A, constituída por vários edifícios com funcionalidades distintas, situada na zona industrial e logística de Sines.

Numa fase inicial, desenvolveu-se o estado da arte com principal foco nos esquemas de ligação à terra e nas instalações de ligação à terra, permitindo efetuar uma contextualização e adquirir conhecimentos importantes que foram aplicados na realização do caso de estudo.

A escolha do esquema de ligação à terra determina as medidas de proteção das pessoas contra contactos indiretos. Caso as regras de instalação e operação forem cumpridas, os três esquemas de ligação à terra são equivalentes em relação aos requisitos de segurança das pessoas. Com a possibilidade de escolher um dos três esquemas de ligação à terra, é extremamente importante conhecer as características operacionais de cada um, para efetuar uma escolha adequada do esquema de ligação à terra tendo em conta as características e a finalidade da instalação.

A rede de terras desempenha um papel fundamental na segurança das pessoas e da instalação, pois permite o escoamento de correntes indesejadas causadas por diferenças de potencial entre dois pontos. Quando dimensionada corretamente, a rede de terras garante que as tensões de passo e de contacto são inferiores aos valores aceitáveis pelo corpo humano.

Na segunda fase, realizou-se o levantamento das necessidades e a caracterização da indústria, permitindo realizar uma rigorosa estimativa de potência para o edifício M2, proporcionando uma base sólida e confiável para o dimensionamento da rede de distribuição e para a desenvolvimento das temáticas efetuadas nesta fase.

Uma análise aprofundada das características da instalação industrial culminou na seleção do esquema TN como a solução mais adequada. Desta forma, realizou-se uma comparação económica detalhada entre as variantes TN-S e TN-C, utilizando uma ferramenta desenvolvida em *Visual Basic for Applications (VBA)*, tendo sido importante a conclusão da etapa anterior para a determinação de todos os parâmetros necessários ao estudo. Os resultados demonstraram que o esquema TN-C proporciona uma economia substancial na instalação comparativamente ao esquema TN-S.

O dimensionamento técnico da canalização determina a secção mínima necessária para garantir a segurança de pessoas e instalações. No entanto, uma secção menor do condutor, implica uma maior resistência elétrica, levando a maiores perdas de energia, traduzindo-se em acréscimos de custos que se estende por toda a vida útil do cabo. Para conciliar os aspetos técnicos e económicos realizou-se um estudo para dois circuitos da instalação, identificando a secção economicamente viável e o tempo de retorno do investimento. Ambos os circuitos

apresentaram um tempo de retorno do investimento de aproximadamente 6 anos. Considerando uma vida útil estimada de 20 anos para a unidade industrial, a utilização da secção económica, apesar do custo inicial elevado, proporciona 14 anos de poupança.

A instalação de um gerador de emergência no edifício M2 revelou-se crucial para assegurar o fornecimento de energia aos equipamentos de emergência em caso de falha da rede eléctrica convencional, especialmente aos sistemas de controlo de fumo, que são essenciais para a segurança das pessoas em caso de incêndio. O projeto completo do grupo gerador incluiu o dimensionamento das canalizações, o cálculo das necessidades de ventilação, o cumprimento dos requisitos na instalação do gerador na sala técnica e a garantia da correta extração dos gases de escape.

Por fim, a validação do projeto do sistema de ligação à terra foi realizada com o auxílio do *software ELEK SafeGrid Earthing*, garantindo o cumprimento dos requisitos estabelecidos pela norma IEEE 80-2013. Devido à predominância de vegetação e relva na área ao redor dos edifícios, o material superficial não foi considerado, resultando numa redução significativa do limite máximo tolerável para as tensões de contacto e de passo. Para garantir que os valores reais de tensão de contacto e de passo na unidade industrial estivessem abaixo dos limites toleráveis pelo corpo humano, foram realizadas diversas simulações e implementadas estratégias para reduzir a tensão de contacto em pontos críticos. A primeira simulação consistiu na instalação de uma vala a 1 metro de profundidade à volta de todos os edifícios. No entanto, esta solução mostrou-se ineficiente em diversas áreas, mas serviu como base para as medidas seguintes. A segunda simulação compreendeu a introdução de uma vala adicional a 5 metros de profundidade apenas nos pontos mais críticos e de maior extensão, o que solucionou os problemas nessas áreas. Para lidar com pontos específicos da instalação, foram adicionados eléctrodos verticais, permitindo a dissipação da corrente por uma área maior. No entanto, alguns locais ainda apresentavam tensões de contacto acima dos limites toleráveis, o qual foi necessário reduzir o espaçamento entre os eléctrodos, aumentando a área de contacto com o solo, levando à validação da rede de terras e, conseqüentemente, a segurança na unidade industrial.

Para o desenvolvimento das temáticas abordadas na dissertação, as componentes académicas forneceram conhecimentos teóricos e práticos essenciais para o sucesso do estágio.

As unidades curriculares de “Projetos de Instalações Eléctricas” e “Instalações Eléctricas Especiais” foram imprescindíveis para as tarefas desenvolvidas no âmbito da estimativa de potência, conhecimento e funcionamento dos esquemas de ligação à terra, estudo do grupo gerador, dimensionamento das canalizações e cálculo das necessidades de ventilação.

As unidades curriculares de “Sistemas Eléctricos de Energia” assumiram um papel fundamental na compreensão das redes de distribuição em diferentes níveis de tensão.

Relativamente à análise económica entre o esquema TN-S e TN-C, os conceitos de programação obtidos nas unidades curriculares de “Algoritmia e Programação” e “Cálculo Computacional”

foram indispensáveis para o desenvolvimento da ferramenta em *Visual Basic for Applications* (VBA) associado ao *software Excel*.

O desenvolvimento da dissertação em contexto empresarial permitiu consolidar os conhecimentos obtidos durante o percurso académico e adquirir uma valiosa experiência profissional.

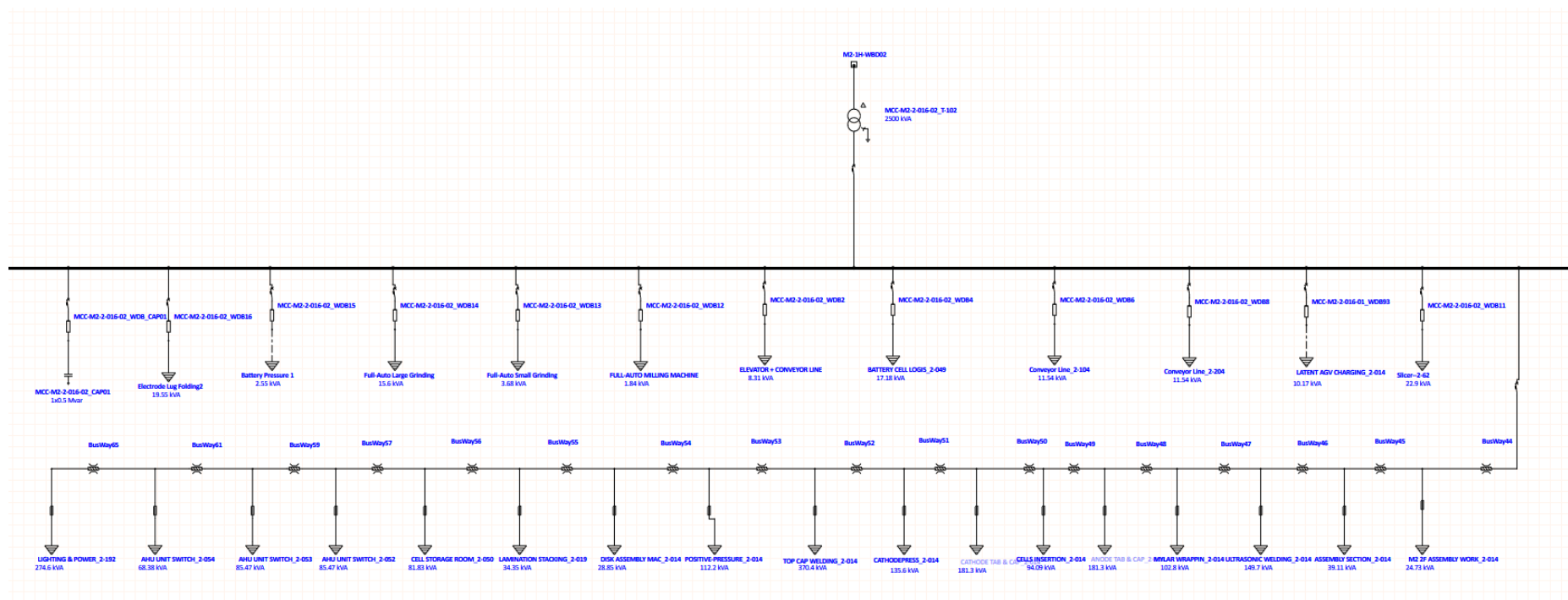
Referências

- [1] “REGRAS TÉCNICAS DAS INSTALAÇÕES ELÉCTRICAS DE BAIXA TENSÃO (RTIEBT),” 2000.
- [2] B. Lacroix and R. Calvas, “Caderno técnico nº 172 Esquemas das ligações à terra de BT (regimes do neutro),” 2000.
- [3] “IEC 60364-6: 2016 Low voltage electrical installations-Part 6: Verification.”
- [4] ABB, “Technical Application Papers Distribution systems and protection against indirect contact and earth fault,” 2006.
- [5] E. Tison, *Electrical installation guide : according to IEC international standards*. Schneider electric, 2010.
- [6] M. A. G. Mitolo, *Electrical safety of low-voltage systems*. McGraw-Hill, 2009.
- [7] J. B. Carvalho, “Revista Técnico-Científica NEUTRO À TERRA,” *Neutro à Terra*, 2021.
- [8] ARCEL, “ARCEL_LIGAÇÃO TERRAS BT”.
- [9] J. P. Pinto, J. Nogueira, B. Coutinho, V. Gomes, C. Neves, and F. Brito, “Manual Prático de Medição da Resistência de Terra e Resistividade do solo,” 2013.
- [10] F. J. Pita, “Avaliação de Sistemas de Terras,” *Neutro à Terra*, no. 17, Jun. 2017, doi: 10.26537/neutroaterra.v0i17.459.
- [11] D. José António Beleza Carvalho, “ARTIGO TÉCNICO Protecção das Pessoas em Instalações Eléctricas de Baixa Tensão Cálculo dos Dispositivos de Protecção,” 2009.
- [12] Schneider Electric, “Programa de Formação Técnica Continuada Esquemas de Aterramento,” 2013.
- [13] J. António and B. Carvalho, “Esquemas de Ligação à Terra em Instalações Eléctricas de Baixa Tensão,” 2023.
- [14] F. Jullien and I. Héritier, “The IT earthing system (unearthed neutral) in LV,” 1999.
- [15] H. Markiewicz and A. Klajn, “Power Quality Application Guide Earthing & EMC Earthing Systems-Fundamentals of Calculation and Design Copper Development Association IEE Endorsed Provider,” 2003.
- [16] Megger, “Getting Down To Earth A practical guide to earth resistance testing,” 2005.
- [17] Lightning & Surge Technologies, “Earthing Techniques,” 2013.
- [18] E-REDES, “GUIA TÉCNICO DE TERRAS Ligações à terra e Eléctrodos de terra,” 2022.
- [19] G. Gilbert, “Soil Modelling Techniques,” *International Journal of Materials Science and Applications*, vol. 1, no. 1, p. 8, 2012, doi: 10.11648/j.ijmsa.20120101.12.
- [20] Fluke, “Principles, testing methods and applications - Earth Ground Resistance.”
- [21] “REGRAS TÉCNICAS DAS INSTALAÇÕES ELÉCTRICAS DE BAIXA TENSÃO (RTIEBT),” 2000.
- [22] Diário da República, “Portaria n.º 135/2020”.
- [23] S. Committee of the IEEE Power and E. Society, “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding Sponsored by the Substations Committee IEEE Power and Energy Society IEEE Std 80™-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015).”
- [24] C. F. Dalziel, “Let-go currents and voltages,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry*, vol. 75, no. 2, pp. 49–56, May 1956, doi: 10.1109/TAI.1956.6367148.

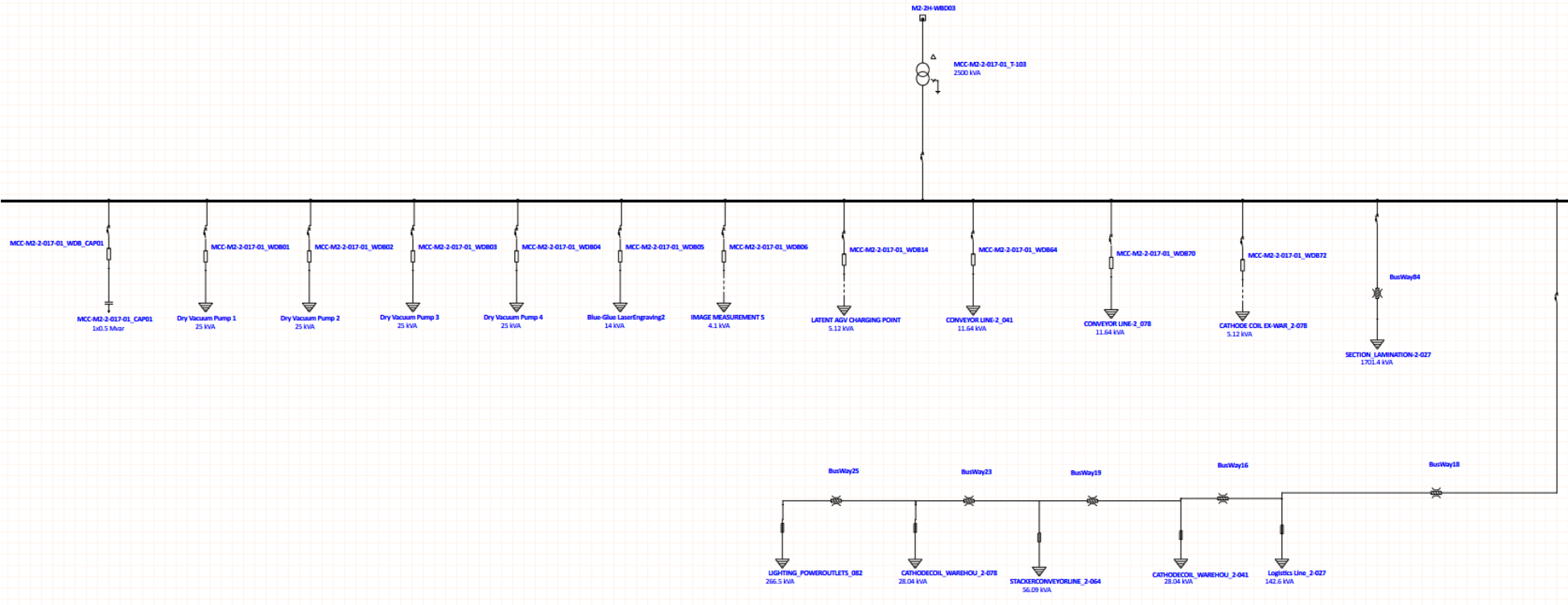
Anexos

Anexo I – Distribuição em Baixa Tensão

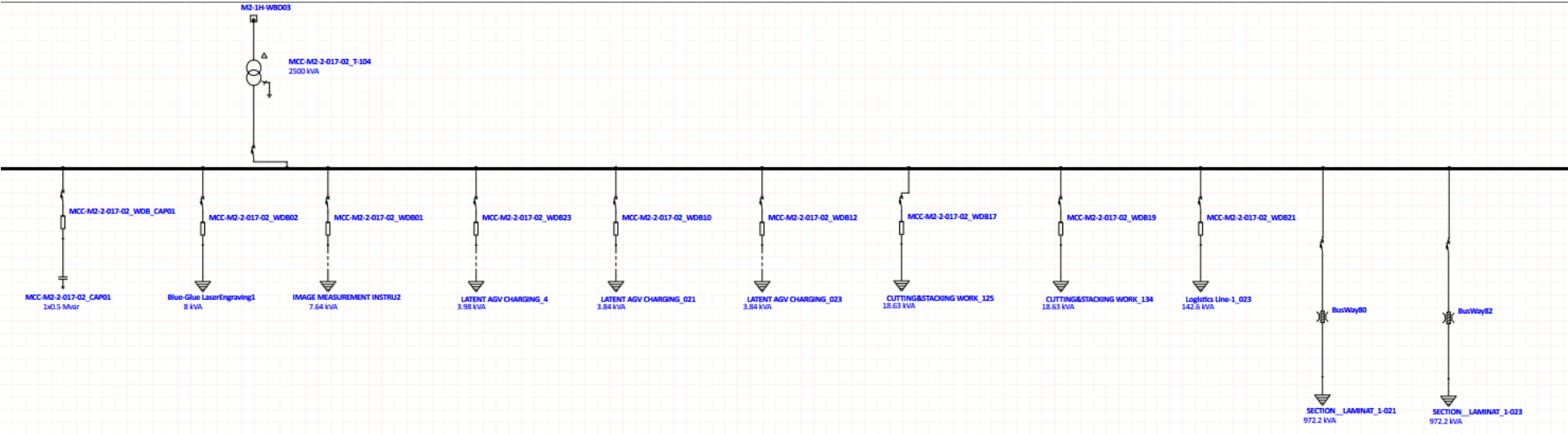
MCC-M2-016-2



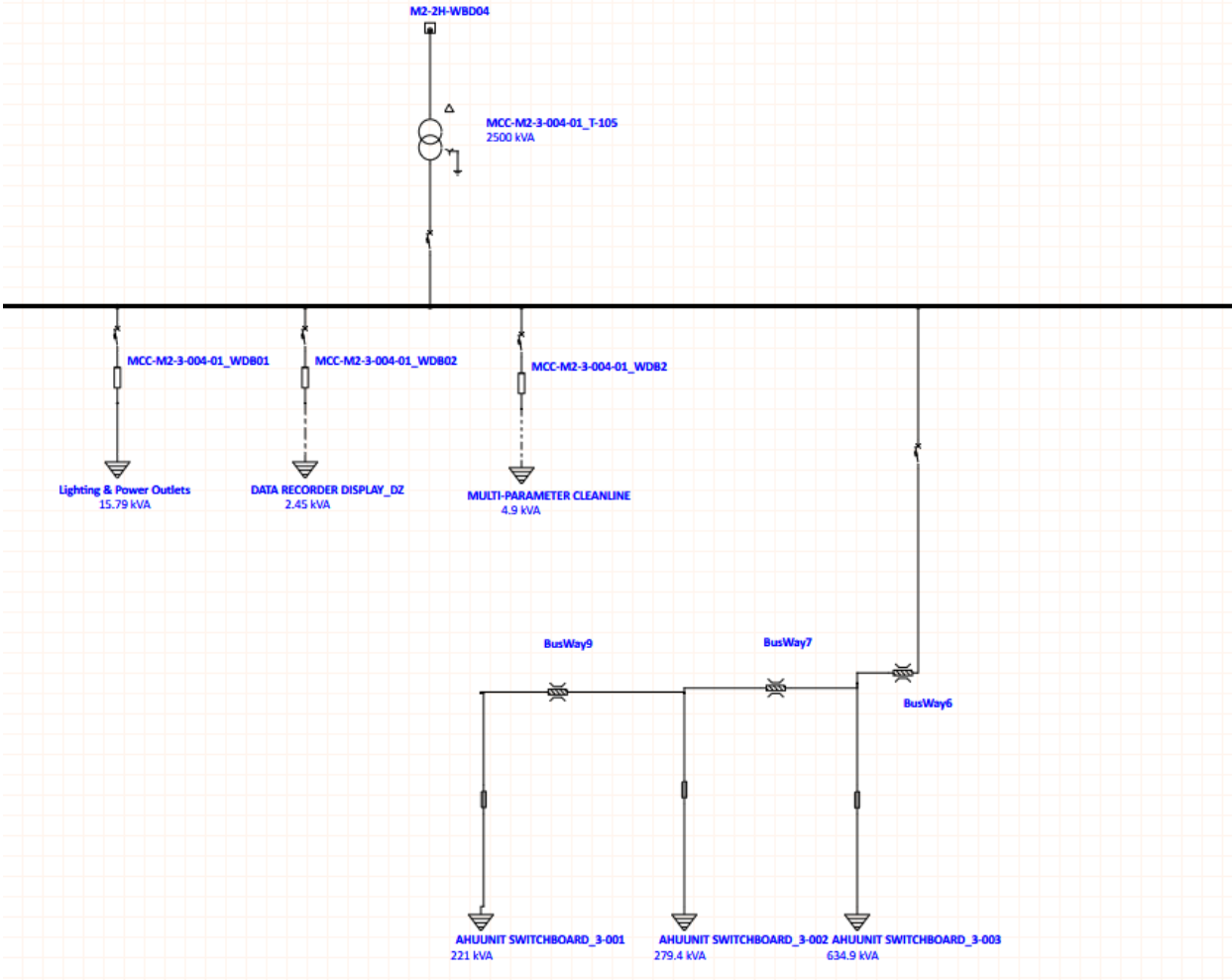
MCC-M2-017-1



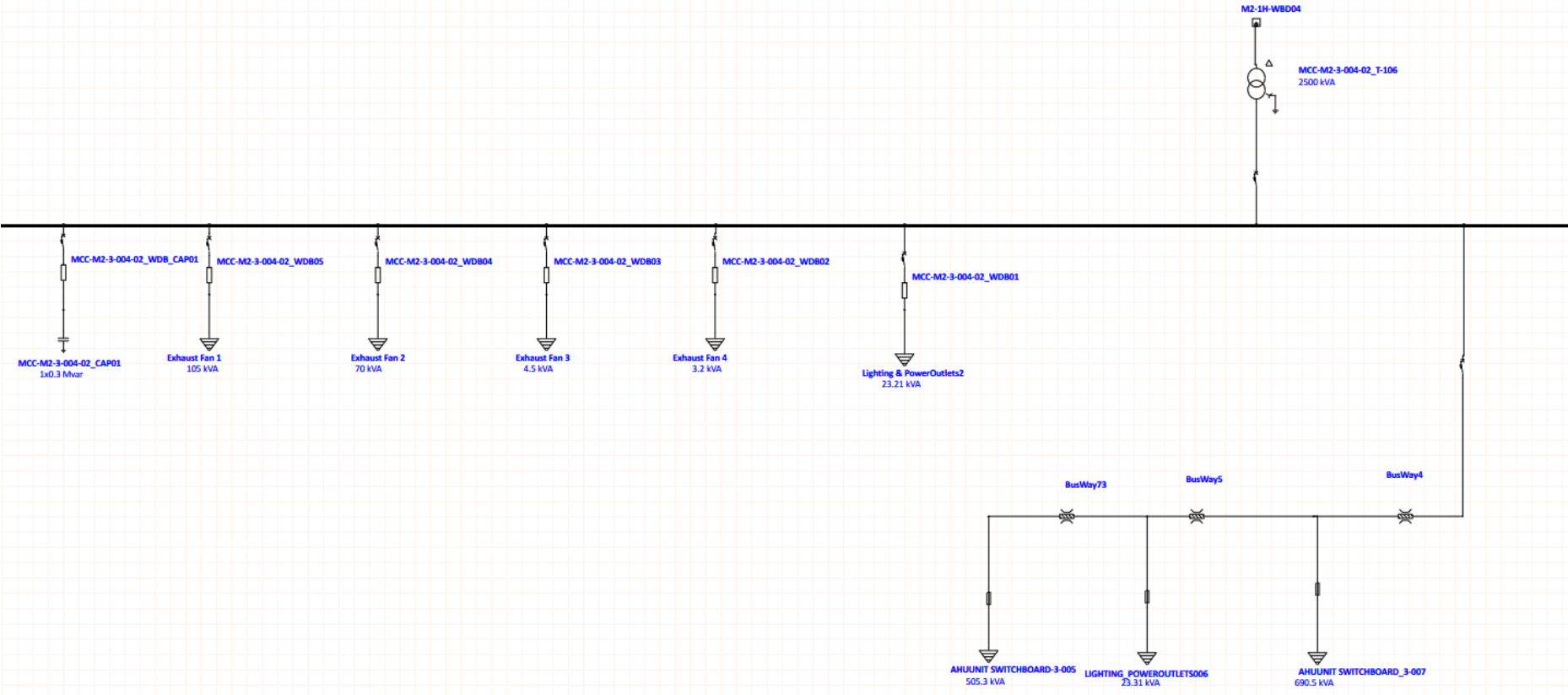
MCC-M2-017-2



MCC-M2-004-1



MCC-M2-006-1



Anexo II – Código Desenvolvido para a Análise Económica entre o Esquema TN-S e o Esquema TN-C

```
'Código Desenvolvido para o Botão Adicionar
Private Sub Botao_Agregar_Click()

'Definir a variável "DB" como a folha destinada à colocação dos dados no Excel
Dim DB As Worksheet
Set DB = ThisWorkbook.Worksheets("Estudo_Económico")

Dim linha As Long
linha = 2
'Encontrar a linha para a colocação dos dados no Excel
While Range("A" & linha).Value <> ""
linha = linha + 1
Wend

With DB
'Posicionar a informação presente no Userform na linha encontrada anteriormente
.Range("A" & linha).Value = Caixa_Origem.Value
.Range("B" & linha).Value = CaixaTexto_Destino.Value
.Range("C" & linha).Value = CaixaTexto_Comprimento.Value
.Range("D" & linha).Value = Caixa_Alimentacao.Value
.Range("E" & linha).Value = Caixa_Condutor.Value
.Range("F" & linha).Value = Caixa_CaboBarramento.Value
.Range("G" & linha).Value = Caixa_RegimeNeutro.Value
.Range("H" & linha).Value = Caixa_CalibreDisjuntores.Value
.Range("I" & linha).Value = Caixa_TipoDisjuntor.Value
.Range("J" & linha).Value = Caixa_Curva.Value
.Range("K" & linha).Value = Caixa_PoderCorte.Value
.Range("L" & linha).Value = Caixa_SecçãoCondutor.Value
.Range("P" & linha).Value = Caixa_Função.Value
.Range("Q" & linha).Value = Caixa_CorrenteServiço.Value
.Range("R" & linha).Value = Caixa_Ligação.Value
.Range("S" & linha).Value = Caixa_Derivação.Value

'Caso haja redução do neutro, a secção do neutro será introduzida na userform e consequentemente na linha do excel encontrada
If CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = True Then
.Range("M" & linha).Value = Caixa_SecçãoNeutro.Value
Else
'Caso não haja redução do neutro, a secção do condutor de neutro/proteção é igual à secção dos condutores de fase
.Range("M" & linha).Value = Caixa_SecçãoCondutor.Value
End If

.Range("AX" & linha).Value = Caixa_CondutoresParalelo.Value
.Range("AY" & linha).Value = Caixa_CondutoresFase.Value
.Range("AZ" & linha).Value = Caixa_CondutoresNeutro.Value
.Range("BA" & linha).Value = CheckBox_ReduçãoNeutro.Value
End With
```

```

'Declaração das variáveis para a determinação do preço do disjuntor
Dim ws As Worksheet
Dim SearchColumn As Range
Dim foundCell As Range
Dim startRow As Long
Dim endRow As Long
Dim cell As Range
Dim rowNum As Long
Dim celula As Range
Dim rowCol As Long
Dim startColuna As Long
Dim endColuna As Long

'Determinação do preço do disjuntor para a curva B
If Caixa_CaboBarramento.Text = "Cabo" Then
PC = Caixa_PoderCorte.Text
If Caixa_Curva.Text = "B" Then
Set ws = ThisWorkbook.Worksheets("Preço_Disjuntor")
Set SearchColumn = ws.Range("C:C")
Set foundCell = SearchColumn.Find(What:=PC, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)

'Encontrar a linha adequada de acordo com os parâmetros introduzidos no Userform
linha_B = foundCell.Row

startRow = linha_B + 1
endRow = linha_B + 12
Set SearchRange = ws.Range(ws.Cells(startRow, 3), ws.Cells(endRow, 3))

For Each celula In SearchRange
If celula.Value = Caixa_CalibreDisjuntores.Text Then
rowNum = celula.Row
Exit For
End If
Next celula

Dim comecoColuna As Long
Dim fimColuna As Long

startColuna = linha_B + 1
endColuna = linha_B + 6
Set SearchRangel = ws.Range(ws.Cells(linha_B, 4), ws.Cells(linha_B, 9))
For Each cell In SearchRangel
If cell.Text = Caixa_TipoDisjuntor.Text Then
rowCol = cell.Column
Exit For
End If
Next cell

```

```

'Colocar o preço do disjuntor na Folha Excel destinada à gravação dos dados
Worksheets("Estudo_Econômico").Range("N" & linha).Value = Worksheets("Preço_Disjuntor").Cells(rowNum, rowCol).Value

'Determinação do preço do disjuntor para a curva C
ElseIf Caixa_Curva.Text = "C" Then

Set ws = ThisWorkbook.Worksheets("Preço_Disjuntor")
Set SearchColumn = ws.Range("K:K")
Set foundCell = SearchColumn.Find(What:=PC, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)

'Encontrar a linha adequada de acordo com os parâmetros introduzidos no Userform
linha_B = foundCell.Row

startRow = linha_B + 1
endRow = linha_B + 12
Set SearchRange = ws.Range(ws.Cells(startRow, 11), ws.Cells(endRow, 11))

For Each celula In SearchRange
If celula.Value = Caixa_CalibreDisjuntores.Text Then
rowNum = celula.Row
Exit For
End If
Next celula

startColuna = linha_B + 1
endColuna = linha_B + 6
Set SearchRangel = ws.Range(ws.Cells(linha_B, 12), ws.Cells(linha_B, 17))
For Each cell In SearchRangel
If cell.Text = Caixa_TipoDisjuntor.Text Then
rowCol = cell.Column
Exit For
End If
Next cell

'Colocar o preço do disjuntor na Folha Excel destinada à gravação dos dados
Worksheets("Estudo_Econômico").Range("N" & linha).Value = Worksheets("Preço_Disjuntor").Cells(rowNum, rowCol).Value

'Determinação do preço do disjuntor para a curva D
ElseIf Caixa_Curva.Text = "D" Then

Set ws = ThisWorkbook.Worksheets("Preço_Disjuntor")
Set SearchColumn = ws.Range("S:S")
Set foundCell = SearchColumn.Find(What:=PC, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)
'Encontrar a linha adequada de acordo com os parâmetros introduzidos no Userform
linha_B = foundCell.Row

startRow = linha_B + 1
endRow = linha_B + 12
Set SearchRange = ws.Range(ws.Cells(startRow, 19), ws.Cells(endRow, 19))

For Each celula In SearchRange
If celula.Value = Caixa_CalibreDisjuntores.Text Then
rowNum = celula.Row
Exit For
End If
Next celula

startColuna = linha_B + 1
endColuna = linha_B + 6
Set SearchRangel = ws.Range(ws.Cells(linha_B, 20), ws.Cells(linha_B, 25))
For Each cell In SearchRangel
If cell.Text = Caixa_TipoDisjuntor.Text Then
rowCol = cell.Column
Exit For
End If
Next cell
'Colocar o preço do disjuntor na Folha Excel destinada à gravação dos dados
Worksheets("Estudo_Econômico").Range("N" & linha).Value = Worksheets("Preço_Disjuntor").Cells(rowNum, rowCol).Value

End If

```

```

'Declaração das variáveis para a determinação do preço da Secção
Dim sht As Worksheet
Dim valor_linha As Long
Dim ProcuraColuna As Range
Dim EncontraCelula As Range
Dim LinhaComeca As Long
Dim LinhaAcaba As Long
Dim Coluna As Range
Dim NumLinha As Long
Dim Valor_Comprimento As Double
Dim Preço_Unitariol As Double
Dim Preço_Unitario As Double
Dim Condutores_Paralelo As Double

'Determinação do preço da secção
Sc = Caixa_SecçãoCondutor.Text

If CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = True And Caixa_Condutor.Text = "Alumínio" Then
Set sht = ThisWorkbook.Worksheets("Preço_Cabo")
Set ProcuraColuna = sht.Range("O:O")
Set EncontraCelula = ProcuraColuna.Find(What:=Sc, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)

'Encontrar a linha adequada de acordo com os parâmetros introduzidos no Userform
valor_linha = EncontraCelula.Row

LinhaComeca = valor_linha
LinhaAcaba = valor_linha + 1

Set SearchRange = sht.Range(sht.Cells(LinhaComeca, 16), sht.Cells(LinhaAcaba, 16))

For Each Coluna In SearchRange
If Coluna.Value = Caixa_CondutoresNeutro.Text Then
NumLinha = Coluna.Row
Exit For
End If
Next Coluna

'Converter o valor do comprimento numa unidade possível de realizar os cálculos
Valor_Comprimento = Cdbl(CaixaTexto_Comprimento.Value)
Condutores_Paralelo = Cdbl(Caixa_CondutoresParalelo.Value)
Worksheets("Estudo Económico").Range("O" & linha).Value = Worksheets("Preço_Cabo").Cells(NumLinha, 18).Value
Preço_Unitario = Worksheets("Estudo Económico").Range("O" & linha).Value
Preço_Unitariol = Preço_Unitario * Valor_Comprimento * Condutores_Paralelo

'Colocar o preço da secção na Folha Excel destinada à gravação dos dados
Worksheets("Estudo Económico").Range("O" & linha).Value = Preço_Unitariol

ElseIf CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = True And Caixa_Condutor.Text = "Cobre" Then

Set sht = ThisWorkbook.Worksheets("Preço_Cabo")
Set ProcuraColuna = sht.Range("V:V")
Set EncontraCelula = ProcuraColuna.Find(What:=Sc, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)

'Encontrar a linha adequada de acordo com os parâmetros introduzidos no Userform
valor_linha = EncontraCelula.Row

LinhaComeca = valor_linha
LinhaAcaba = valor_linha + 1

Set SearchRange = sht.Range(sht.Cells(LinhaComeca, 23), sht.Cells(LinhaAcaba, 23))

For Each Coluna In SearchRange
If Coluna.Value = Caixa_CondutoresNeutro.Text Then
NumLinha = Coluna.Row
Exit For
End If
Next Coluna

'Converter o valor do comprimento numa unidade possível de realizar os cálculos
Valor_Comprimento = Cdbl(CaixaTexto_Comprimento.Value)
Condutores_Paralelo = Cdbl(Caixa_CondutoresParalelo.Value)
Worksheets("Estudo Económico").Range("O" & linha).Value = Worksheets("Preço_Cabo").Cells(NumLinha, 25).Value
Preço_Unitario = Worksheets("Estudo Económico").Range("O" & linha).Value
Preço_Unitariol = Preço_Unitario * Valor_Comprimento * Condutores_Paralelo

'Colocar o preço da secção na Folha Excel destinada à gravação dos dados
Worksheets("Estudo Económico").Range("O" & linha).Value = Preço_Unitariol

```

```

ElseIf CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = False Then

Set sht = ThisWorkbook.Worksheets("Preço_Cabo")
Set ProcuraColuna = sht.Range("AA:AA")
Set EncontraCelula = ProcuraColuna.Find(What:=Sc, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)

'Encontrar a linha adequada de acordo com os parâmetros introduzidos no Userform
valor_linha = EncontraCelula.Row

LinhaComeca = valor_linha
LinhaAcaba = valor_linha + 3

Set SearchRange = sht.Range(sht.Cells(LinhaComeca, 28), sht.Cells(LinhaAcaba, 28))

For Each Coluna In SearchRange
If Coluna.Value = Caixa_CondutoresFase.Text Then
NumLinha = Coluna.Row
Exit For
End If
Next Coluna

'Converter o valor do comprimento numa unidade possível de realizar os cálculos
Valor_Comprimento = CDb1(CaixaTexto_Comprimento.Value)
Condutores_Paralelo = CDb1(Caixa_CondutoresParalelo.Value)
Worksheets("Estudo_Económico").Range("O" & linha).Value = Worksheets("Preço_Cabo").Cells(NumLinha, 29).Value
Preço_Unitario = Worksheets("Estudo_Económico").Range("O" & linha).Value
Preço_Unitario1 = Preço_Unitario * Valor_Comprimento * Condutores_Paralelo

'Colocar o preço da secção na Folha Excel destinada à gravação dos dados
Worksheets("Estudo_Económico").Range("O" & linha).Value = Preço_Unitario1

End If

'Declaração das variáveis para a determinação do preço do barramento
Dim sh As Worksheet
Dim linhaValor As Long
Dim linha_valor1 As Long
Dim ColunaProcura As Range
Dim Coluna_Procural As Range
Dim CelulaEncontra As Range
Dim Celula_Encontral As Range
Dim LinhaInicio As Long
Dim LinhaFim As Long
Dim Inicio_Linha1 As Long
Dim Fim_Linha1 As Long
Dim Calibre_Ligação As Range
Dim Numero_Linha As Long
Dim Number_Linha As Long
Dim Preço_Transporte As Double
Dim Preço_Ligação As Double
Dim Preço_TransporteTotal As Double
Dim Valor_Comprimento1 As Double
Dim Preço_Transporte1 As Double

ElseIf Caixa_CaboBarramento.Text = "Barramento" Then

```

```

If Caixa_Função.Text = "Transporte" And Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-C" Then

Calibre_Barramento = Caixa_CorrenteServiço.Text
Calibre_CaixaLigação = Caixa_Ligação.Text

Set sh = ThisWorkbook.Worksheets("Preço_Barramento")
Set ColunaProcura = sh.Range("A:A")
Set Coluna_Procural = sh.Range("E:E")

Set CelulaEncontra = ColunaProcura.Find(What:=Calibre_Barramento, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)
Set Celula_Encontral = Coluna_Procural.Find(What:=Calibre_CaixaLigação, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)

'Encontrar a linha adequada de acordo com os parâmetros introduzidos no Userform
linhaValor = CelulaEncontra.Row
linha_valorl = Celula_Encontral.Row

LinhaInicio = linhaValor
LinhaFim = linhaValor + 4

Inicio_Linhal = linha_valorl
Fim_Linhal = linha_valorl + 4

Set SearchRange = sh.Range(sh.Cells(LinhaInicio, 1), sh.Cells(LinhaFim, 1))
Set SearchRangel = sh.Range(sh.Cells(Inicio_Linhal, 5), sh.Cells(Fim_Linhal, 5))
For Each Calibre In SearchRange
If Calibre.Value = Caixa_CorrenteServiço.Text Then
Numero_Linha = Calibre.Row
Exit For
End If
Next Calibre

For Each Calibre_Ligação In SearchRangel
If Calibre_Ligação.Value = Caixa_Ligação.Text Then
Number_Linha = Calibre_Ligação.Row
Exit For
End If
Next Calibre_Ligação

'Converter o valor do comprimento numa unidade possível de realizar os cálculos
Valor_Comprimento = Cdbl(CaixaTexto_Comprimento.Value)
Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value = Worksheets("Preço_Barramento").Cells(Numero_Linha, 2).Value
Preço_Transporte = Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value
Preço_Transportel = Preço_Transporte * Valor_Comprimento
Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value = Preço_Transportel
Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value = Worksheets("Preço_Barramento").Cells(Number_Linha, 6).Value
Preço_Ligação = Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value
Preço_TransporteTotal = Preço_Transportel + 2 * Preço_Ligação

'Colocar o preço do barramento na Folha Excel destinada à gravação dos dados
Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value = Preço_TransporteTotal

```

```

'Determinação do preço do barramento se a função for de transporte e o regime de neutro TN-S
ElseIf Caixa_Função.Text = "Transporte" And Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-S" Then

Calibre_Barramento = Caixa_CorrenteServiço.Text
Calibre_CaixaLigação = Caixa_Ligação.Text

Set sh = ThisWorkbook.Worksheets("Preço_Barramento")
Set ColunaProcura = sh.Range("A:A")
Set Coluna_Procural = sh.Range("E:E")

Set CelulaEncontra = ColunaProcura.Find(What:=Calibre_Barramento, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)
Set Celula_Encontral = Coluna_Procural.Find(What:=Calibre_CaixaLigação, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)
'Encontrar a linha adequada de acordo com os parâmetros introduzidos no Userform
linhaValor = CelulaEncontra.Row
linha_valor1 = Celula_Encontral.Row

LinhaInicio = linhaValor
LinhaFim = linhaValor + 4

Inicio_Linhal = linha_valor1
Fim_Linhal = linha_valor1 + 4

Set SearchRange = sh.Range(sh.Cells(LinhaInicio, 1), sh.Cells(LinhaFim, 1))
Set SearchRangel = sh.Range(sh.Cells(Inicio_Linhal, 5), sh.Cells(Fim_Linhal, 5))

For Each Calibre In SearchRange
If Calibre.Value = Caixa_CorrenteServiço.Text Then
Numero_Linha = Calibre.Row
Exit For
End If
Next Calibre
For Each Calibre_Ligação In SearchRangel
If Calibre_Ligação.Value = Caixa_Ligação.Text Then
Number_Linha = Calibre_Ligação.Row
Exit For
End If
Next Calibre_Ligação

'Converter o valor do comprimento numa unidade possível de realizar os cálculos
Valor_Comprimental = CDb1(CaixaTexto_Comprimento.Value)
Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value = Worksheets("Preço_Barramento").Cells(Numero_Linha, 3).Value
Preço_Transporte = Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value
Preço_Transportel = Preço_Transporte * Valor_Comprimental
Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value = Preço_Transportel
Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value = Worksheets("Preço_Barramento").Cells(Number_Linha, 7).Value
Preço_Ligação = Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value
Preço_TransporteTotal = Preço_Transportel + 2 * Preço_Ligação

'Colocar o preço do barramento na Folha Excel destinada à gravação dos dados
Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value = Preço_TransporteTotal

```

```

'Determinação do preço do barramento se a função for de distribuição e o regime de neutro TN-C
ElseIf Caixa_Função.Text = "Distribuição" And Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-C" Then

Calibre_Barramento = Caixa_CorrenteServiço.Text
Calibre_CaixaDerivação = Caixa_Derivação.Text

Set sh = ThisWorkbook.Worksheets("Preço_Barramento")
Set ColunaProcura = sh.Range("I:I")
Set Coluna_Procural = sh.Range("M:M")

Set CelulaEncontra = ColunaProcura.Find(What:=Calibre_Barramento, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)
Set Celula_Encontra = Coluna_Procural.Find(What:=Calibre_CaixaDerivação, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)
'Encontrar a linha adequada de acordo com os parâmetros introduzidos no Userform
linhaValor = CelulaEncontra.Row
linha_valor1 = Celula_Encontra.Row

LinhaInicio = linhaValor
LinhaFim = linhaValor + 5

Inicio_Linhal = linha_valor1
Fim_Linhal = linha_valor1 + 6

Set SearchRange = sh.Range(sh.Cells(LinhaInicio, 9), sh.Cells(LinhaFim, 9))
Set SearchRange1 = sh.Range(sh.Cells(Inicio_Linhal, 13), sh.Cells(Fim_Linhal, 13))

For Each Calibre In SearchRange
If Calibre.Value = Caixa_CorrenteServiço.Text Then
Numero_Linha = Calibre.Row
Exit For
End If
Next Calibre
For Each Calibre_Ligação In SearchRange1
If Calibre_Ligação.Value = Caixa_Derivação.Text Then
Number_Linha = Calibre_Ligação.Row
Exit For
End If
Next Calibre_Ligação

'Converter o valor do comprimento numa unidade possível de realizar os cálculos
Valor_Comprimento1 = CDb1(CaixaTexto_Comprimento.Value)
Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value = Worksheets("Preço_Barramento").Cells(Numero_Linha, 10).Value
Preço_Transporte = Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value
Preço_Transporte1 = Preço_Transporte * Valor_Comprimento1
Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value = Preço_Transporte1
Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value = Worksheets("Preço_Barramento").Cells(Number_Linha, 14).Value
Preço_Ligação = Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value
Preço_TransporteTotal = Preço_Transporte1 + Preço_Ligação

'Colocar o preço do barramento na Folha Excel destinada à gravação dos dados
Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value = Preço_TransporteTotal

```

```

'Determinação do preço do barramento se a função for de distribuição e o regime de neutro TN-S
ElseIf Caixa_Função.Text = "Distribuição" And Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-S" Then

Calibre_Barramento = Caixa_CorrenteServiço.Text
Calibre_CaixaDerivação = Caixa_Derivação.Text
Set sh = ThisWorkbook.Worksheets("Preço_Barramento")
Set ColunaProcura = sh.Range("I:I")
Set Coluna_Procural = sh.Range("M:M")
Set CelulaEncontra = ColunaProcura.Find(What:=Calibre_Barramento, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)
Set Celula_Encontral = Coluna_Procural.Find(What:=Calibre_CaixaDerivação, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)
'Encontrar a linha adequada de acordo com os parâmetros introduzidos no Userform
linhaValor = CelulaEncontra.Row
linha_valor1 = Celula_Encontral.Row

LinhaInicio = linhaValor
LinhaFim = linhaValor + 5

Inicio_Linhal = linha_valor1
Fim_Linhal = linha_valor1 + 6

Set SearchRange = sh.Range(sh.Cells(LinhaInicio, 9), sh.Cells(LinhaFim, 9))
Set SearchRangel = sh.Range(sh.Cells(Inicio_Linhal, 13), sh.Cells(Fim_Linhal, 13))

For Each Calibre In SearchRange
If Calibre.Value = Caixa_CorrenteServiço.Text Then
Numero_Linha = Calibre.Row
Exit For
End If
Next Calibre
For Each Calibre_Ligação In SearchRangel
If Calibre_Ligação.Value = Caixa_Derivação.Text Then
Number_Linha = Calibre_Ligação.Row
Exit For
End If
Next Calibre_Ligação

'Converter o valor do comprimento numa unidade possível de realizar os cálculos
Valor_Comprimento1 = CDb1(CaixaTexto_Comprimento.Value)
Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value = Worksheets("Preço_Barramento").Cells(Numero_Linha, 11).Value
Preço_Transporte = Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value
Preço_Transportel = Preço_Transporte * Valor_Comprimento1
Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value = Preço_Transportel
Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value = Worksheets("Preço_Barramento").Cells(Number_Linha, 15).Value
Preço_Ligação = Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value
Preço_TransporteTotal = Preço_Transportel + Preço_Ligação

'Colocar o preço do barramento na Folha Excel destinada à gravação dos dados
Worksheets("Estudo_Económico").Range("T" & linha).Value = Preço_TransporteTotal
End If
End If

```



```

'Código Desenvolvido para o Botão Excluir
Private Sub Botao_Excluir_Click()

Dim cust_id As String
cust_id = Trim(Caixa_Origem.Text)
Dim DB As Worksheet
Dim msgResp As VbMsgBoxResult
msgResp = MsgBox("Excluir Registro?", vbYesNo)
Set DB = ThisWorkbook.Worksheets("Estudo_Económico")
If msgResp = vbYes Then
LastRow = Cells(Rows.Count, "A").End(xlUp).Row
MsgBox ("Os dados da linha selecionada foram excluidos")
With DB
For i = 2 To LastRow
If Worksheets("Estudo_Económico").Cells(i, 1).Value = cust_id Then
Worksheets("Estudo_Económico").Rows(i).Delete
End If

Next

End With

Limpar

Else

Unload EstudoEconomico

End If

End Sub

```

! Este código permite que após um duplo clique na coluna A e na linha pretendida, os dados passam para o userform, permitindo excluir essa linha.
Private Sub Worksheet_BeforeDoubleClick(ByVal Target As Range, Cancel As Boolean)

```

Dim LastRow As Integer

LastRow = Cells(Rows.Count, "A").End(xlUp).Row

If Not Intersect(Target, Range("A3:A" & LastRow)) Is Nothing Then

With EstudoEconomico
.Caixa_Origem = Cells(ActiveCell.Row, 1)
.CaixaTexto_Destino = Cells(ActiveCell.Row, 2)
.CaixaTexto_Comprimento = Cells(ActiveCell.Row, 3)
.Caixa_Alimentacao = Cells(ActiveCell.Row, 4)
.Caixa_Condutor = Cells(ActiveCell.Row, 5)
.Caixa_CaboBarramento = Cells(ActiveCell.Row, 6)
.Caixa_RegimeNeutro = Cells(ActiveCell.Row, 7)
.Caixa_CalibreDisjuntores = Cells(ActiveCell.Row, 8)
.Caixa_TipoDisjuntor = Cells(ActiveCell.Row, 9)
.Caixa_Curva = Cells(ActiveCell.Row, 10)
.Caixa_PoderCorte = Cells(ActiveCell.Row, 11)
.Caixa_SeccaoCondutor = Cells(ActiveCell.Row, 12)
.Caixa_SeccaoNeutro = Cells(ActiveCell.Row, 13)
.Caixa_CondutoresParalelo = Cells(ActiveCell.Row, 50)
.Caixa_CondutoresFase = Cells(ActiveCell.Row, 51)
.Caixa_CondutoresNeutro = Cells(ActiveCell.Row, 52)
.CheckBox_ReducãoNeutro = Cells(ActiveCell.Row, 53)
.Caixa_Função = Cells(ActiveCell.Row, 16)
.Caixa_CorrenteServiço = Cells(ActiveCell.Row, 17)
.Caixa_Ligação = Cells(ActiveCell.Row, 18)
.Caixa_Derivação = Cells(ActiveCell.Row, 19)

.Show

End With
End If
Cancel = True

End Sub

```

```

Private Sub Botao_Finalizar_Click()
Dim resultado As Long
Dim Coluna1 As Double
Dim Coluna2 As Double
Dim Coluna3 As Double
Dim LastLinha As Long
Dim Line As Long
Dim ValorTotal As Double
Set plan = ThisWorkbook.Worksheets("Estudo_Económico")

LastLinha = plan.Cells(plan.Rows.Count, "A").End(xlUp).Row
Coluna1 = 0
Coluna2 = 0
Coluna3 = 0

For Line = 3 To LastLinha
Coluna1 = Coluna1 + plan.Cells(Line, 14).Value
Coluna2 = Coluna2 + plan.Cells(Line, 15).Value
Coluna3 = Coluna3 + plan.Cells(Line, 20).Value

Next Line
ValorTotal = Coluna1 + Coluna2 + Coluna3

Worksheets("Estudo_Económico").Cells(2, 22).Value = ValorTotal

MsgBox "No esquema TN-C, " & "o Preço Total é de " & ValorTotal & "€"
Unload EstudoEconomico

End Sub

```

```

'Código Desenvolvido para o Botão Preço
'Código semelhante ao código desenvolvido para o Botão Adicionar com exceção que o preço será mostrado numa caixa de texto e
' não será preciso enviar para a folha destinada à gravação dos dados

Private Sub Botao_Preço_Click()

Dim ws As Worksheet
Dim SearchColumn As Range
Dim foundCell As Range
Dim startRow As Long
Dim endRow As Long
Dim cell As Range
Dim rowNum As Long
Dim celula As Range
Dim rowCol As Long
Dim startColuna As Long
Dim endColuna As Long

PC = Caixa_PoderCorte.Text

If Caixa_CaboBarramento.Text = "Cabo" Then

If Caixa_Curva.Text = "B" Then
Set ws = ThisWorkbook.Worksheets("Preço_Disjuntor")
Set SearchColumn = ws.Range("C:C")
Set foundCell = SearchColumn.Find(What:=PC, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)
linha_B = foundCell.Row
startRow = linha_B + 1
endRow = linha_B + 12
Set SearchRange = ws.Range(ws.Cells(startRow, 3), ws.Cells(endRow, 3))
For Each celula In SearchRange
If celula.Value = Caixa_CalibreDisjuntores.Text Then
rowNum = celula.Row
Exit For
End If
Next celula
Dim comecoColuna As Long
Dim fimColuna As Long
startColuna = linha_B + 1
endColuna = linha_B + 6
Set SearchRangel = ws.Range(ws.Cells(linha_B, 4), ws.Cells(linha_B, 9))
For Each cell In SearchRangel
If cell.Text = Caixa_TipoDisjuntor.Text Then
rowCol = cell.Column
Exit For
End If
Next cell

Worksheets("Preço_Disjuntor").Activate
Worksheets("Preço_Disjuntor").Cells(1, 1).Value = Cells(rowNum, rowCol).Value
Preço1 = Worksheets("Preço_Disjuntor").Cells(1, 1).Value
Worksheets("Estudo_Económico").Activate
Worksheets("Estudo_Económico").Cells(2, 100).Value = Preço1

```

```

ElseIf Caixa_Curva.Text = "C" Then

Set ws = ThisWorkbook.Worksheets("Preço_Disjuntor")
Set SearchColumn = ws.Range("K:K")
Set foundCell = SearchColumn.Find(What:=PC, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)
linha_B = foundCell.Row
startRow = linha_B + 1
endRow = linha_B + 12
Set SearchRange = ws.Range(ws.Cells(startRow, 11), ws.Cells(endRow, 11))
For Each celula In SearchRange
If celula.Value = Caixa_CalibreDisjuntores.Text Then
rowNum = celula.Row
Exit For
End If
Next celula
startColuna = linha_B + 1
endColuna = linha_B + 6
Set SearchRangel = ws.Range(ws.Cells(linha_B, 12), ws.Cells(linha_B, 17))
For Each cell In SearchRangel
If cell.Text = Caixa_TipoDisjuntor.Text Then
rowCol = cell.Column
Exit For
End If
Next cell
|
Worksheets("Preço_Disjuntor").Activate
Worksheets("Preço_Disjuntor").Cells(1, 1).Value = Cells(rowNum, rowCol).Value
Preçol = Worksheets("Preço_Disjuntor").Cells(1, 1).Value
Worksheets("Estudo_Económico").Activate
Worksheets("Estudo_Económico").Cells(2, 100).Value = Preçol

ElseIf Caixa_Curva.Text = "D" Then

Set ws = ThisWorkbook.Worksheets("Preço_Disjuntor")
Set SearchColumn = ws.Range("S:S")
Set foundCell = SearchColumn.Find(What:=PC, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)

linha_B = foundCell.Row

startRow = linha_B + 1
endRow = linha_B + 12
Set SearchRange = ws.Range(ws.Cells(startRow, 19), ws.Cells(endRow, 19))

For Each celula In SearchRange
If celula.Value = Caixa_CalibreDisjuntores.Text Then
rowNum = celula.Row
Exit For
End If
Next celula

startColuna = linha_B + 1
endColuna = linha_B + 6
Set SearchRangel = ws.Range(ws.Cells(linha_B, 20), ws.Cells(linha_B, 25))
For Each cell In SearchRangel
If cell.Text = Caixa_TipoDisjuntor.Text Then
rowCol = cell.Column
Exit For
End If
Next cell

Worksheets("Preço_Disjuntor").Activate
Worksheets("Preço_Disjuntor").Cells(1, 1).Value = Cells(rowNum, rowCol).Value
Preçol = Worksheets("Preço_Disjuntor").Cells(1, 1).Value
Worksheets("Estudo_Económico").Activate
Worksheets("Estudo_Económico").Cells(2, 100).Value = Preçol

End If

```

```

Dim sht As Worksheet
Dim valor_linha As Long
Dim ProcuraColuna As Range
Dim EncontraCelula As Range
Dim LinhaComeca As Long
Dim LinhaAcaba As Long
Dim Coluna As Range
Dim NumLinha As Long
Dim Valor_Comprimento As Double
Dim Preço_Unitariol As Double
Dim Preço_Unitario As Double
Dim Condutores_Paralelo As Double

Sc = Caixa_SecçãoCondutor.Text

If CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = True And Caixa_Conductor.Text = "Aluminio" Then
Set sht = ThisWorkbook.Worksheets("Preço_Cabo")
Set ProcuraColuna = sht.Range("O:O")
Set EncontraCelula = ProcuraColuna.Find(What:=Sc, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)

valor_linha = EncontraCelula.Row

LinhaComeca = valor_linha
LinhaAcaba = valor_linha + 1

Set SearchRange = sht.Range(sht.Cells(LinhaComeca, 16), sht.Cells(LinhaAcaba, 16))

For Each Coluna In SearchRange
If Coluna.Value = Caixa_CondutoresNeutro.Text Then
NumLinha = Coluna.Row
Exit For
End If
Next Coluna

Valor_Comprimento = CDb1(CaixaTexto_Comprimento.Value)
Condutores_Paralelo = CDb1(Caixa_CondutoresParalelo.Value)
Worksheets("Estudo_Económico").Range("N" & 1000000).Value = Worksheets("Preço_Cabo").Cells(NumLinha, 18).Value
Preço_Unitario = Worksheets("Estudo_Económico").Range("N" & 1000000).Value
Preço_Unitariol = Preço_Unitario * Valor_Comprimento * Condutores_Paralelo
MsgBox ("O preço do disjuntor é igual a " & Preçool & "€" & " e o preço do cabo é igual a " & Preço_Unitariol & "€" & "!")

ElseIf CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = True And Caixa_Conductor.Text = "Cobre" Then

Set sht = ThisWorkbook.Worksheets("Preço_Cabo")
Set ProcuraColuna = sht.Range("V:V")
Set EncontraCelula = ProcuraColuna.Find(What:=Sc, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)
valor_linha = EncontraCelula.Row
LinhaComeca = valor_linha
LinhaAcaba = valor_linha + 1
Set SearchRange = sht.Range(sht.Cells(LinhaComeca, 23), sht.Cells(LinhaAcaba, 23))
For Each Coluna In SearchRange
If Coluna.Value = Caixa_CondutoresNeutro.Text Then
NumLinha = Coluna.Row
Exit For
End If
Next Coluna
Valor_Comprimento = CDb1(CaixaTexto_Comprimento.Value)
Condutores_Paralelo = CDb1(Caixa_CondutoresParalelo.Value)
Worksheets("Estudo_Económico").Range("N" & 1000000).Value = Worksheets("Preço_Cabo").Cells(NumLinha, 25).Value
Preço_Unitario = Worksheets("Estudo_Económico").Range("N" & 1000000).Value
Preço_Unitariol = Preço_Unitario * Valor_Comprimento * Condutores_Paralelo
MsgBox ("O preço do disjuntor é igual a " & Preçool & "€" & " e o preço do cabo é igual a " & Preço_Unitariol & "€" & "!")

ElseIf CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = False Then

Set sht = ThisWorkbook.Worksheets("Preço_Cabo")
Set ProcuraColuna = sht.Range("AA:AA")
Set EncontraCelula = ProcuraColuna.Find(What:=Sc, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)

valor_linha = EncontraCelula.Row

LinhaComeca = valor_linha
LinhaAcaba = valor_linha + 3

Set SearchRange = sht.Range(sht.Cells(LinhaComeca, 28), sht.Cells(LinhaAcaba, 28))

For Each Coluna In SearchRange
If Coluna.Value = Caixa_CondutoresFase.Text Then
NumLinha = Coluna.Row
Exit For
End If
Next Coluna

Valor_Comprimento = CDb1(CaixaTexto_Comprimento.Value)
Condutores_Paralelo = CDb1(Caixa_CondutoresParalelo.Value)
Worksheets("Estudo_Económico").Range("N" & 1000000).Value = Worksheets("Preço_Cabo").Cells(NumLinha, 29).Value
Preço_Unitario = Worksheets("Estudo_Económico").Range("N" & 1000000).Value
Preço_Unitariol = Preço_Unitario * Valor_Comprimento * Condutores_Paralelo
MsgBox ("O preço do disjuntor é igual a " & Preçool & "€" & " e o preço do cabo é igual a " & Preço_Unitariol & "€" & "!")

End If

```

```

Dim sh As Worksheet
Dim linhaValor As Long
Dim linha_valor1 As Long
Dim ColunaProcura As Range
Dim Coluna_Procural As Range
Dim CelulaEncontra As Range
Dim Celula_Encontral As Range
Dim LinhaInicio As Long
Dim LinhaFim As Long
Dim Inicio_Linhal As Long
Dim Fim_Linhal As Long
Dim Calibre_Ligação As Range
Dim Numero_Linha As Long
Dim Number_Linha As Long
Dim Preço_Transporte As Double
Dim Preço_Ligação As Double
Dim Preço_TransporteTotal As Double

ElseIf Caixa_CaboBarramento.Text = "Barramento" Then

If Caixa_Função.Text = "Transporte" And Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-C" Then

Calibre_Barramento = Caixa_CorrenteServiço.Text
Calibre_CaixaLigação = Caixa_Ligação.Text

Set sh = ThisWorkbook.Worksheets("Preço_Barramento")
Set ColunaProcura = sh.Range("A:A")
Set Coluna_Procural = sh.Range("E:E")

Set CelulaEncontra = ColunaProcura.Find(What:=Calibre_Barramento, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)
Set Celula_Encontral = Coluna_Procural.Find(What:=Calibre_CaixaLigação, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)

linhaValor = CelulaEncontra.Row
linha_valor1 = Celula_Encontral.Row

LinhaInicio = linhaValor
LinhaFim = linhaValor + 4

Inicio_Linhal = linha_valor1
Fim_Linhal = linha_valor1 + 4

Set SearchRange = sh.Range(sh.Cells(LinhaInicio, 1), sh.Cells(LinhaFim, 1))
Set SearchRangel = sh.Range(sh.Cells(Inicio_Linhal, 5), sh.Cells(Fim_Linhal, 5))

For Each Calibre In SearchRange
If Calibre.Value = Caixa_CorrenteServiço.Text Then
Numero_Linha = Calibre.Row
Exit For
End If

```

```

Next Calibre_Ligação

Valor_Comprimento1 = CDb1(CaixaTexto_Comprimento.Value)
Worksheets("Preço_Barramento").Activate
Worksheets("Preço_Barramento").Cells(1, 1).Value = Cells(Numero_Linha, 2).Value
Preço_Transporte = Worksheets("Preço_Barramento").Cells(1, 1).Value
Preço_Transporte1 = Preço_Transporte * Valor_Comprimento1
Worksheets("Preço_Barramento").Cells(1, 2).Value = Cells(Numero_Linha, 6).Value
Preço_Ligação = Worksheets("Preço_Barramento").Cells(1, 2).Value
Preço_TransporteTotal = Preço_Transporte1 + 2 * Preço_Ligação
Worksheets("Preço_Barramento").Cells(1, 3).Value = Preço_TransporteTotal
Worksheets("Estudo_Económico").Activate
Worksheets("Estudo_Económico").Cells(2, 105).Value = Preço_TransporteTotal

MsgBox ("O preço do barramento de transporte é igual a " & Preço_TransporteTotal & "€" & "!")

ElseIf Caixa_Função.Text = "Transporte" And Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-S" Then

Calibre_Barramento = Caixa_CorrenteServiço.Text
Calibre_CaixaLigação = Caixa_Ligação.Text

Set sh = ThisWorkbook.Worksheets("Preço_Barramento")
Set ColunaProcura = sh.Range("A:A")
Set Coluna_Procural = sh.Range("E:E")

Set CelulaEncontra = ColunaProcura.Find(What:=Calibre_Barramento, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)
Set Celula_Encontral = Coluna_Procural.Find(What:=Calibre_CaixaLigação, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)

linhaValor = CelulaEncontra.Row
linha_valor1 = Celula_Encontral.Row

LinhaInicio = linhaValor
LinhaFim = linhaValor + 4

Inicio_Linha1 = linha_valor1
Fim_Linha1 = linha_valor1 + 4

Set SearchRange = sh.Range(sh.Cells(LinhaInicio, 1), sh.Cells(LinhaFim, 1))
Set SearchRangel = sh.Range(sh.Cells(Inicio_Linha1, 5), sh.Cells(Fim_Linha1, 5))

For Each Calibre In SearchRange
If Calibre.Value = Caixa_CorrenteServiço.Text Then
Numero_Linha = Calibre.Row
Exit For
End If
Next Calibre

For Each Calibre_Ligação In SearchRangel
If Calibre_Ligação.Value = Caixa_Ligação.Text Then
Numero_Linha = Calibre_Ligação.Row
Exit For
End If
Next Calibre_Ligação

Valor_Comprimento1 = CDb1(CaixaTexto_Comprimento.Value)
Worksheets("Preço_Barramento").Activate
Worksheets("Preço_Barramento").Cells(1, 1).Value = Cells(Numero_Linha, 3).Value
Preço_Transporte = Worksheets("Preço_Barramento").Cells(1, 1).Value
Preço_Transporte1 = Preço_Transporte * Valor_Comprimento1
Worksheets("Preço_Barramento").Cells(1, 2).Value = Cells(Numero_Linha, 7).Value
Preço_Ligação = Worksheets("Preço_Barramento").Cells(1, 2).Value
Preço_TransporteTotal = Preço_Transporte1 + 2 * Preço_Ligação
Worksheets("Preço_Barramento").Cells(1, 3).Value = Preço_TransporteTotal
Worksheets("Estudo_Económico").Activate
Worksheets("Estudo_Económico").Cells(2, 105).Value = Preço_TransporteTotal

MsgBox ("O preço do barramento de transporte é igual a " & Preço_TransporteTotal & "€" & "!")

```

```

ElseIf Caixa_Função.Text = "Distribuição" And Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-C" Then

Calibre_Barramento = Caixa_CorrenteServiço.Text
Calibre_CaixaDerivação = Caixa_Derivação.Text
Set sh = ThisWorkbook.Worksheets("Preço_Barramento")
Set ColunaProcura = sh.Range("I:I")
Set Coluna_Procural = sh.Range("M:M")

Set CelulaEncontra = ColunaProcura.Find(What:=Calibre_Barramento, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)
Set Celula_Encontral = Coluna_Procural.Find(What:=Calibre_CaixaDerivação, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)

linhaValor = CelulaEncontra.Row
linha_valorl = Celula_Encontral.Row

LinhaInicio = linhaValor
LinhaFim = linhaValor + 5

Inicio_Linha = linha_valorl
Fim_Linha = linha_valorl + 6

Set SearchRange = sh.Range(sh.Cells(LinhaInicio, 9), sh.Cells(LinhaFim, 9))
Set SearchRangel = sh.Range(sh.Cells(Inicio_Linha, 13), sh.Cells(Fim_Linha, 13))

For Each Calibre In SearchRange
If Calibre.Value = Caixa_CorrenteServiço.Text Then
Numero_Linha = Calibre.Row
Exit For
End If
Next Calibre

For Each Calibre_Ligação In SearchRangel
If Calibre_Ligação.Value = Caixa_Derivação.Text Then
Number_Linha = Calibre_Ligação.Row
Exit For
End If
Next Calibre_Ligação

Valor_Comprimento1 = CDBl(CaixaTexto_Comprimento.Value)
Worksheets("Preço_Barramento").Activate
Worksheets("Preço_Barramento").Cells(1, 1).Value = Cells(Numero_Linha, 10).Value
Preço_Transporte = Worksheets("Preço_Barramento").Cells(1, 1).Value
Preço_Transporte1 = Preço_Transporte * Valor_Comprimento1
Worksheets("Preço_Barramento").Cells(1, 2).Value = Cells(Numero_Linha, 14).Value
Preço_Ligação = Worksheets("Preço_Barramento").Cells(1, 2).Value
Preço_TransporteTotal = Preço_Transporte1 + Preço_Ligação
Worksheets("Preço_Barramento").Cells(1, 3).Value = Preço_TransporteTotal
Worksheets("Estudo_Económico").Activate
Worksheets("Estudo_Económico").Cells(2, 105).Value = Preço_TransporteTotal
MsgBox ("O preço do barramento de distribuição é igual a " & Preço_TransporteTotal & "€" & "!")

```

```

ElseIf Caixa_Função.Text = "Distribuição" And Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-S" Then
Calibre_Barramento = Caixa_CorrenteServiço.Text
Calibre_CaixaDerivação = Caixa_Derivação.Text
Set sh = ThisWorkbook.Worksheets("Preço_Barramento")
Set ColunaProcura = sh.Range("I:I")
Set Coluna_Procural = sh.Range("M:M")
Set CelulaEncontra = ColunaProcura.Find(What:=Calibre_Barramento, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)
Set Celula_Encontral = Coluna_Procural.Find(What:=Calibre_CaixaDerivação, LookIn:=xlValues, LookAt:=xlWhole)

linhaValor = CelulaEncontra.Row
linha_valor1 = Celula_Encontral.Row
LinhaInicio = linhaValor
LinhaFim = linhaValor + 5

Inicio_Linha1 = linha_valor1
Fim_Linha1 = linha_valor1 + 6

Set SearchRange = sh.Range(sh.Cells(LinhaInicio, 9), sh.Cells(LinhaFim, 9))
Set SearchRangel = sh.Range(sh.Cells(Inicio_Linha1, 13), sh.Cells(Fim_Linha1, 13))

For Each Calibre In SearchRange
If Calibre.Value = Caixa_CorrenteServiço.Text Then
Numero_Linha = Calibre.Row
Exit For
End If
Next Calibre

For Each Calibre_Ligação In SearchRangel
If Calibre_Ligação.Value = Caixa_Derivação.Text Then
Number_Linha = Calibre_Ligação.Row
Exit For
End If
Next Calibre_Ligação

Valor_Comprimento1 = CDBl(CaixaTexto_Comprimento.Value)
Worksheets("Preço_Barramento").Activate
Worksheets("Preço_Barramento").Cells(1, 1).Value = Cells(Numero_Linha, 11).Value
Preço_Transporte = Worksheets("Preço_Barramento").Cells(1, 1).Value
Preço_Transporte1 = Preço_Transporte * Valor_Comprimento1
Worksheets("Preço_Barramento").Cells(1, 2).Value = Cells(Numero_Linha, 15).Value
Preço_Ligação = Worksheets("Preço_Barramento").Cells(1, 2).Value
Preço_TransporteTotal = Preço_Transporte1 + Preço_Ligação
Worksheets("Preço_Barramento").Cells(1, 3).Value = Preço_TransporteTotal
Worksheets("Estudo Econômico").Activate
Worksheets("Estudo Econômico").Cells(2, 105).Value = Preço_TransporteTotal
MsgBox ("O preço do barramento de distribuição é igual a " & Preço_TransporteTotal & "€" & "!")

End If
End If

End Sub

```

```

Private Sub Caixa_CaboBarramento_Change()

'Como a opção de cabo seja selecionada, os parâmetros associados ao barramento irão ser bloqueados e colocados numa cor diferente
If Caixa_CaboBarramento.Text = "Cabo" Then

Caixa_Função.Enabled = False
Caixa_CorrenteServiço.Enabled = False
Caixa_Ligação.Enabled = False
Caixa_Derivação.Enabled = False

Caixa_Função.BackColor = &H80000016
Caixa_CorrenteServiço.BackColor = &H80000016
Caixa_Ligação.BackColor = &H80000016
Caixa_Derivação.BackColor = &H80000016

CheckBox_ReduçãoNeutro.Enabled = True
Caixa_CondutoresParalelo.Enabled = True
Caixa_CondutoresFase.Enabled = True
Caixa_SecçãoCondutor.Enabled = True
Caixa_CalibreDisjuntores.Enabled = True
Caixa_PoderCorte.Enabled = True
Caixa_TipoDisjuntor.Enabled = True
Caixa_Curva.Enabled = True

CheckBox_ReduçãoNeutro.BackColor = &H80000005
Caixa_CondutoresParalelo.BackColor = &H80000005
Caixa_CondutoresFase.BackColor = &H80000005
Caixa_SecçãoCondutor.BackColor = &H80000005
Caixa_CalibreDisjuntores.BackColor = &H80000005
Caixa_PoderCorte.BackColor = &H80000005
Caixa_TipoDisjuntor.BackColor = &H80000005
Caixa_Curva.BackColor = &H80000005

```

```

'Caso a opção de barramento seja selecionada, os parâmetros associados ao cabo irão ser bloqueados e colocados numa cor diferente
ElseIf Caixa_CaboBarramento.Text = "Barramento" Then

CheckBox_ReduçãoNeutro.Enabled = False
Caixa_CondutoresParalelo.Enabled = False
Caixa_CondutoresFase.Enabled = False
Caixa_SecçãoCondutor.Enabled = False
Caixa_CalibreDisjuntores.Enabled = False
Caixa_PoderCorte.Enabled = False
Caixa_TipoDisjuntor.Enabled = False
Caixa_Curva.Enabled = False

CheckBox_ReduçãoNeutro.BackColor = &H80000016
Caixa_CondutoresParalelo.BackColor = &H80000016
Caixa_CondutoresFase.BackColor = &H80000016
Caixa_SecçãoCondutor.BackColor = &H80000016
Caixa_CalibreDisjuntores.BackColor = &H80000016
Caixa_PoderCorte.BackColor = &H80000016
Caixa_TipoDisjuntor.BackColor = &H80000016
Caixa_Curva.BackColor = &H80000016

Caixa_Função.Enabled = True
Caixa_CorrenteServiço.Enabled = True
Caixa_Ligação.Enabled = True
Caixa_Derivação.Enabled = True

Caixa_Função.BackColor = &H80000005
Caixa_CorrenteServiço.BackColor = &H80000005
Caixa_Ligação.BackColor = &H80000005
Caixa_Derivação.BackColor = &H80000005

End If

End Sub

Private Sub Caixa_Função_Change ()

'Caso a opção de "transporte" seja selecionada colocará na caixa respectiva à corrente de serviço, as correntes nominais existentes e fornecidas pelo fabricante
'Além disso, irá bloquear os parâmetros associados à função de distribuição
If Caixa_Função.Text = "Transporte" Then

Caixa_CorrenteServiço.AddItem "1250"
Caixa_CorrenteServiço.AddItem "1600"
Caixa_CorrenteServiço.AddItem "2000"
Caixa_CorrenteServiço.AddItem "2500"
Caixa_CorrenteServiço.AddItem "4000"

Caixa_Ligação.Enabled = True
Caixa_Função.BackColor = &H80000005
Caixa_Ligação.AddItem "1250"
Caixa_Ligação.AddItem "1600"
Caixa_Ligação.AddItem "2000"
Caixa_Ligação.AddItem "2500"
Caixa_Ligação.AddItem "4000"

Caixa_Derivação.Enabled = False
Caixa_Derivação.BackColor = &H80000016

'Caso a opção de distribuição seja selecionada colocará na caixa respectiva à corrente de serviço, as correntes nominais existentes e fornecidas pelo fabricante
'Além disso irá bloquear os parâmetros associados à função de transporte
ElseIf Caixa_Função.Text = "Distribuição" Then

Caixa_CorrenteServiço.AddItem "800"
Caixa_CorrenteServiço.AddItem "1250"
Caixa_CorrenteServiço.AddItem "1600"
Caixa_CorrenteServiço.AddItem "2000"
Caixa_CorrenteServiço.AddItem "2500"
Caixa_CorrenteServiço.AddItem "4000"

Caixa_Derivação.Enabled = True
Caixa_Derivação.BackColor = &H80000005
Caixa_Derivação.AddItem "100"
Caixa_Derivação.AddItem "400"
Caixa_Derivação.AddItem "630"
Caixa_Derivação.AddItem "1000"
Caixa_Derivação.AddItem "1250"

Caixa_Ligação.Enabled = False
Caixa_Ligação.BackColor = &H80000016

End If

End Sub

Private Sub Caixa_RegimeNeutro_Change ()

'Caso o regime de neutro seja o TN-C e o condutor de alumínio, foi necessário ter em conta que o a secção terá que ser superior a 16 mm2
If Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-C" And Caixa_Condutor.Text = "Aluminio" And CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = "True" Then

Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "-"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "16"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "25"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "35"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "50"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "70"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "95"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "120"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "150"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "185"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "240"

Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "-"
Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "16"
Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "25"
Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "35"
Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "50"
Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "70"
Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "95"
Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "120"

```

```

ElseIf Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-C" And Caixa_Condutor.Text = "Aluminio" And CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = "False" Then
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "-"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "16"

```

```

' Caso o regime de neutro seja o TN-C e o condutor de cobre foi necessário ter em conta que o a secção terá que ser superior a 10 mm2
ElseIf Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-C" And Caixa_Condutor.Text = "Cobre" And CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = "True" Then

```

```

Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "-"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "10"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "16"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "25"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "35"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "50"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "70"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "95"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "120"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "150"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "185"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "240"

```

```

Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "-"
Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "16"
Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "25"
Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "35"
Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "50"
Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "70"
Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "95"
Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "120"

```

```

ElseIf Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-C" And Caixa_Condutor.Text = "Cobre" And CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = "False" Then
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "-"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "10"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "16"

```

```

ElseIf Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-S" Then

```

```

Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "-"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "2.5"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "4"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "6"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "10"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "16"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "25"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "35"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "50"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "70"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "95"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "120"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "150"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "185"
Caixa_SecçãoCondutor.AddItem "240"

```

```

Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "-"
Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "16"
Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "25"
Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "35"
Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "50"
Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "70"
Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "95"
Caixa_SecçãoNeutro.AddItem "120"

```

```

End If

```

```

' Nesta condição foi atribuído de forma automática os valores à "Caixa_CondutoresFase" e à "Caixa_CondutoresNeutro" de acordo com o tipo de alimentação e o regime de neutro utilizado e à
' ativação ou não da "CheckBox_ReduçãoNeutro"

```

```

If CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = True And Caixa_Alimentação.Text = "Trifásico" And Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-C" Then

```

```

Caixa_CondutoresFase.Value = "3"
Caixa_CondutoresNeutro.Value = "1"

```

```

ElseIf CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = True And Caixa_Alimentação.Text = "Trifásico" And Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-S" Then

```

```

Caixa_CondutoresFase.Value = "3"
Caixa_CondutoresNeutro.Value = "2"

```

```

ElseIf CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = False And Caixa_Alimentação.Text = "Trifásico" And Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-C" Then
Caixa_CondutoresFase.Value = "4"

```

```

ElseIf CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = False And Caixa_Alimentação.Text = "Trifásico" And Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-S" Then
Caixa_CondutoresFase.Value = "5"

```

```

ElseIf CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = False And Caixa_Alimentação.Text = "Monofásico" And Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-C" Then
Caixa_CondutoresFase.Value = "2"

```

```

ElseIf CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = False And Caixa_Alimentação.Text = "Monofásico" And Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-S" Then
Caixa_CondutoresFase.Value = "3"

```

```

End If

```

```

'Nesta condição foi atribuído de forma automática os valores à "Caixa_TipoDisjuntor" de acordo com o tipo de alimentação e o regime de neutro utilizado
If Caixa_Alimentação.Text = "Monofásico" And Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-C" Then
Caixa_TipoDisjuntor.AddItem "1P"
Caixa_TipoDisjuntor.AddItem "-"

ElseIf Caixa_Alimentação.Text = "Monofásico" And Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-S" Then
Caixa_TipoDisjuntor.AddItem "1P + N"
Caixa_TipoDisjuntor.AddItem "2P"
Caixa_TipoDisjuntor.AddItem "-"

ElseIf Caixa_Alimentação.Text = "Trifásico" And Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-C" Then
Caixa_TipoDisjuntor.AddItem "3P"
Caixa_TipoDisjuntor.AddItem "-"

ElseIf Caixa_Alimentação.Text = "Trifásico" And Caixa_RegimeNeutro.Text = "TN-S" Then
Caixa_TipoDisjuntor.AddItem "3P + N"
Caixa_TipoDisjuntor.AddItem "4P"
Caixa_TipoDisjuntor.AddItem "-"

End If
End Sub

```

```

Private Sub Caixa_SecçãoCondutor_Change()

'Nesta condição foi atribuído de forma automática os valores à "Caixa_SecçãoNeutro"

If CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = "True" And Caixa_SecçãoCondutor.Value = "25" Then
Caixa_SecçãoNeutro.Value = "16"

ElseIf CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = "True" And Caixa_SecçãoCondutor.Value = "35" Then
Caixa_SecçãoNeutro.Value = "16"

ElseIf CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = "True" And Caixa_SecçãoCondutor.Value = "50" Then
Caixa_SecçãoNeutro.Value = "25"

ElseIf CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = "True" And Caixa_SecçãoCondutor.Value = "70" Then
Caixa_SecçãoNeutro.Value = "35"

ElseIf CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = "True" And Caixa_SecçãoCondutor.Value = "95" Then
Caixa_SecçãoNeutro.Value = "50"

ElseIf CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = "True" And Caixa_SecçãoCondutor.Value = "120" Then
Caixa_SecçãoNeutro.Value = "70"

ElseIf CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = "True" And Caixa_SecçãoCondutor.Value = "185" Then
Caixa_SecçãoNeutro.Value = "95"

ElseIf CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = "True" And Caixa_SecçãoCondutor.Value = "240" Then
Caixa_SecçãoNeutro.Value = "120"

End If

End Sub

```

```

'Esta rotina de código garantiu que apenas eram inseridos números na "CaixaTexto Comprimento"
Private Sub CaixaTexto_C Comprimento_KeyPress(ByVal KeyAscii As MSForms.ReturnInteger)

If KeyAscii < 48 Or KeyAscii > 57 Then
KeyAscii = 0
End If

End Sub

```

```

'Como exista redução do neutro, a "Caixa_SecçãoNeutro" e a "Caixa_CondutoresNeutro" serão ativadas
Private Sub CheckBox_ReduçãoNeutro_Click()
If CheckBox_ReduçãoNeutro.Value = True Then
Caixa_SecçãoNeutro.Enabled = True
Caixa_CondutoresNeutro.Enabled = True
Caixa_SecçãoNeutro.BackColor = &H80000005
Caixa_CondutoresNeutro.BackColor = &H80000005
Else
Caixa_SecçãoNeutro.Enabled = False
Caixa_CondutoresNeutro.Enabled = False
Caixa_SecçãoNeutro.BackColor = &H80000016
Caixa_CondutoresNeutro.BackColor = &H80000016
End If

End Sub

```

```

'Atribui de forma automática valores à "Caixa_CalibreDisjuntores" e à "Caixa_RegimeNeutro" de acordo com a informação presente numa folha auxiliar denominada por "Dados"
'Além disso, garante que no momento de inicialização do userform, a "Caixa_SecçãoNeutro" e a "Caixa_CondutoresNeutro" estão desativadas e com uma cor diferente dos restantes parâmetros
Private Sub UserForm_Initialize()

ult_linha = Sheets("Dados").Range("A2").End(xlDown).Row
Caixa_CalibreDisjuntores.RowSource = "Dados!A2:A" & ult_linha

ult_linhal = Sheets("Dados").Range("K2").End(xlDown).Row
Caixa_RegimeNeutro.RowSource = "Dados!K2:k3" & ult_linhal

Me.Caixa_SecçãoNeutro.Enabled = False
Me.Caixa_CondutoresNeutro.Enabled = False
Caixa_SecçãoNeutro.BackColor = &H80000016
Caixa_CondutoresNeutro.BackColor = &H80000016

End Sub

```

|Este código permite que, após o clique no botão iniciar, a "Worksheets("Estudo_Econômico")" seja ativada e a Userform apareça para dar início à introdução dos dados
Sub abrir_analise()

```
Worksheets("Estudo_Econômico").Activate  
EstudoEconomico.Show
```

End Sub

'Após a introdução dos dados, a informação presente na Userform será apagada, sendo possível voltar a colocar os parâmetros
Public Sub Limpar()

```
With EstudoEconomico  
.Caixa_Origem = ""  
.CaixaTexto_Destino = ""  
.CaixaTexto_Comprimento = ""  
.Caixa_Alimentacao = ""  
.Caixa_Condutor = ""  
.Caixa_CaboBarramento = ""  
.Caixa_RegimeNeutro = ""  
  
.Caixa_CalibreDisjuntores = ""  
.Caixa_SeccaoCondutor = ""  
.Caixa_SeccaoNeutro = ""  
.CheckBox_RedugaoNeutro = ""  
.Caixa_PodesCorre = ""  
.Caixa_Curva = ""  
.Caixa_TipoDisjuntor = ""  
.Caixa_CondutoresParalelo = ""  
.Caixa_CondutoresFase = ""  
.Caixa_CondutoresNeutro = ""  
  
.Caixa_Função = ""  
.Caixa_CorrenteServiço = ""  
.Caixa_Ligação = ""  
.Caixa_Derivação = ""
```

End With

End Sub

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Ismael Magalhães Kida

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

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

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

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

ISEP, Porto, 29 de junho de 2024