



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Eletrotécnica Energia e Automação

Proposta de subestação de alimentação dos Postos de Carregamento de Veículos Elétricos baseada em Transformadores de Tensão

Miguel Alexandre Cardoso Mota Oliveira

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Eletrotécnica – Ramo de Energia**

Orientador (es):

**Professor Doutor Francisco Alexandre Ganho da Silva Reis (ISEL)
Professor Doutor Filipe André de Sousa Figueira Barata (ISEL)**

Júri:

Presidente: Professor Doutor Luís Manuel Santos Redondo

Vogais:

**Professor Doutor João Hermínio Ninitas Lagarto
Professor Doutor Filipe André de Sousa Figueira Barata**

Janeiro de 2022

Resumo

A presente dissertação pretende apresentar a caracterização de uma subestação inovadora na forma de alimentar os postos de carregamentos de veículos elétricos (VE) a partir da rede de alta tensão (AT). Para além da descrição dos equipamentos que constituem a subestação, é efetuado o seu dimensionamento que possibilita a escolha dos equipamentos a instalar.

Este trabalho descreve igualmente o ponto de situação do carregamento elétrico em alguns países europeus, abordando e apresentando as tecnologias disponíveis ao desenvolvimento da infraestrutura. Numa Europa onde maioritariamente surgem soluções nacionais de desenvolvimento da rede de carregamento elétrico, são aqui apresentadas iniciativas públicas e privadas que embora promovam a implantação da infraestrutura de carregamento, demonstram as práticas pouco transversais entre países europeus.

O dimensionamento apresentado visa não só a obtenção das características necessárias à escolha dos equipamentos para a subestação da mobilidade elétrica (SME), mas também a validação da utilização dos transformadores de tensão de alta potência, como os equipamentos de muito alta tensão (MAT) capazes de promover a alimentação dos postos de carregamento de VE a partir da MAT. Estes transformadores, que vulgarmente se chamam transformadores de tensão para serviços auxiliares (TTSA) de acordo com a sua utilização, permitem assim abrir a possibilidade da implantação imediata da infraestrutura de carregamento elétrico a todo o território.

Palavras-Chave

Transformadores de Tensão para Serviços Auxiliares, Mobilidade Elétrica, Subestação para a Mobilidade Elétrica, Postos de Carregamento de Veículos Elétricos.

Abstract

The present dissertation intends to present the characterization of an innovative substation in the way of feeding electric vehicle (EV) charging stations from the high voltage network (HV). In addition to the description of the equipment that make up the substation, its dimensioning is carried out, allowing the choice of equipment to be installed.

This work also describes the status of electric charging in some European countries, approaching and presenting the technologies available for infrastructure development. In a Europe where mostly national solutions for the development of the electric charging network arise, public and private initiatives are presented here that, while promoting the implementation of the charging infrastructure, demonstrate the non-transversal practices between European countries.

The dimensioning presented aims not only to obtain the necessary characteristics for the choice of equipment for the electric mobility substation (EMS), but also to validate the use of high power voltage transformers, such as very high voltage (VHV) equipment capable of providing power to the stations charging EV from VHV. These transformers, which are commonly called voltage transformers for auxiliary services (VTAS) according to their use, thus open the possibility of the immediate implementation of the electric charging infrastructure throughout the territory.

Keywords

Voltage Transformers for Auxiliary Services, Electric Mobility, Electric Mobility Substation, Electric Vehicle Charging Stations.

Agradecimentos

Abracei este trabalho com uma enorme paixão pelo tema e ciente que seria o culminar de um percurso académico que tanto me agradou percorrer. Apesar de ao longo da construção do trabalho terem surgido momentos de incerteza e hesitação e apesar do momento pandémico em que o trabalho se desenrolou, acontecimento esse que tolda o pensamento a qualquer cidadão, o certo é que foi sempre encarado como um desafio que apenas poderia ter um resultado, a superação. Claro que só foi possível com a contributo e apoio de diversas pessoas.

Agradeço aos meus orientadores, Professor Francisco Reis e Professor Filipe Barata, todo o apoio prestado e todas as ideias sugeridas, motivando o alcance final do trabalho e contribuindo para o caminho percorrido.

Aos colegas de trabalho que contribuíram para a concretização deste desafio, destacando o Eng.º Jorge Martins, pela clarividência das suas palavras e ações inovadoras.

À minha família por toda a paciência e apoio, permitindo ter as reais condições para efetuar o trabalho mesmo subtraindo a minha presença junto deles.

Um reconhecimento muito especial à minha esposa Paula Tormenta por todo o incentivo e carinho que sempre demonstrou de forma incondicional.

A todos, o meu enorme obrigado.

Índice

Resumo.....	ii
Palavras-Chave	ii
Abstract	iii
Keywords.....	iii
Agradecimentos	iv
Índice	v
Índice de figuras	vii
Índice de Tabelas.....	viii
Lista de siglas/Abreviaturas	ix
Lista de Símbolos/Variáveis.....	xi
Capítulo I - Introdução	1
Enquadramento/Motivação.....	1
Objetivos	2
Estrutura.....	2
Capítulo II – Estratégias de carregamento elétrico	3
2.1 Estratégias de carregamento de VE na perspetiva do ORT.....	3
2.1.1. Contexto	3
2.1.2. Introdução	4
2.2. Cooperação entre ORT e ORD	4
2.3. Mercado de veículos elétricos e suas consequências	5
2.4. A Mobilidade Elétrica e o novo mercado	9
2.5. O ORT e o futuro na mobilidade elétrica	11
Capítulo III – Soluções tecnológicas de carregamento elétrico	14
3.1. Carregamento de VE na Europa: ponto de situação	14
3.2. Atuais soluções de ligação.....	16
3.3. Desenvolvimento da infraestrutura elétrica e de postos de carregamento.....	17
3.4. Stakeholders da Mobilidade Elétrica.....	18

3.5. Tecnologias de carregamento e iniciativas de apoio à sua implementação	19
3.6. Soluções de carregamento instaladas na Europa	21
Capítulo IV - Proposta de solução de alimentação de PCVE	24
4.1. Vantagens e desvantagens da ME.....	24
4.2 A solução e sua motivação	26
4.2.1. Apresentação sucinta da RNT	27
4.2.2. Descrição da solução	27
4.2.3. Principais tópicos da solução	29
4.3 Equipamento que constitui a solução e sua função.....	30
4.4. Operação da SME	39
4.5. Capacidade de expansão da solução.....	41
4.5.1. Locais de aplicação	42
4.5.2. Vantagens da solução.....	43
4.6. Dimensionamento-tipo da SME	44
4.6.1. Objetivos gerais.....	44
4.6.2. Localização e principais características.....	45
4.6.3. Disposição geral e tecnologia a implementar	45
4.6.4. Coordenação de isolamento	46
4.6.5. Correntes de curto-circuito	49
4.6.6. Rede geral de terra.....	61
Capítulo V – Conclusões	74
5.1. Principais conclusões.....	74
5.2. Sugestões de trabalho futuro.....	75
Referências Bibliográficas	77
Anexos	79
Anexo A - Características TTSA	79

Índice de figuras

Figura 1 – Apresentação do ecossistema da ME com diferenciados atores [2].....	5
Figura 2 – Soluções de veículos elétricos [2].....	6
Figura 3 – Apresentação dos países europeus com mais registos em 2020 [4]	7
Figura 4 – Valores globais de stock e vendas nos cenários apresentados [4].....	8
Figura 5 – Valores de consumo nos cenários apresentados, 2019, 2025 e 2030 [4]	9
Figura 6 – Número de carregadores públicos na EU (Road2Zero scenario) [6]	14
Figura 7 – Oferta de VE e carregadores públicos em todos os países da EU [6]	15
Figura 8 – Estado da arte das tecnologias de carregamento [2].....	19
Figura 9 – Incentivos de apoio à rede de carregamento de VE [5]	20
Figura 10 – Iniciativas para permitir uma utilização de VE entre zonas urbanas [5]	21
Figura 11 – Variáveis que condicionam a aceitação do VE pelo consumidor [15]	25
Figura 12 – Esquema unifilar da SME tipo	28
Figura 13 – Corte de painel e derivação MAT [18].....	30
Figura 14 – Soluções de interligação [19]	32
Figura 15 – Sec. Abertura horizontal.....	33
Figura 16 – TI com barra no primário e secundário com núcleo toroidal [19]	34
Figura 17 – Transformador de Tensão de Alta Potência.....	35
Figura 18 – Esquema unifilar simplificado do circuito de potência do QGD.....	39
Figura 19 - Fluxograma de comandos para energização da SME.....	40
Figura 20 – Fluxograma de comandos para energização da SME após U_{nula}	41
Figura 21 – Localização de potenciais SME	43
Figura 22 – Esquema simplificado da subestação tipo	46
Figura 23 – Apresentação de um curto-circuito baseado num esquema simplificado [20]	50
Figura 24 – Esquema para cálculo de curto-circuito no barramento K.....	51
Figura 25 – Esquema para cálculo de curto-circuito no barramento M	55
Figura 26 - Valores de U_{TP} em função do tempo de duração do defeito [24]	65

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Exemplos de discriminação positiva (benefícios não-financeiros) de VE [5].....	10
Tabela 2 – Exemplos de incentivos financeiros em vários países [5].....	11
Tabela 3 – Tipos de conectores e tomadas [8]	16
Tabela 4 – Tipos de conectores e tomadas [9]	17
Tabela 5 - Descrição dos vários tipos de atores [5].....	18
Tabela 6 – Principais características da solução [18].....	30
Tabela 7 – Principais cabos utilizados nas ligações MAT	31
Tabela 8 - Funções das proteções dos disjuntores BT	40
Tabela 9 - Principais características no ponto de ligação à rede	45
Tabela 10 - Distância específica mínima nominal (mm/kV) [24]	48
Tabela 11 - Nível de isolamento nominal dos equipamentos AT.....	49
Tabela 12 - Distâncias de isolamento [21]	49
Tabela 13 - Fatores de tensão [25].....	51
Tabela 14 - Características TTSA	56

Lista de siglas/Abreviaturas

AC	– Corrente Alternada (<i>Alternating Current</i>)
AT	– Alta Tensão
BEV	- Veículo 100% Elétrico (<i>Battery Electric Vehicle</i>)
BT	– Baixa Tensão
CC	– Curto-circuito
CCS	– Sistema de Carregamento Combinado (<i>Combined Charging System</i>)
CCTV	– Circuito Fechado de Televisão (<i>Closed-Circuit Television</i>)
CHAdEMO	– Método de Carregamento Rápido (<i>CHArge de MOve</i>)
CI	– Coluna de Isoladores
CPO	– Operador de Pontos de Carregamento (<i>Charge Points Operators</i>)
DC	– Corrente Contínua (<i>Direct Current</i>)
DSME	– Derivação para a Subestação da Mobilidade Elétrica
DST	– Descarregador de Sobretensões
ENTSO-E	– Rede Europeia de Operadores de Redes de Transporte (<i>European Network of Transmission System Operators for Electricity</i>)
EU	– União Europeia (<i>European Union</i>)
FCEV	– Veículo Elétrico de potência a partir do hidrogénio (<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i>)
GIS	– Subestação Isolada a Gás (<i>Gas Insulated Switchgear</i>)
HEV	- Veículo Elétrico Híbrido (<i>Hybrid Electric Vehicle</i>)
IEC	– Comissão Eletrotécnica Internacional (<i>International Electrotechnical Commission</i>)
LMAT	– Linha de Muita Alta Tensão
MAT	– Muito Alta Tensão
ME	– Mobilidade Elétrica
MOBI.E	– Entidade gestora de rede Mobilidade Elétrica
MT	- Média Tensão
OPCVE	– Operador do Posto de Carregamento de Veículos Elétricos
ORD	– Operador da Rede de Distribuição
ORT	– Operador da Rede de Transmissão
PC	– Ponto de Carregamento
PCVE	– Posto de Carregamento de Veículos Elétricos

PHEV - Veículo Elétrico Híbrido com carregamento (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*)

REE – Rede Elétrica de Espanha (*Red Eléctrica de España*)

REN – Redes Energéticas Nacionais

RND – Rede Nacional de Distribuição

RNT – Rede Nacional de Transporte

RSSPTS - Regulamento de Segurança de Subestações e Postos de Transformação e Seccionamento

RT – Rede de Transporte

RTIEBT – Regras Técnicas de Instalações Eléctricas de Baixa Tensão

SCADA - Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (*Supervisory Control and Data Acquisition*)

SDS – Cenário de Desenvolvimento Sustentável (*Sustainable Development Scenario*)

SF6 – Hexafluoreto de enxofre

SI – Seccionador de Isolamento

SME – Subestação para a Mobilidade Elétrica

SPCC – Sistemas de Proteção e Comando e Controlo

STEPS – Cenário de políticas estipuladas (*Stated Policies Scenario*)

T&E - Transporte e Meio Ambiente (*Transport and Environment*)

TCO - Custo total de propriedade (*Total Cost of Ownership*)

TI – Transformador de Intensidade

TTSA – Transformador de Tensão para Serviços Auxiliares

V2G – Abreviatura do termo “*Vehicle-two- Grid*”

VE – Veículo Elétrico

Lista de Símbolos/Variáveis

A	- Área total da subestação	m^2
c	- Fator de carga para a corrente de curto-circuito	
D	- Distância da quadrícula da malha	m
d	- Diâmetro do cabo de cobre	m
D_f	- Fator de depreciação correspondente ao tempo de duração do defeito	
d_{min}	- Diâmetro mínimo do condutor	mm
E_m	- Tensão de malha	V
h	- Profundidade de enterramento da rede de terra	m
h_0	- Profundidade de referência	m
I'_Z	- Corrente admissível na canalização	A
$I_{b\ BT}$	- Corrente de base na BT	A
$I_{b\ MAT}$	- Corrente de base na MAT	kA
I_G	- Corrente máxima que flui da rede para a terra	kA
I_K''	- Corrente de curto-circuito máxima defeito fase-terra	kA
I_{K3}	- Corrente máxima de curto-circuito trifásico	pu
$I_{K3\ max}$	- Corrente máxima de curto-circuito trifásico	kA
$I_{M\ max}$	- Corrente de curto-circuito máxima em amperes	A
$I_{M\ max}$	- Corrente de curto-circuito máxima no ponto M	A
$I_{MBT\ max}$	- Corrente de curto-circuito máxima no ponto M	pu
$I_{n\ BT}$	- Corrente nominal na BT	A
$I_{rt\ pu}$	- Corrente do TTSA	A
K_0	- Inverso do coeficiente de variação da resistividade	$^{\circ}C$
k_1, k_2	- Fatores de correção da temperatura e radiação	
K_i	- Fator de correção relativamente à irregularidade da corrente	kA
K_{ii}	- Fator de correção para redes com ou sem elétrodos de terra na periferia	
K_m	- Fator de malha definido para n condutores paralelos	
l	- Comprimento do cabo	m
L_c	- Comprimento total de condutores enterrados na rede de terra	m
L_p	- Perímetro da rede	m
L_r	- Comprimento total dos elétrodos de terra enterrados	m
L_T	- Comprimento total dos condutores na rede de terra	m
L_v	- Comprimento de cada piquete	m
L_x	- Comprimento máximo da rede na direção dos eixos "xx"	m

Proposta de subestação de alimentação dos Postos de Carregamento de Veículos Elétricos baseada em Transformadores de Tensão

L_x	- Comprimento da instalação	m
L_y	- Comprimento máximo da rede na direção dos eixos “yy”	m
L_y	- Largura da instalação	m
$P_{kr\ pu}$	- Potência de perdas do TTSA	W
$R_{Cabo\ 20^0}$	- Resistência do cabo BT, obtida com valor de temperatura a 20 ⁰	Ω
R_g	- Resistência da rede de terra	Ω
R_K	- Resistência no ponto K	pu
R_{TTSA}	- Resistência do transformador de tensão	pu
S_b	- Potência de base	MVA
S_K''	- Potência de curto-circuito no ponto K	pu
$S_{Kcc\ max}$	- Potência de curto-circuito máxima no ponto K	MVA
S_{min}	- Secção mínima dos condutores	mm^2
S_n	- Potência aparente dos transformadores de tensão	MVA
S_{rt}	- Potência estipulada do TTSA	VA
T_a	- Temperatura ambiente	$^{\circ}C$
t_c	- Tempo de duração da corrente de defeito	s
$TCAP$	- Capacidade térmica por unidade de volume	$J\ cm^{-3}\ ^{\circ}C^{-1}$
t_f	- Tempo de duração do defeito	s
T_m	- Temperatura máxima permitida	$^{\circ}C$
U_K	- Tensão nominal no ponto K	pu
U_n	- Tensão nominal no ponto K	pu
U_n	- Tensão nominal da rede	V
$U_{n\ BT}$	- Tensão nominal na BT	V
U_{rt}	- Tensão estipulada do TTSA	V
U_{TP}	- Tensão máxima de contacto tolerável pelo corpo humano	V
$X_{Cabo\ 20^0}$	- Reatância do cabo BT, obtida com valor de temperatura a 20 ⁰	Ω
X_K	- Reatância no ponto K	pu
X_{TTSA}	- Reatância do transformador de tensão	pu
Z_K	- Impedância no barramento K	pu
$Z_{M\ BT}$	- Impedância equivalente no ponto M	pu
α_r	- Coeficiente de variação da resistividade à temperatura de referência	$^{\circ}C^{-1}$
ρ	- Resistividade média do solo	Ωm
ρ_{20^0}	- Resistividade do cobre (Cu) a 20 ⁰	Ωm
ρ_r	- Resistividade do solo à temperatura de referência	Ωm

Capítulo I - Introdução

Enquadramento/Motivação

As alterações climáticas são, para além de um problema atual, um problema global que exige respostas concertadas a nível global e ações adequadas a nível local. Com o intuito de mitigar os impactos das alterações climáticas é preciso reduzir as emissões de gases com efeito de estufa e adaptar cada região às mudanças previsíveis, de forma a diminuir os efeitos prejudiciais das alterações climáticas nos ecossistemas e na qualidade de vida da população. O setor dos transportes na Europa é responsável por uma tranche significativa das emissões de gases de efeito de estufa [1], perspetivando-se que enfrente diferentes desafios nos próximos anos.

A mobilidade elétrica (ME) surge como uma oportunidade para um transporte mais sustentável, possibilitando através de uma gestão correta do carregamento elétrico a possibilidade de gerar benefícios relevantes também para o setor de energia. Considerando ainda as diversas metas no sentido da redução de emissões de CO₂, os VE assumirão cada vez mais um papel importante na indústria automóvel. Dezenas de milhões de VE entrarão em cena progressivamente, impactando também o setor de energia, em termos de geração e adequação da rede. Logo deve surgir uma infraestrutura capaz de integrar os vários tipos de atores para disponibilizar o acesso fluido e sem restrições ao carregamento dos VE.

Considerando que a adoção do VE depende também da “ansiedade do consumidor” acerca do fácil acesso e tempo de carregamento, deve a infraestrutura ser implementada de forma mais rápida do que o crescente número de VE nas estradas, promovendo assim uma transição bem-sucedida. Naturalmente que diversas soluções têm sido implementadas pelos diversos países europeus e embora apresentem-se como ações de resultados positivos, as mesmas apresentam-se como soluções particularmente regionais, ultrapassando poucas fronteiras. No sentido da uniformização de políticas e ações podem ser chamados a agir operadores do setor elétrico, com experiência na gestão de redes elétricas de MAT [2]. São estas redes que, de uma forma inovadora, podem apresentar soluções que permitam disponibilizar a potência necessária à implantação de uma rede de carregamento elétrico.

Objetivos

O objetivo da dissertação “Proposta de subestação de alimentação dos Postos de Carregamento de Veículos Elétricos baseada em Transformadores de Tensão” é apresentar uma topologia modular de subestação que permita adaptar-se a possíveis solicitações locais sempre em linha com as condições técnicas disponibilizadas pelo ponto de ligação à rede. Nesse sentido pretende-se efetuar o estudo da forma de ligação e respetivo dimensionamento da subestação que permita a alimentação de posto de carregamento de veículos elétricos (PCVE). Este objetivo assenta numa caracterização inicial do papel que os operadores da rede de transporte (ORT) europeus devem assumir no apoio e gestão do carregamento elétrico e numa identificação do estado atual e incentivos à implantação das infraestruturas de carregamento em alguns países da Europa.

Estrutura

A organização desta dissertação está dividida em cinco capítulos e um anexo. No presente capítulo é efetuado um enquadramento dos assuntos a serem estudados e são definidos os objetivos que se pretendem alcançar.

No capítulo II pretende-se percorrer um caminho através da perspetiva dos ORT na Europa e o papel que o organismo que os agrega pode ter na real implantação da ME. São também abordadas as orientações por parte da União Europeia (UE).

O capítulo III é dedicado à análise do carregamento elétrico através da caracterização do atual ponto de situação europeu, nomeadamente no que refere à verificação de soluções de ligação e de desenvolvimento de infraestruturas de apoio. Neste capítulo, são ainda abordados as tecnologias de carregamento e os atores que influenciam a ME, terminando com a partilha de vários projetos e soluções que visam promover o carregamento elétrico em alguns países europeus.

O capítulo IV assume a apresentação da solução em estudo. É enquadrada a descrição da solução de alimentação de PCVE com as vantagens e desvantagens da ME. É identificada a capacidade de expansão da solução inovadora, para além da apresentação do dimensionamento de uma subestação direcionada para a ME.

No capítulo V são apresentadas as conclusões finais e as sugestões de futuros trabalhos relacionados com o tema.

Capítulo II – Estratégias de carregamento elétrico

2.1 Estratégias de carregamento de VE na perspetiva do ORT

2.1.1. Contexto

No âmbito do organismo europeu ENTSO-E, constituído pelos ORT, foi identificado que a ME é um meio para a promoção da descarbonização e, em simultâneo, permitir o fornecimento de serviços flexíveis de apoio ao sistema elétrico.

A concretização duma distribuição em larga escala de VE estará ligada ao desenvolvimento de uma infraestrutura de carregamento capaz de superar as barreiras psicológicas da falta de pontos de abastecimento e da adoção de um processo de carregamento inteligente que satisfaça as pretensões cada vez mais ambiciosas dos condutores de VE.

Um processo de carregamento de VE que possa gerir o momento em que ocorre e o respetivo perfil, pode influenciar um maior aproveitamento da geração de energia renovável, permitindo assim a redução de emissões de CO₂.

Do ponto de vista dos ORT, para uma adequada integração na rede, a melhor solução para o carregamento seja por intermédio da implementação do carregamento inteligente ou de soluções tipo V2G, deve considerar e seguir os seguintes passos:

- Promover o planeamento coordenado da infraestrutura de carregamento e respetiva rede elétrica, tendo também em consideração a profusão de PCVE de grandes dimensões com supercarregadores¹ instalados;
- Promover a gestão do processo de carregamento, permitindo a criação de um sistema inteligente que permita a suavização dos picos de carga, trazendo em simultâneo para os proprietários de VE e para as redes de energia;

¹ Carregadores rápidos de potência de 50kW ou mais (atualmente já existem protótipos de 600kW), que permitem o carregamento simultâneo de dois VE em AC e DC.

- Capacitar tecnicamente os diversos intervenientes no sistema com o intuito de adotar práticas comuns de forma a permitir a interoperabilidade das redes de carregamento e dados;
- Aprimorar a cooperação entre o ORT e o operador de rede de distribuição (ORD);
- Apoiar as autoridades reguladoras na implementação de regras de mercado e de estrutura regulatória;

2.1.2. Introdução

O transporte rodoviário é responsável por mais de 70% [1] das emissões de gases de efeito de estufa originadas pelo setor dos transportes e tendo em consideração as metas traçadas pela Comissão Europeia para a redução emissões de CO₂ de acordo com a “Lei Europeia do Clima”², o crescente número de VE assumirá um importante papel nessa redução pretendida. A ME será, pois, um vetor crucial para acelerar a descarbonização e a redução da poluição, contribuindo para um transporte mais sustentável.

De acordo com a publicação “Electric Vehicles integration into power grids” [2], da ENTSO-E, os ORT devem dar o seu contributo ao debate técnico quer no concerne às diversas soluções de conectividade, como também aos processos de carregamento e regulamentação adotada. Desta forma permite-se que as soluções avancem inicialmente como projetos piloto e/ou demonstrações na fase de crescimento acentuado da difusão do VE, permitindo identificar os constrangimentos de natureza tecnológica e de integração na rede, evitando soluções futuras mais onerosas.

2.2. Cooperação entre ORT e ORD

Atualmente os ORD são os principais interlocutores na relação existente entre os utilizadores dos VE e o setor da distribuição de energia, assumindo os ORT uma posição de relevo com o aumento de VE a circular e consequente impacto na rede.

² A Lei Europeia do Clima, de julho de 2021, estabelece uma meta juridicamente vinculativa de zero emissões de gases com efeito de estufa até 2050. Entre outras propostas, é exigido que nos veículos ligeiros e de mercadorias, segmentos onde as emissões de CO₂ são mais elevadas, as emissões médias de carros novos caiam 55% a partir de 2030 e 100% a partir de 2035 em comparação com os níveis de 2021.

Será necessário o envolvimento dos ORT durante o processo da ME, em particular na fase de planeamento da rede, em virtude das cargas que surgirão devido à infraestrutura de carregamento, e também na oportunidade da gestão flexível de soluções utilizando o carregamento inteligente.

No entanto uma melhor coordenação entre os diversos agentes da ME, sejam os ORT, ORD, intervenientes do mercado ou utilizadores de VE, fará com que o sistema energético controle melhor os fluxos energéticos e mantenha os seus níveis de segurança. Todas as soluções que forem encontradas no âmbito da eletrificação do setor dos transportes farão com que os ORT apoiem e integrem um sistema único que integra outros sistemas e atores conforme identificado no “Research, Development & Innovation Roadmap 2020 – 2030” [3], da ENTSO-E e ilustrado na Figura 1.

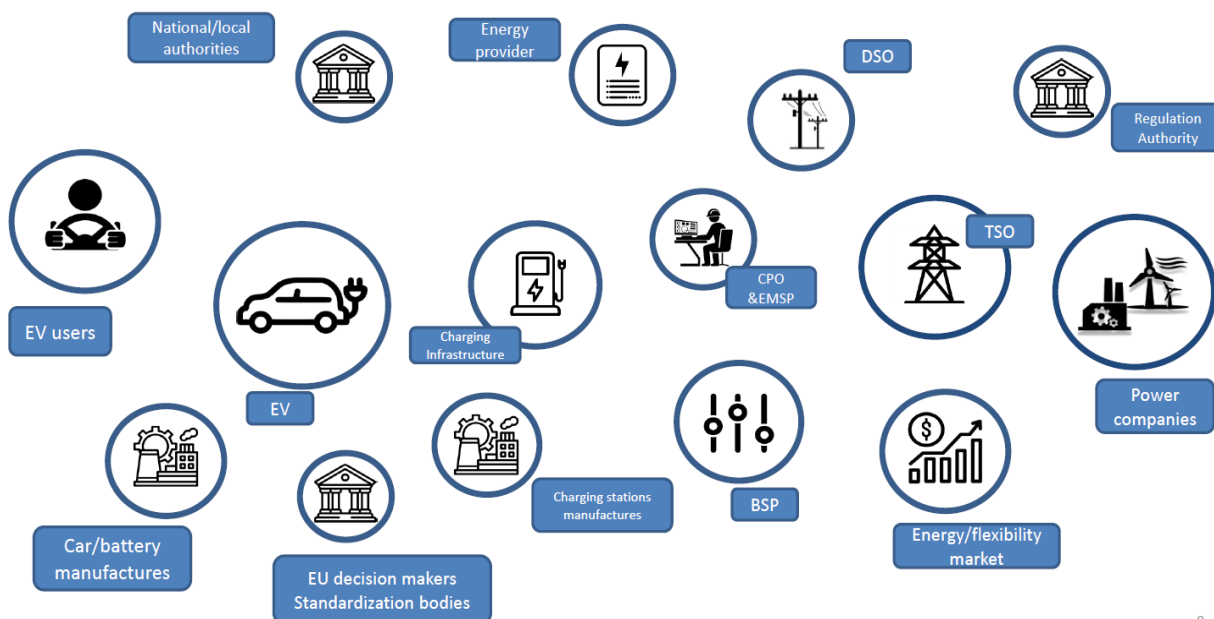


Figura 1 – Apresentação do ecossistema da ME com diferenciados atores [2]

2.3. Mercado de veículos elétricos e suas consequências

Atualmente o mercado de VE é fornecido por fabricantes de automóveis com linhas de produção específicas. Apesar das soluções tecnológicas existentes ilustradas na Figura 2, o mercado pode ser dividido em dois principais segmentos, de acordo com o preço de venda do VE, onde o

segmento standard fica abaixo dos 40.000 € e o segmento topo de gama atingirá valores até 100.000 € ou mais. Ambos os segmentos caracterizam-se por integrar VE de baterias de diferentes capacidades e autonomias, destacando-se ainda os veículos elétricos híbridos plug-in. Presentemente existem cerca de três dezenas de modelos disponíveis nos dois segmentos de VE de funcionamento exclusivo com baterias enquanto que pode-se encontrar no mercado cerca de cinco dezenas de VE híbridos plug-in.

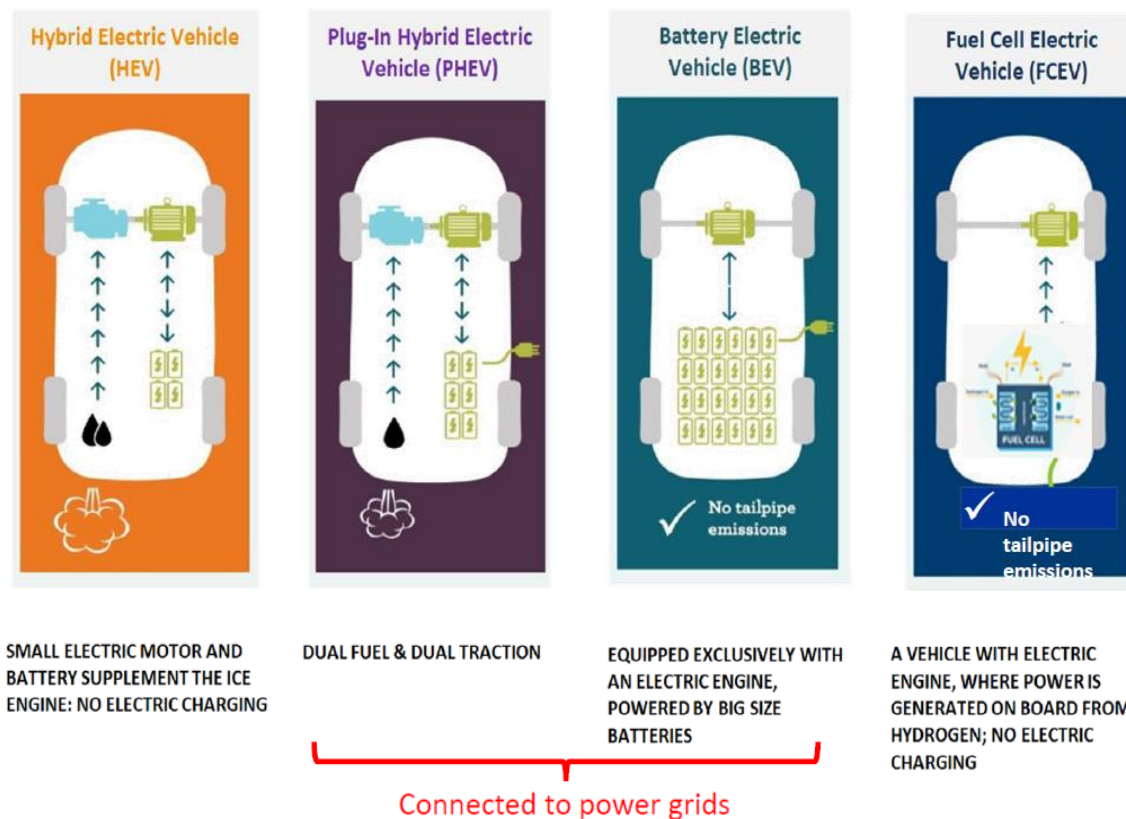


Figura 2 – Soluções de veículos elétricos [2]

Atualmente circulam mais de 1,5 milhões de VE na Europa [2], tendo este número aumentado de forma significativa nos últimos anos. A percentagem de vendas de VE é superior no norte da Europa em relação às vendas na Europa central. A Alemanha é o país onde mais veículos elétricos são vendidos seguido da França e Suécia (Figura 3).

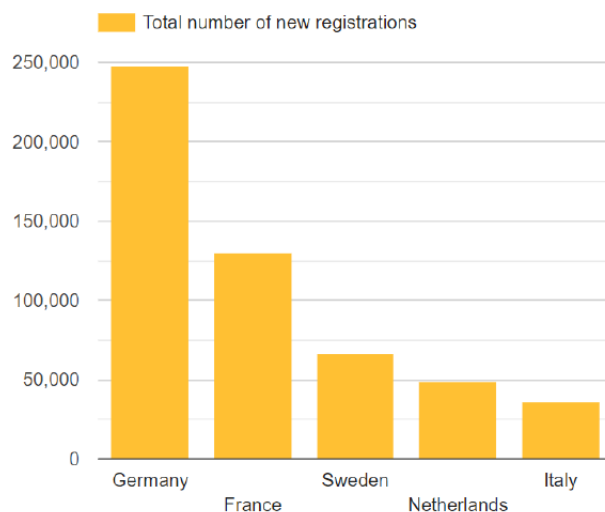


Figura 3 – Apresentação dos países europeus com mais registos em 2020 [4]

No que concerne a estimativas de evolução futuras, o relatório “Global EV Outlook 2020” da IEA [4], apresenta dois cenários de desenvolvimento da ME para 2030 em todo o mundo: 1-Stated Policies Scenario (STEPS)³; 2-Sustainable Development Scenario (SDS)⁴.

Na análise STEPS, o valor global de VE (não contabilizando os veículos de duas / três rodas) sofre um aumento de cerca de 8 milhões em 2019 para 50 milhões em 2025 e perto de 140 milhões de VE em 2030, equivalendo a um crescimento médio anual próximo a 30% (Figura 4). Com este aumento contínuo nas vendas, é expetável que os VE assumam cerca de 7% da frota global de veículos até 2030. Ainda de acordo com o mesmo cenário, o valor de VE vendidos atingirá quase 14 milhões em 2025 e 25 milhões de veículos em 2030, representando assim 10% e 16% de todos vendas de veículos rodoviários, respetivamente.

Na análise SDS, o valor global de VE atinge cerca de 80 milhões de veículos em 2025 e 245 milhões de veículos em 2030 (não contabilizando os veículos de duas / três rodas).

³ visa ilustrar o impacto das medidas políticas existentes e anunciadas

⁴ considera políticas mais agressivas para limitar o aumento da temperatura global abaixo de 1,7-1,8 ° C.

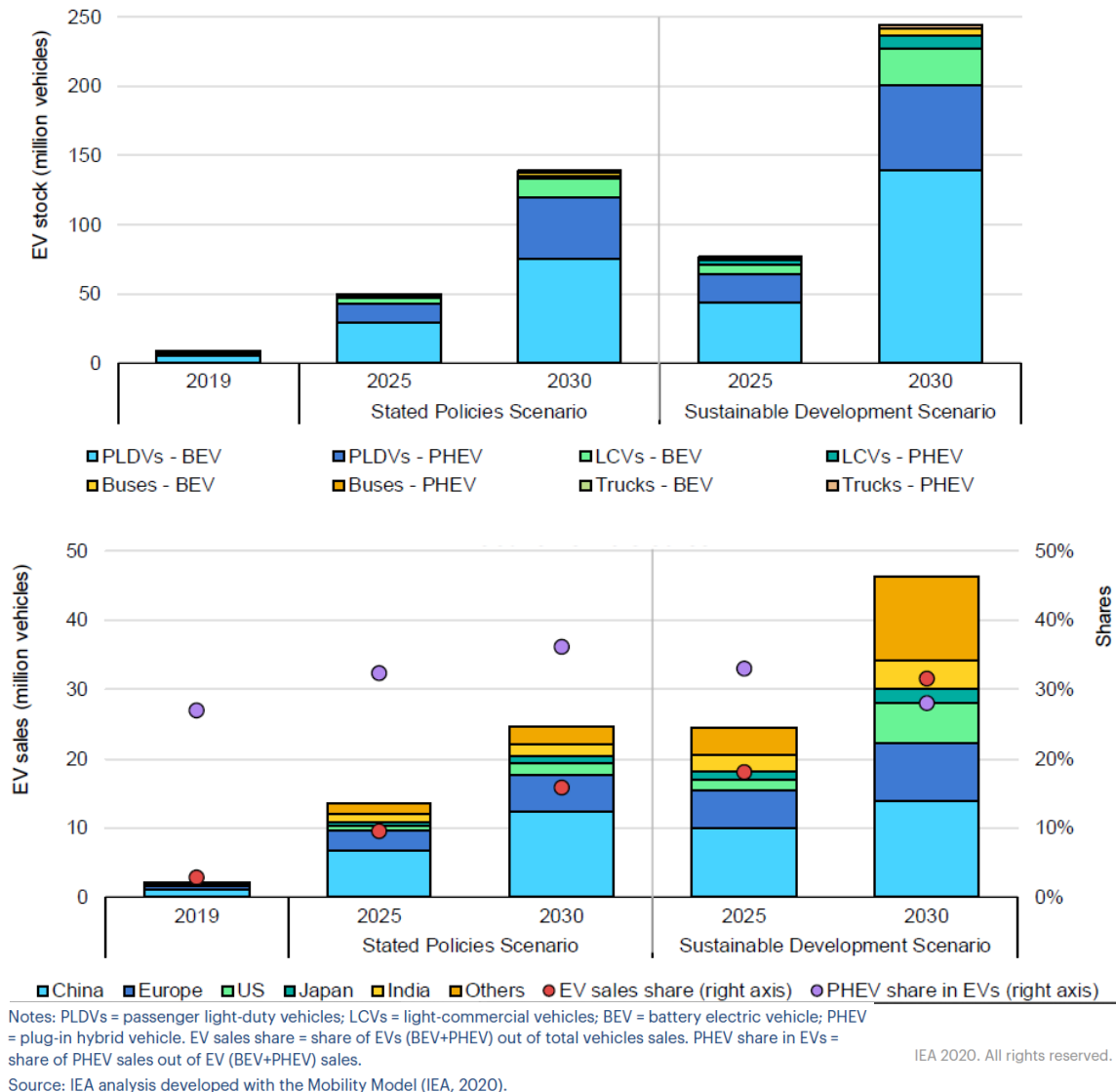


Figura 4 – Valores globais de stock e vendas nos cenários apresentados [4]

Recentemente o número de pontos de carregamento publico na Europa ultrapassou as 200.000 unidades. Cerca de 90% inserem-se no segmento de carregadores de baixa potência (≤ 22 kW), o segmento de “carregadores rápidos” ocupa os restantes 10%, com potências de 50 kW ou mais. O parâmetro chave na implantação territorial do carregamento elétrico é a relação número de veículos / pontos de carregamento público.

Segundo STEPS, em 2030 os VE serão responsáveis por um consumo de 550 TWh (Figura 5), traduzindo-se num aumento em cerca de seis vezes relativamente aos níveis de 2019. Neste cenário é equacionado que o consumo de energia devido aos VE chegue a 4% do total de eletricidade consumida na Europa. Segundo o SDS o consumo crescerá quase onze vezes relativamente a 2019, aproximando-se de 1000 TWh (Figura 5).

No entanto estes valores ainda são pouco impactantes ao nível da potência disponível de geração, **demonstrando que os desafios colocados pela ME não se colocam num futuro próximo ao nível da produção de energia**, embora sejam relevantes os picos de carga que poderão surgir local e regionalmente.

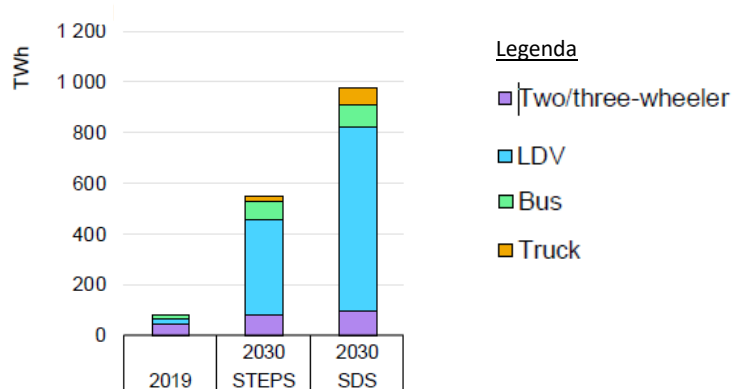


Figura 5 – Valores de consumo nos cenários apresentados, 2019, 2025 e 2030 [4]

2.4. A Mobilidade Elétrica e o novo mercado

Naturalmente que o utilizador do VE sairá beneficiado se a ME for um veículo para a criação de um novo mercado, assumindo aí o Estado e diversas entidades públicas o seu desenvolvimento, promovendo incentivos e estímulos, quer de natureza financeira quer não-financeira. Nesse sentido, diversas cidades europeias já implementaram várias medidas orientadas no sentido da discriminação positiva dos VE (Tabela 1).

Tabela 1 – Exemplos de discriminação positiva (benefícios não-financeiros) de VE [5]

AMSTERDÃO	PARIS	BARCELONA	LONDRES	OSLO
• Prioridade na atribuição de autorizações de estacionamento • Estacionamento gratuito em determinadas zonas, desde que o veículo esteja ligado ao poste de carregamento • Utilizadores do serviço de <i>electric car sharing</i> Car2Go podem utilizar os postos de carregamento instalados na cidade e podem estacionar em todos os estacionamentos na cidade sem que o condutor incorra em custos adicionais	• Estacionamento temporário gratuito • <i>Car sharing</i> Autolib (100% elétrico) funcionando em regime de parceria público privada entre o grupo privado Bolloré e vários municípios da região de Paris • Utilizadores Autolib podendo reservar o seu espaço de estacionamento e de carregamento	• Carregamentos gratuitos em postos de carregamento localizados na via pública • Estacionamento gratuito em zonas reguladas da cidade	• Desconto de 100% na <i>Congestion Charge</i> • Estacionamento gratuito ou a preços reduzidos, em várias zonas de Londres	OSLO • Utilização das vias dedicadas a transportes públicos (via BUS) • Acesso a parques de estacionamento exclusivos para VE OUTROS MUNICÍPIOS • Isenção de tarifas de circulação • Viagens gratuitas em <i>ferries</i> • Estacionamento e eletricidade gratuitos em mais de 5.000 pontos de carregamento em todo o país • Estacionamento temporário gratuito em todos os espaços municipais

DISCRIMINAÇÃO POSITIVA DE VE'S				
FACILIDADES DE ESTACIONAMENTO (ex: parques exclusivos, descontos e gratuidades no estacionamento)	FACILIDADES DE CARREGAMENTO (ex: carregamentos gratuitos na via pública)	FACILIDADES DE CIRCULAÇÃO (ex: utilização de vias de transporte público)	DESCONTOS OU ISENÇÕES DE TAXAS (ex: isenção de <i>Congestion Charge</i>)	CAR SHARING DE VE'S

De acordo com os incentivos não-financeiros suprarreferidos, os municípios podem associar-se, nas suas áreas de intervenção, à criação de um mercado de ME através da atribuição de:

- Facilidades de estacionamento em zonas de elevado tráfego;
- Facilidades de carregamento em várias zonas, nomeadamente zonas históricas e/ ou centrais, assegurando uma menor poluição e ruído em áreas que importa particularmente preservar;
- Facilidades de circulação em vias reservadas, sinalizando um benefício claro e imediatamente perceptível pelos cidadãos;
- Outros benefícios de natureza não financeira.

Por outro lado, tem-se assistido já à promoção de alguns incentivos financeiros para os VE em vários países europeus (Tabela 2). Com destaque surgem os utilizadores de grandes frotas de veículos, quer sejam de mercadorias, passageiros ou de aluguer, onde numa fase inicial de troca de tipo de VE, são direccionados diversos incentivos com o intuito de encorajar essa ação.

Tabela 2 – Exemplos de incentivos financeiros em vários países [5]

PAÍS	IVA	IMPOSTO NA AQUISIÇÃO/ MATRÍCULA (UMA VEZ)	IMPOSTO DE CIRCULAÇÃO	OUTROS SUBSÍDIOS
Portugal	23% (dedução total na aquisição de VE)	Baseado na cilindrada, tipo de combustível e emissões (BEV estão isentos, redução para veículos híbridos e PHEV)	Baseado no tipo de combustível, cilindrada e emissões (BEV estão isentos)	4.500€ na aquisição de BEV novo e 3.250€ para PHEV novo
Noruega	25% (BEV estão isentos)	Baseado no peso do veículo, potência do motor e emissões (BEV estão isentos)	Cerca de 350€	
Dinamarca	25%	Baseado principalmente no preço do veículo (VE com menos de 2.000kg estão isentos)	Baseado no consumo de combustível (BEV's com menos de 2.000kg estão isentos) Imposto de rendimento dos veículos de empresa baseado no respetivo preço	
Holanda	21%	Baseado no nível de emissões do veículo (BEV e maioria dos PHEV estão isentos)	Baseado no peso do veículo, tipo de combustível e nível de emissões (BEV e maioria do PHEV estão isentos) Imposto de rendimento dos veículos de empresa baseado no nível de emissões (BEV e alguns PHEV estão isentos)	
França	19,6%	Baseado na potência do motor (EV's estão isentos)	Imposto de rendimento dos veículos de empresa baseado no nível de emissões (BEV e alguns PHEV estão isentos)	Até 7.000€ para veículos elétricos
Alemanha	19%		Baseado na cilindrada e nível de emissões do motor (VE estão isentos durante 10 anos) Imposto de rendimento dos veículos de empresa baseado no respetivo preço (VE têm deduções)	

2.5. O ORT e o futuro na mobilidade elétrica

Os ORT terão diversas razões para tomar a dianteira do processo da emergente ME, quer como operadores de rede quer como interlocutores com os respetivos serviços de mercado. Dado o impacto que as infraestruturas de carregamento terão na rede de transporte, serão chamados os ORT a planear e coordenar a expansão da rede primária necessária. O plano de expansão da rede deverá ter em conta a necessidade de abastecimento de postos de carregamento de grandes dimensões junto das principais vias rodoviárias, onde será requerida um grande valor de potência elétrica que deve ser solicitada diretamente à rede MAT da responsabilidade dos ORT, pois no sentido de proporcionar confiança no utilizador de VE o carregamento nesses locais será efetuado preferencialmente com carregadores rápidos e em grande número (à semelhança da quantidade de pontos de abastecimento de combustível fóssil).

Assume particular importância a cooperação entre ORT e ORD, uma vez que ambos são chamados a planejar a adaptação da rede, a previsão da carga, a operação da rede e o despacho do sistema. Claro que a gestão do processo de carregamento necessita de um franco compromisso entre os atores do mercado e os operadores da rede.

Com o intuito de cumprir com os diversos objetivos já enumerados e sempre orientados para a prestação de um melhor serviço aos utilizadores de veículos elétricos devem os ORT estabelecer planos de ação onde:

- Avaliem os diferentes serviços de rede a serem prestados, através do desenvolvimento de projetos-piloto;
- Analisem as potenciais oportunidades criadas pela ligação dos VE à rede e respetivos efeitos que decorrem desse processo;
- Promovam a cooperação com restantes operadores de rede e de mercado e com as autoridades reguladoras, permitindo assim alcançar as melhores soluções para desbloquear todo o potencial dos VE no fornecimento de serviços;
- Deverão apresentar estratégias de interação com os diversos setores com capacidade de tomada de decisão no capítulo da implantação de novas regras de acesso a mercado e nova definição de tarifas;
- Em conjuntos com os operadores de carregamento e operadores de sistema, incentivar os utilizadores de VE a participarem em esquemas inteligentes de carregamento;
- Promovam uma contínua monitorização da evolução do setor de VE, atentos a novas tendências da ME, novos combustíveis alternativos e respetivos desenvolvimentos tecnológicos.

Na tentativa de alcance duma real justiça social na transição para a ME, deverão ser encontradas soluções que permitam uma cobertura abrangente da infraestrutura de carregamento, em particular do carregamento rápido. É nesse sentido que a UE deve oferecer às autoridades locais a possibilidade de beneficiarem de um mecanismo de financiamento específico para atualizar a rede em áreas urbanas e implantar centros de carregamento. Esses postos de carregamento de grandes dimensões devem incluir vários carregadores normais (11-22kW), rápidos (50kW) e ultrarrápidos (150 kW) e ter pontos de carregamento que podem ser reservados e priorizados para VE compartilhados e veículos de logística urbana.

Por outro lado, sendo o carregamento rápido um pilar importante para a difusão dos veículos elétricos e respetiva confiança no setor por parte dos seus utilizadores, e reconhecendo-se que existem regiões e países menos ricos especialmente fora das áreas urbanas, onde normalmente a infraestrutura elétrica não tem condições para satisfazer a curva de carga necessária, deverão ser criados programas pela UE direcionados às autoridades regionais dessas áreas mais remotas. Esses programas podem passar, por exemplo, pela atribuição de vouchers com a definição de quantias fixas destinadas a cobrir o custo total do equipamento e instalação de carregadores DC rápidos. As cidades mais pequenas e com menor número de habitantes, também devem ser visadas, dado que geralmente têm menos capacidade de aceder a mecanismos de financiamento e normalmente também possuem menos tráfego de VE.

Problema identificado # Conseguirá ser obtida a coordenação entre o regulador, operador de carregamento e operador de rede para definição dos locais de construção de novas linhas ou subestações na rede primária.

Capítulo III – Soluções tecnológicas de carregamento elétrico

3.1. Carregamento de VE na Europa: ponto de situação

A abordagem até agora efetuada evidenciou a necessidade da elaboração de mais regulamentação por parte da UE e a fomentação de um regime específico de incentivos para o desenvolvimento da ME no espectro europeu. A orientação, para serem os ORT os reais motores das diretrizes da UE rumo à descarbonização, ainda não é visível em todos os estados membros e menos ainda junto dos utilizadores dos VE. Assim, tem sido o setor da distribuição elétrica (ORD), os operadores de pontos de carregamento (CPO) e algumas empresas de fabricantes de VE que têm dinamizado a implementação de redes de carregamento elétrico. De acordo com o relatório “Recharge EU: how many charge points will Europe and its Members States need in 2020s” [6] apresentado pela organização não governamental T&E⁵, existe a **necessidade de ser criada uma infraestrutura adicional de carregamento de VE em toda a UE, tendo por base cerca de 1,3 milhões de pontos de carregamento público serem necessários até 2025 e cerca de 3 milhões em 2030**, de acordo com o cenário mais agressivo “Road2Zero⁶”, aí apresentado.

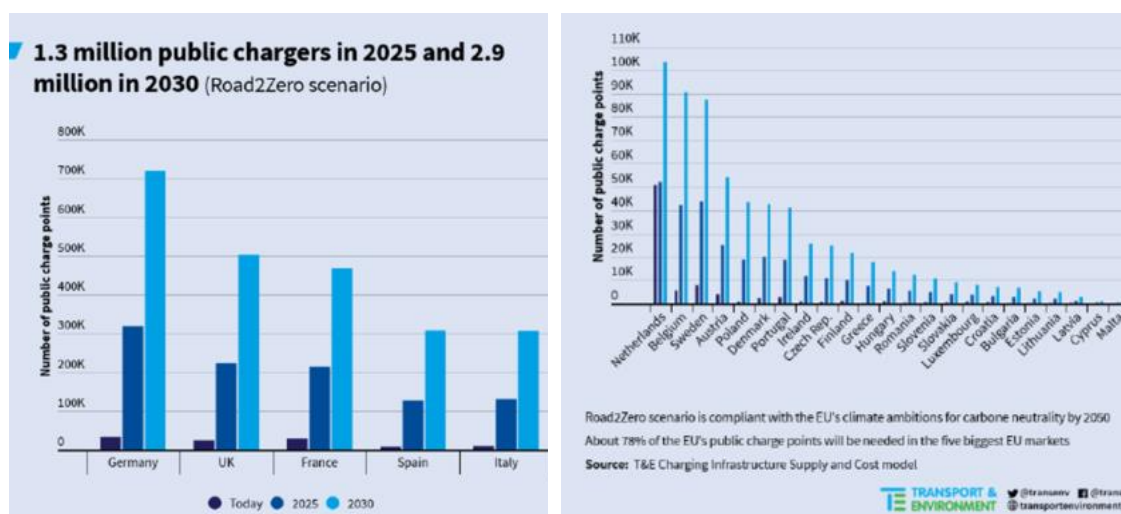


Figura 6 – Número de carregadores públicos na EU (Road2Zero cenário) [6]

⁵ T&E-Transport and Environment: é uma organização sem fins lucrativos especializada em mobilidade sustentável, poluição do ar, aviação, transporte marítimo, transporte sustentável, mobilidade elétrica.

⁶ cenário de maior ambição em linha com os objetivos da UE de alcançar a neutralidade climática em 2050, tendo como uma das metas a venda do ultimo carro de combustão em solo europeu em 2035.

No sentido da não discriminação da população de locais mais remotos ou de franjas mais desfavorecidas a UE definiu na sua Diretiva sobre a implantação da Infraestrutura de Combustíveis Alternativos [7], a criação de uma rede com 1 posto de carregamento por cada 10 veículos elétricos. Nos últimos anos essa rede tem sofrido alterações no número de VE por ponto de carregamento público, aumentando de 5 para 7. A Figura 7 apresenta uma imagem geral da distribuição de pontos de carregamento público e do número de VE nas estradas em toda a Europa [6]. Três estados (Países Baixos, Noruega e Luxemburgo) não surgem na figura porque têm um número muito elevado de VE por habitante.

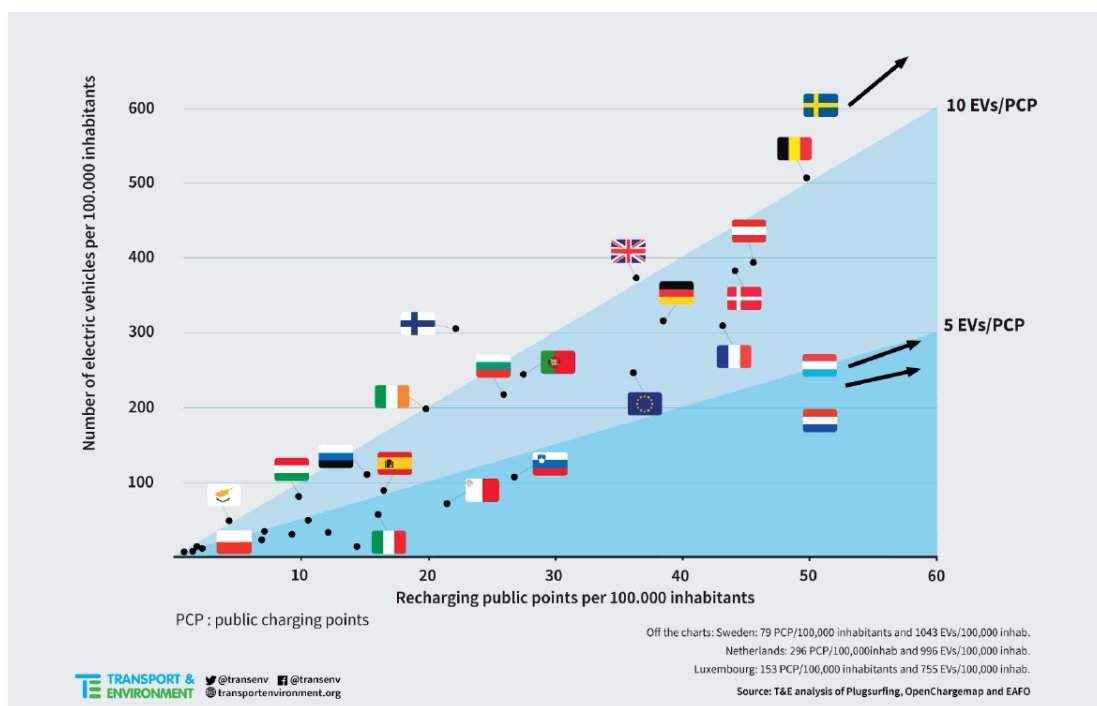


Figura 7 – Oferta de VE e carregadores públicos em todos os países da EU [6]

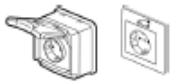
Segundo a organização T&E, para uma maior consistência na análise, apenas os carregadores com os padrões de carregamento da UE devem ser contados: Combo CCS e Tipo 2 (ver ponto 3.3.), sendo também importante identificá-los por diferentes potências de carregamento e categorias (velocidade de carregamento), representando assim corretamente a repartição em cada Estado-Membro, de modo a evitar a sua duplicação. Para uma correta uniformização também os pontos de carregamento públicos inferiores a 3kW devem ser excluídos da contabilização. Um ponto de carregamento duplo ou tri-padrão, normalmente CCS, CHAdeMO e Tipo 2 rápido, pode ser contado como dois, um CCS e um Tipo 2 (ver ponto 3.3.), desde que os dois possam ser usados ao mesmo tempo na sua potência máxima (sempre com duas vagas distintas de estacionamento). O método de contabilização destes carregadores deve ser

harmonizado a nível europeu, segundo a Comissão Europeia, permitindo assim a obtenção de dados semelhantes por país e evitando a contagem dupla.

3.2. Atuais soluções de ligação

Um Ponto de Carregamento (PC) são todos os equipamentos utilizados no fornecimento de energia elétrica aos VE, através do carregamento das suas baterias. Podem ser instalados num único ou em vários armários, podendo ainda assegurar outras funções, como o controlo e comunicação [8]. Atualmente os modelos existentes integram um módulo de comunicação que efetua a interface entre o utilizador e a Rede de ME. A forma como é efetuada a ligação entre o PC e o VE depende do modo de carregamento, do tipo de conexão e dos diversos modelos de VE. Podemos identificar os PC pelo tipo de tomadas que integram e pela potência que disponibilizam. Na Tabela 3 estão representados os tipos de ligações disponíveis em Portugal e instalados na rede MOBI.E ou numa instalação elétrica de cariz particular ou coletiva.

Tabela 3 – Tipos de conetores e tomadas [8]

Exemplos	Descrição	Norma de fabrico	Características estipuladas
	Tomadas para usos domésticos e análogos, compatível com carga de VE em modo 1 ou em modo 2 ⁽¹⁾	NP 1260 ⁽²⁾⁽³⁾ tipo 1	16 A – 250 V (2P+T)
	Tomadas para usos industriais, compatível com carga de VE em modo 1 ou em modo 2 ⁽¹⁾	Normas da série EN 60309 ⁽²⁾ tipo 1	16 A – 6h/200/250 V 32 A – 6h/200/250 V (2P+T) 16 A – 6h/380/415 V 32 A – 6h/380/415 V (3P+N+T)
	Tomada de corrente dedicada para carga de VE em modo 3 ⁽¹⁾	EN 62196-2 Tomada do tipo 2	70 A – 250 V (monofásico) 63 A – 380/480 V (trifásico)
	Conetor móvel para carga de VE em modo 3 ⁽¹⁾	EN 62196-2 Conetor do tipo 2	70 A – 250 V (monofásico) 63 A – 480 V (trifásico)
	Conetor móvel para carga de VE em modo 4 “Combo 2”	EN 62196-3 Configuração FF	200 A – 1 000 V
	Conetor móvel para carga de VE em modo 4 “CHAdemo”	EN 62196-3 Configuração AA	200 A – 600 V

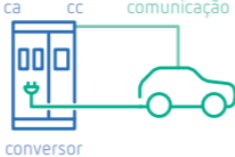
(1) – De acordo com as RTIEBT:2006, nas zonas onde o público tenha acesso, nos estabelecimentos recebendo público, e em locais de habitação, as tomadas de corrente estipulada não superior a 16 A devem ser do tipo “tomadas com obturadores”. Quando forem de corrente estipulada superior a 16 A, as tomadas, se não forem do tipo “tomadas com obturadores” devem ser dotadas de tampa. Em locais apenas acessíveis a BA4 (pessoas instruídas) e BA5 (pessoas qualificadas) é admissível a instalação de tomadas sem obturadores.

(2) – As correntes estipuladas indicadas são as definidas nesta norma, mas os fabricantes podem indicar um valor inferior de corrente para o carregamento de VE.

(3) – Tomadas especialmente concebidas para carregamento de VE, marcadas e declaradas pelo fabricante como adequadas para o efeito.

O modo de carregamento do VE é uma série de parâmetros relacionados com o tipo de ligação, tipo de cabo, velocidade de carregamento, segurança e comunicação que se estabelecem entre o nosso veículo e o equipamento de carregamento. Atualmente, existem 4 modos de carregamento [9], como é visível na Tabela 4.

Tabela 4 – Tipos de conetores e tomadas [9]

M1	M2	M3	M4
			
Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
Conexão direta do veículo à rede	Conexão direta do veículo à rede	Conexão direta do veículo à rede	Conexão indireta do veículo à rede, através do carregador externo
Tomada de corrente não dedicada; Cabo simples; Risco sobreaquecimento;	Tomada de corrente não dedicada; Cabo com dispositivo de comunicação e supervisão de carregamento	Tomada de corrente dedicada com monitorização de carga; Cabo dedicado;	Tomada externa de corrente direta com monitorização de carregamento; cabo dedicado;

3.3. Desenvolvimento da infraestrutura elétrica e de postos de carregamento

Para acompanhar a implantação de VE a circular na Europa em 2030, segundo o cenário “Road2Zero” [6], a infraestrutura elétrica terá que se adaptar. A expansão das redes elétricas tem um tempo próprio para a sua concretização, envolvendo o planeamento, a autorização regulatória, o projeto e respetiva construção do ativo, sendo que qualquer aceleração ao movimento descrito acrescerá sempre um aumento dos custos na implantação da nova rede. Na Europa existem diversos projetos de expansão da rede com o objetivo de abastecer diretamente os postos de carregamento elétrico, tendo um custo de cerca de 20.000 a 30.000 euros por MW [6] em instalações próximas a edifícios existentes como centros comerciais ou hotéis, enquanto no caso das áreas de serviço nos grandes eixos rodoviários, pode ser dez vezes mais quando a rede precisar de ser expandida para o local, devendo ser ainda adicionados os custos da infraestrutura de carregamento elétrico. O investimento necessário no desenvolvimento da infraestrutura de postos públicos de carregamento (incluindo o equipamento, a instalação e upgrades da rede elétrica) até finais de 2020 é de 600 milhões de Euros, chegando aos 1,8 mil milhões anuais em 2025 e atingindo os 2,9 mil milhões de Euros em

2030 [6]. Cumulativamente, este valor atinge cerca de 20 mil milhões de Euros. Se for considerado que no mesmo período o investimento privado alcança três vezes mais o valor público, então serão alcançados na Europa cerca de 80 mil milhões de Euros de investimento até 2030. No entanto, esse montante fica muito abaixo do investimento na infraestrutura de transporte rodoviário na UE e que se situa anualmente em 100 mil milhões de Euros.

3.4. Stakeholders da Mobilidade Elétrica

A infraestrutura de ME integra vários tipos de atores que, através de múltiplas relações contratuais e da rede física, interagem para disponibilizar o serviço de ME ao cliente final. Na Tabela 5 surge uma breve descrição dos principais atores associados à ME.

Tabela 5 - Descrição dos vários tipos de atores [5]

Ator	Descrição
Comercializador de Fornecimento de Energia	Empresas licenciadas para comercialização de energia, seja de produção própria ou adquirida no mercado.
Operador da Rede de Transporte (ORT)	Entidade que é responsável pelo fornecimento de energia através de uma rede de transmissão/ transporte numa dada área geográfica (incluindo a organização do despacho).
Operador da Rede de Distribuição (ORD)	Entidade que detém e gere os ativos das redes de distribuição de baixa, média tensão e alta tensão. Responsável por interligar todos os pontos de consumo ao sistema elétrico e assegurar a segurança e fiabilidade da rede para fornecimento de energia a todos os clientes.
Operador de Pontos de Carregamento (OPC)	Entidade que opera a infraestrutura de carregamento de um ponto de vista técnico (i.e., controlo do acesso, recolha de informação, manutenção/ reparação, etc...). Este operador poderá não ser o proprietário da estação de carregamento, devendo, neste caso, pagar uma renda pela respetiva exploração. Poderá existir uma distinção entre o “operador técnico” e o “operador comercial” que fornece serviços ao condutor do veículo elétrico. Os operadores com atividade comercial poderão vender em conjunto o fornecimento de energia com o serviço de carregamento, ou apenas o serviço de carregamento sem o fornecimento de energia.
Prestador de Serviço de Mobilidade Elétrica	Vende serviços de mobilidade elétrica aos clientes. O serviço poderá incluir o acesso fluido (sem pagamento local) a estações de vários Operadores de Estações de Carregamento. Pode integrar outros serviços complementares (Ex: localização do veículo, estacionamento, etc...).

Câmara de Compensação

Plataforma global que integra os fluxos de informação entre os Prestadores de Serviços de Mobilidade e os Operadores de Estações de Carregamento. Possibilita o fluxo de dados que assegura o acesso irrestrito dos clientes de um dado Prestador de Serviços de Mobilidade a qualquer estação de carregamento de outros prestadores. Permite a compensação financeira entre Prestadores de Serviços (utilização da sua rede por clientes de outros Prestadores) e a inerente informação detalhada de consumos extra-rede para faturação aos clientes.

3.5. Tecnologias de carregamento e iniciativas de apoio à sua implementação

Existem diferentes tecnologias disponíveis para carregamento de VE. Conforme apresentado na Figura 8, algumas das soluções são físicas, usando métodos convencionais de condução de eletricidade através de fios, sendo as mais difundidas, pois garantem o nível de potência e segurança necessários; outras soluções funcionam sem fios (explorando os princípios de indutividade) e estão sendo estudadas para aplicação em estradas, promovendo o carregamento dinâmico em simultâneo com o percurso, no entanto ainda estão num estágio inicial, com desenvolvimento a longo prazo. Por último, a solução de troca de bateria será para aplicações especiais (corridas de carros) onde a rapidez é fundamental.

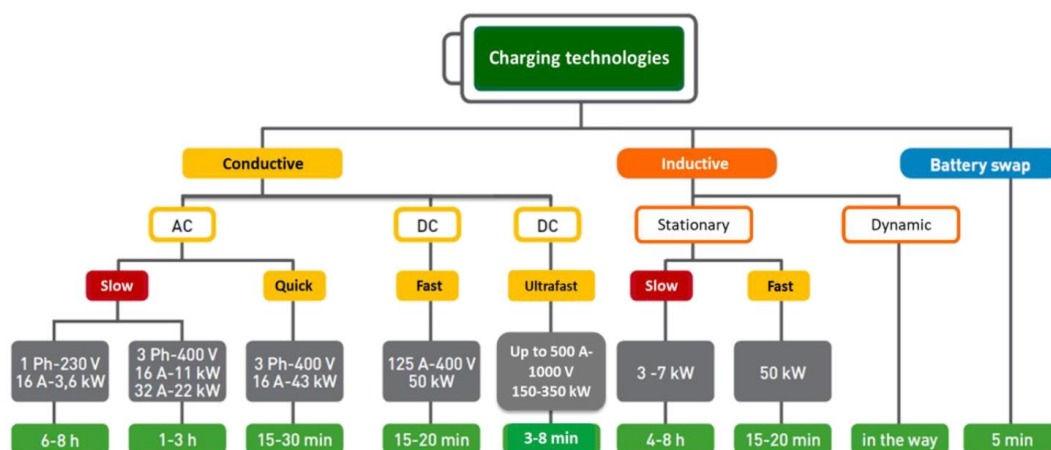


Figura 8 – Estado da arte das tecnologias de carregamento [2]

Tempo de carregamento atribuído à carga de 20 kWh (autonomia 100-150 km)

Os carregadores podem ser assim distinguidos em várias categorias, salientando os mais importantes:

- Carregadores AC monofásicos (até 3,6 kW): carregamento efetuado entre 6 a 8 horas;

- Carregadores AC trifásicos (11 – 22 KW): carregamento efetuado entre 1 e 3 horas;
- Carregadores DC rápidos (até 50 kW): carregamento efetuado entre 15 a 20 minutos;
- Carregadores DC ultrarrápidos (acima de 150 kW): carregamento efetuado entre 3 a 8 minutos.

O carregamento lento ligado por cabo tem sido a opção preferencialmente escolhida pela generalidade do mercado. Ao nível da Europa, a concretização da infraestrutura de carregamento pública tem sido impulsionada essencialmente pelo financiamento do setor público através de iniciativas nacionais, regionais e municipais (Figura 9). No entanto o cariz local destas redes é identificado como um dos maiores entraves à implementação da ME. Com o intuito de resolver esta situação e progredir na criação da rede, estão a surgir na Europa iniciativas de financiamento e investimento em postos rápidos num conjunto alargado de autoestradas que visa permitir a utilização do VE, entre zonas urbanas e internacionais (Figura 10).

PAÍS	INICIATIVA	PONTOS DE CARREGAMENTO INSTALADOS (2013)
Reino Unido	44M€ para instalação de pontos de carregamento em locais residenciais, nas ruas e em espaços do setor público (Objetivo de instalar 13.500 PC domésticos e 1.500 PC nas ruas até 2015)	Carregamento lento: ~3.000 Carregamento rápido: ~150
França	250M€ para cobrir 50% da infra-estrutura de carregamento de EV (custo de equipamento e instalação) (Locais da administração pública envolvidos nos projetos de infra-estrutura)	Carregamento lento: ~1.700 Carregamento rápido: ~100
Dinamarca	10M€ para o desenvolvimento da infra-estrutura de carregamento	Carregamento lento: ~3.800 Carregamento rápido: ~120
Finlândia	5M€ reservados para o desenvolvimento da infra-estrutura (Parte do programa nacional de desenvolvimento dos VE's)	Carregamento lento: n/a Carregamento rápido: n/a
Noruega	10M€ para o desenvolvimento da infra-estrutura de carregamento	Carregamento lento: ~1.300 Carregamento rápido: ~90
Alemanha	Governo suporta atividades de I&D para tecnologias de carregamento rápido e indutivo Incentiva autoridades locais a fomentar infra-estruturas de carregamento, no entanto deixa a construção das mesmas para o investimento privado	Carregamento lento: ~2.800 Carregamento rápido: ~50
Holanda	Governos introduz incentivos fiscais para ajudar a criar a infra-estrutura de carregamento	Carregamento lento: ~6.000 Carregamento rápido: ~120

Outros países europeus têm uma política ativa de apoio público ao desenvolvimento de infra-estrutura

Figura 9 – Incentivos de apoio à rede de carregamento de VE [5]

ESTÓNIA	DINAMARCA	HOLANDA
PROJETO ELMO • Iniciado pelo governo em parceria com a Mitsubishi • 165 carregadores rápidos espalhados no país, criando uma cobertura nacional	CLEVER • Investimento conjunto das 5 maiores utilities • Operador nacional de mobilidade elétrica • 50 carregadores rápidos instalados e mais 50 planeados	FASTNED • 4 dos 200 carregadores rápidos já instalados • Instalados ao longo das estações de serviço das auto-estradas • Baseado num <i>business case</i> de negócio
FRANÇA	ALEMANHA	TESLA
CORRI-DOOR • 2 dos 200 carregadores rápidos já instalados • Instalados num conjunto alargado de estações de serviço das auto-estradas operadas pela SANEF • Integrado num esquema nacional cofinanciado pela UE (Programa TEN-T) e um consórcio liderado pelo grupo EDF	• Programa para instalar 8 carregadores rápidos DC ao longo da auto-estrada Munique-Leipzig (via Nuremberga) • Consórcio de várias empresas alemãs, suportado por um fundo estatal	SUPERCHARGER • Criar corredores de ME ao longo da Europa • Instalar estações de carregamento de 120KW ao longo dos principais corredores em tráfico • Mais de 14 estações já estão instaladas na Noruega, Alemanha, Holanda, Áustria e Suíça

Figura 10 – Iniciativas para permitir uma utilização de VE entre zonas urbanas [5]

3.6. Soluções de carregamento instaladas na Europa

Diversas soluções têm sido instaladas em alguns países europeus, de implantação nacional ou apenas de forma regional. Os exemplos, que de seguida se apresentam, refletem a baixa coordenação na Europa, evidenciando práticas singulares dos diversos países.

Espanha [10]

Um exemplo de ação surge por parte da empresa espanhola responsável pela rede de transporte de alta tensão, a REE, onde através de acordo com a Federação Espanhola de Municípios disponibiliza às autarquias assistência técnica na ME e o acesso ao centro de controlo de VE, permitindo agilizar a gestão inteligente dos pontos de carga. Embora este centro de comando seja pioneiro na Europa e existam garantias de que a rede de energia espanhola está preparada para a introdução de 100.000 pontos de carregamento até 2030, a questão é a alimentação destes postos depender da infraestrutura de distribuição de energia, podendo estar mais limitada na resposta ao crescente incremento de carga.

Polónia [11]

Outra solução para a redução de emissões de CO₂ foi implementada em algumas cidades polacas, com a introdução na frota de uma operadora de transporte de passageiros de veículos totalmente elétricos. A gestão inteligente da frota e respetivas rotas, leva a que o carregamento seja efetuado durante a noite, durante o estacionamento dos veículos na garagem, ocorrendo também durante o dia, através de carregadores rápidos de 300 kW, e sempre que estejam em estações terminais. Este carregamento ocorre em cerca de oito minutos. Dada a potência necessária e o local citadino onde ocorre o carregamento, é exigido um rigor na forma inteligente como é gerida a circulação da frota, evitando assim picos de carga na rede de distribuição, pois nas cidades torna-se mais difícil promover outro tipo de alimentação e de grande potência.

Itália [12]

Uma parceria desenvolvida pela construtora Porsche com a elétrica italiana Enel X permitiu a instalação de estações de carregamento de alta potência nas estações de serviço da Q8 (distribuidoras de combustíveis da Kuwait Petróleo Itália). Estão previstos serem disponibilizados até 300 kW de potência por cada coluna de carregamento, tendo a construtora o objetivo de instalar 20 postos de carregamento nas instalações da Q8 até ao final do ano. De acordo com os dados da Enel X, a elétrica tem instalados mais de 12000 pontos de carregamento em toda a Itália, dando assim relevância ao seu papel de operadora e responsável pela manutenção no acordo no projeto em causa.

França [13]

Embora existam programas de expansão da rede europeia de carregamento elétrico, existem países que vão tomando as medidas que acham as mais corretas para impulsionar a ME e assim atingir as metas de descarbonização preconizadas. A França é disso um exemplo, tendo o governo francês lançado um programa de financiamento de 100 milhões de euros para construir mais estações de carregamento para carros elétricos na sua rede rodoviária. O programa é para empresas que instalem centros de carregamento com pelo menos quatro pontos de carregamento rápido nos principais eixos de transporte da França, incluindo pelo menos duas estações de 150 kW. O subsídio será de cerca de 30%, podendo ser combinado com o financiamento de 75% dos custos de ligação à rede.

Portugal [14]

Em 6 de outubro de 2020, a empresa pública MOBI.E, que assegura e gere a exploração da rede de ME, lançou um concurso público para selecionar até 4 empresas para instalar 10 centros de carregamento de VE, para fortalecer o acesso público à infraestrutura de carregamento com mais 90 estações. Este concurso enquadra-se no Programa de Estabilização Económica e Social do Governo, com um financiamento de 1,75 milhões de euros do Fundo Português do Ambiente. O investimento público resulta de uma parceria entre o MOBI.E e vários municípios portugueses. Cabe à MOBI.E a instalação do equipamento de carregamento, bem como as suas ligações à rede elétrica, cabendo aos municípios a seleção, disponibilidade e licenciamento do *hub* de carregamento. Cada centro de carregamento de VE incluirá uma estação de carregamento ultrarrápido (150 kW), três estações de carregamento rápido (50 kW) e cinco estações de carregamento normal (22 kW), o que permitirá o carregamento simultâneo de 18 veículos.

Problema identificado # Fora dos grandes centros urbanos pode não existir disponibilidade de potência para a promoção do carregamento rápido, provocando que o tempo de carregamento não seja semelhante ao de encher o tanque. Consegue-se reduzir a ansiedade da falta de bateria- onde carregar?

Capítulo IV - Proposta de solução de alimentação de PCVE

4.1. Vantagens e desvantagens da ME

Os cenários até agora apresentados, que decorrem de estudos que visam situar a ME como uma concreta estratégia para a promoção da descarbonização e alcance das metas de energia limpa, têm evidenciado um grande esforço de todos os atores envolvidos no processo da implementação do VE. Em concreto, a ME pode proporcionar múltiplas oportunidades em diferentes direções:

- Ambiente - Descarbonização da Economia;
- Energia - Redução da fatura e dependência energética;
- Indústria - Dinamização do tecido científico e empresarial;
- Mobilidade - Aproveitar o advento da ME para repensar a mobilidade.

Como já referido, todos os fatores que geram ansiedade no consumidor, como a disponibilidade de postos de carregamento, o seu correto funcionamento, o tempo que necessita de esperar na fila ou ainda o tempo de carregamento do VE, necessitam de ser resolvidos com consistência e sem o peso acrescido da inércia no crescimento da rede do ORD com o intuito de disponibilizar a potência suficiente à infraestrutura do carregamento elétrico. Por outro lado, existem postos de carregamento que só poderão surgir com uma disponibilidade efetiva de potência elétrica, como são os pontos de carregamento de frotas de veículos pesados ou de veículos de transporte de passageiros e ainda pontos situados nas áreas de serviço instalados nas principais rodovias nacionais. Na Figura 11 são apresentadas as principais variáveis que preocupam o consumidor e condicionam a aceitação do VE.



Figura 11 – Variáveis que condicionam a aceitação do VE pelo consumidor [15]

É evidente que a responsabilidade das autoridades aumenta quando é necessária a concretização de políticas que visem a não discriminação de populações mais desfavorecidas ou de locais mais remotos, onde dificilmente o ORD terá uma rede com capacidade para abastecimento simultâneo de VE sem entrar em sobrecarga.

Naturalmente que a opção pela ME aportará um conjunto de importantes benefícios, nomeadamente a:

- Redução dos níveis de poluição do ar e ruído;
- Melhoria da experiência de condução, nomeadamente:

Disponibilização de binário máximo desde o arranque do motor;

Travagem regenerativa com o motor;

- Potencial de redução do TCO (Total Cost of Ownership) ao longo da vida do veículo por redução dos encargos com combustível, manutenção e reparação;
- Redução da dependência energética do país e dos combustíveis fósseis importados.

Como já referido e em complemento, anota-se que existem vários desafios que ainda devem ser ultrapassados:

- Autonomia limitada dos veículos;
- Elevado custo das baterias;

- Infraestrutura de carregamento ainda pouco desenvolvida, nomeadamente em termos da sua capilaridade e disponibilidade de estações de carregamento rápido, fruto da fraca resposta da rede elétrica de abastecimento, em termos de potência.
- Normas e protocolos tecnológicos ainda não estabilizados, nomeadamente ao nível da interoperabilidade entre sistemas de carregamento e desenho das fichas de carregamento;
- Necessidade de modelos de financiamento autossustentáveis para o desenvolvimento da mobilidade elétrica, em concreto da infraestrutura de suporte.

Perante os benefícios apresentados o desenvolvimento da ME é algo impossível de parar, no entanto urge a resolução das insuficiências encontradas, em particular a necessidade de resposta à eficaz e rápida disponibilidade de potência de alimentação dos Postos de Carregamento de Veículos Elétricos por todo o território.

4.2 A solução e sua motivação

A resposta a um grande número de dúvidas geradas passa pela concretização de uma solução que esteja já acessível e que permita disponibilizar potência necessária à infraestrutura de carregamento, sem limites ao crescimento do número de VE a circular. É nesse sentido que surge a solução de abastecimento dos Postos de Carregamento de Veículos Elétricos (PCVE) utilizando a Rede Nacional de Transporte (RNT), sendo a ligação efetuada através da rede de MAT. A ligação entre qualquer PCVE e a RNT tem como interface uma subestação, podendo ser designada por Subestação da Mobilidade Elétrica (SME). A solução preconizada é baseada num projeto piloto apresentado pelo ORT português através duma prova de conceito realizada numa subestação de 220 kV da RNT [16].

A opção pela ligação à RNT tem como principais atributos:

- A implantação da Rede de MAT por todo o território;
- Disponibilidade existente de elevada potência em qualquer ponto do território coberto pela RNT;
- A estabilidade e resiliência de uma rede elétrica, mais resistente a condições climáticas extremas ou incêndios florestais (caso a solução esteja aplicada em áreas rurais);
- A capacidade de separação da infraestrutura da solução da rede MAT, através do isolamento à distância;

- O conhecimento técnico dos equipamentos a instalar e a facilidade em obter empresas com experiência no ramo de instalações elétricas de alta tensão.

4.2.1. Apresentação sucinta da RNT

A RNT é constituída pelas ligações elétricas que permitem que a energia gerada pelos produtores seja canalizada até aos consumidores, sendo o transporte da energia efetuado pela empresa Redes Energéticas Nacionais, S.A. (REN) em modo de concessão exclusiva e em regime de serviço publico. A RNT abastece diretamente em Alta Tensão (AT) e MAT diversos consumidores finais, sendo com a RND que existe o maior número de ligações pois é a essa rede que ligam todos os consumidores finais em Baixa Tensão (BT) e Média Tensão (MT).

A RNT estende-se por todo o território nacional, através de 9036 km de linhas, 68 subestações, 11 postos de corte e 3 de seccionamento e transição. A rede em Portugal transporta a energia utilizando os níveis de tensão de 400 kV, 220 kV, 150 kV e os 130 kV. A capacidade instalada de transformação MAT/MAT em 2020 foi de 14.470 MVA e em MAT/AT/MT foi de 23.923 MVA [17]. Existem ainda 12 interligações de linhas MAT com a Rede Elétrica de Espanha (REE), permitindo a inserção das duas redes no mercado ibérico de energia elétrica e sendo um contributo importante no apoio em caso de distúrbio ou incidente em qualquer uma das redes.

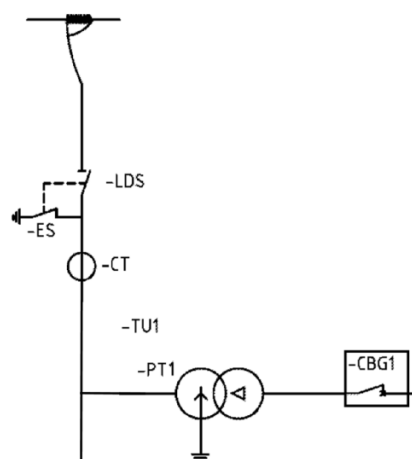
4.2.2. Descrição da solução

A solução que se apresenta promove a redução da tensão recorrendo a transformadores de tensão de elevada potência e que transformam diretamente da MAT para a BT, em particular a transformação para 400 V a partir da rede de 150kV a 400kV.

A Subestação da Mobilidade Elétrica (SME) pode ser instalada em qualquer ponto do território, quer seja urbano ou rural, necessitando apenas que exista uma linha elétrica de MAT que esteja na proximidade desse local.

A SME sendo projetada e construída segundo a conceção de um projeto de Subestações Tipo Exterior é regida de acordo com os seguintes princípios básicos [18]:

- Segurança geral das pessoas e bens;
- Simplificação e padronização da construção;
- Facilidade de condução e manutenção.



Legenda

LDS – Seccionador de isolamento de linha

ES – Seccionador de terra

CT – Transformador de corrente

TU – Transformador de tensão

CBG1 – Quadro geral de distribuição

Figura 12 – Esquema unifilar da SME tipo

Tomando como exemplo a aplicação da solução na rede MAT de 220 kV, a instalação é construída de forma convencional no exterior, com isolamento pelo ar entre os equipamentos que a integram (Figura 12). As ligações de alta tensão distribuem-se por dois planos, um inferior constituído pelas ligações tendidas entre a aparelhagem AT e um plano superior que fica fidelizado à cota do vão da linha de muito alta tensão (LMAT), constituído pelas ligações tendidas altas entre o equipamento da SME e os cabos condutores da linha de energia.

A SME tem a capacidade de abastecer eletricamente os postos de carregamento de veículos elétricos a partir da ligação aos três condutores ativos do elemento de rede MAT. A ligação às três fases da linha de transporte permite a alimentação dos transformadores de tensão, que com a relação de transformação adequada, efetuam a transformação da rede MAT para a rede BT de 400 V. De acordo com os atributos já referidos, poucas são as limitações à implantação e disponibilização de potência ao ligar se a solução à rede, identificando apenas a necessidade de respeitar a limitação da potência nominal dos transformadores de tensão e da potência de curto-circuito do elemento de rede MAT.

A sua implantação é distribuída por três secções:

1. a derivação para a subestação da mobilidade elétrica (DSME) a partir da LMAT;
2. a subestação da mobilidade elétrica (SME);
3. o posto de carregamento de veículos elétricos (PCVE);

Na derivação para a subestação da ME são integrados todos os equipamentos necessários para promover em segurança a derivação da linha de transmissão para a SME permitindo assim o abastecimento elétrico. A DSME deve ser implementada de forma a permitir uma real versatilidade entre conexões LMAT – SME – LMAT.

A subestação da ME integra todos os equipamentos de MAT necessários para permitir a ligação dos transformadores de tensão à linha de MAT. A SME integra todos os equipamentos de sistemas de proteção e comando e controlo (SPCC), que permitem a proteção dos transformadores de tensão, a proteção dos circuitos de BT e a operação dos equipamentos de isolamento da subestação. São também instalados todos os equipamentos que permitem efetuar a recolha da leitura das grandezas elétricas e o sistema auxiliar de alimentação em baixa tensão. A SME integra todos os equipamentos de rede de comunicação necessários ao seu funcionamento e de interação com o ORT e o operador do posto de carregamento de veículos elétricos (OPCVE). Nesta instalação são também instalados diversos serviços complementares, como sejam, sistemas de vigilância interna da integridade da subestação, circuitos de iluminação exterior, quer sejam permanentes ou de reforço, e circuitos de tomadas de apoio dos serviços da subestação.

O PC é o conjunto de todos os equipamentos utilizados para o fornecimento de energia elétrica aos VE para carregamento das suas baterias. Podem ser instalados num único ou em vários invólucros, assegurando funções especiais de controlo e comunicação [18].

A alimentação do PCVE é efetuada a partir da SME e respetivas saídas em BT. O PCVE ao ser implementado nas imediações da SME apenas fica limitado pela potência máxima disponível em cada circuito e às características dos cabos de BT de interligação entre as duas instalações, de acordo com a distância entre instalações.

4.2.3. Principais tópicos da solução

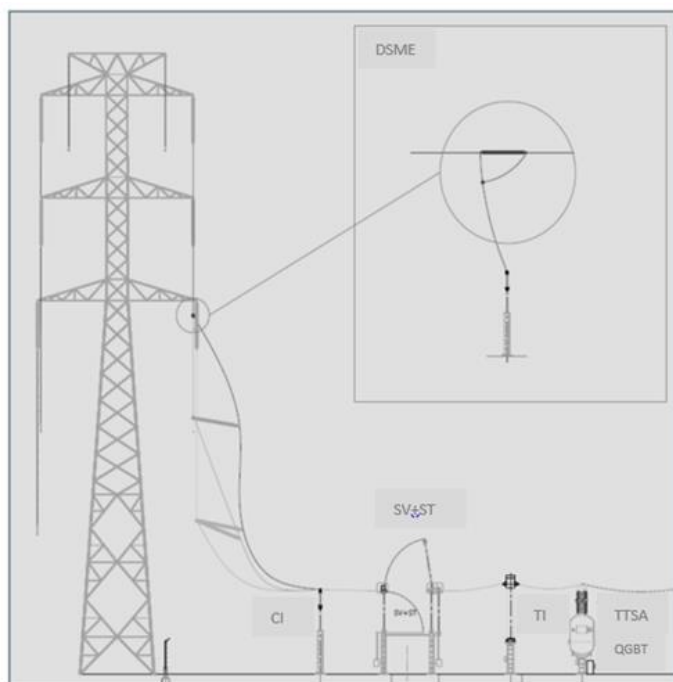
A Tabela 6 apresenta as principais características técnicas da solução juntamente com exemplos para outras possíveis soluções.

Tabela 6 – Principais características da solução [18]

Tópico	Dados da solução	Soluções possíveis
Nível de tensão	220 kV	de 150 kV a 400 kV
Tipo de derivação	Derivação ao meio do vão	Derivação ao meio do vão; Junto do apoio;
TTSA	100 kVA por fase; - Isolamento a SF6; - Travessia em compósito	Até 550 kV e 167 kVA por fase (soluções de isolamento a ar e SF6)
Potência de carregamento	300 kVA	Múltiplos de 300 kVA por cada grupo de 3 transformadores
Número de carregadores de VE	De 1 até 6 carregadores rápidos (50 kW DC + 22 kW AC)	Consoante o carregador escolhido: - rápido (50 kW ou 150 kW) - super-rápido (350 kW)
Número de VE (carregamento simultâneo)	2 VE (1 AC + 1 DC), para 1 carregador 12 VE (6 AC + 6 DC), para 6 carregadores	p.e. 5 grupos de três TTSA = 1,5 MVA = 30 carregadores rápidos de 50 kW 60 VE (30 AC + 30 DC), para 30 carregadores

4.3 Equipamento que constitui a solução e sua função

A Figura 13 apresenta um perfil da solução preconizada e indicação dos equipamentos que a compõem. Em destaque surge a forma de derivação da linha da RNT para a SME.



Legenda

SV+ST: seccionador de isolamento de linha + seccionador de terra;

TI: transformador de intensidade;

TTSA: transformador de serviços auxiliares;

CI: coluna de isolador de apoio ou descarregador de sobretensões;

QGBT: quadro geral de baixa tensão;

DSME: derivação para a SME

Figura 13 – Corte de painel e derivação MAT [18]

DSME

De acordo com a solução apresentada a SME é alimentada a partir da LMAT a 220 kV através da derivação em T a partir dos cabos ativos. As ligações de alta tensão são realizadas com condutores flexíveis, desenvolvendo-se a diversas cotas conforme referido e consoante a disposição de equipamento. O número de condutores por fase e a sua secção serão resultado do dimensionamento, tendo em conta, não só a corrente nominal estipulada e a corrente de curto-circuito calculada, mas também a necessidade de limitar o valor do campo elétrico à superfície dos condutores ao valor máximo de 17 kV/cm, com vista à minimização do efeito de coroa.

Na Tabela 7 são apresentados os cabos mais utilizados na rede de transporte.

Tabela 7 – Principais cabos utilizados nas ligações MAT

DESIGNAÇÃO CABO	COMPOSIÇÃO	DIÂMETRO [mm]	APLICAÇÃO
ZEBRA	Liga AL-aço	28,0	LINHAS MAT
ZAMBEZE	Liga AL-aço	31,8	LINHAS MAT
ASTER 851	Alumínio	38,0	SUBESTAÇÕES MAT
ASTER 1144	Alumínio	44,0	SUBESTAÇÕES MAT

As ligações flexíveis serão realizadas com condutor de Almelec do tipo Aster 851 com as características indicadas na Tabela 7.

A derivação aplicada não se esgota apenas na função de interligação da SME à Rede de Transporte (RT), sendo construída de forma a proporcionar soluções para o surgimento de qualquer evento que careça de separação entre qualquer extremo da RT, quer seja por manutenção corretiva ou preventiva. A introdução de uma cadeia de isoladores no cabo da LMAT permite a escolha de uma solução de entre quatro posições.

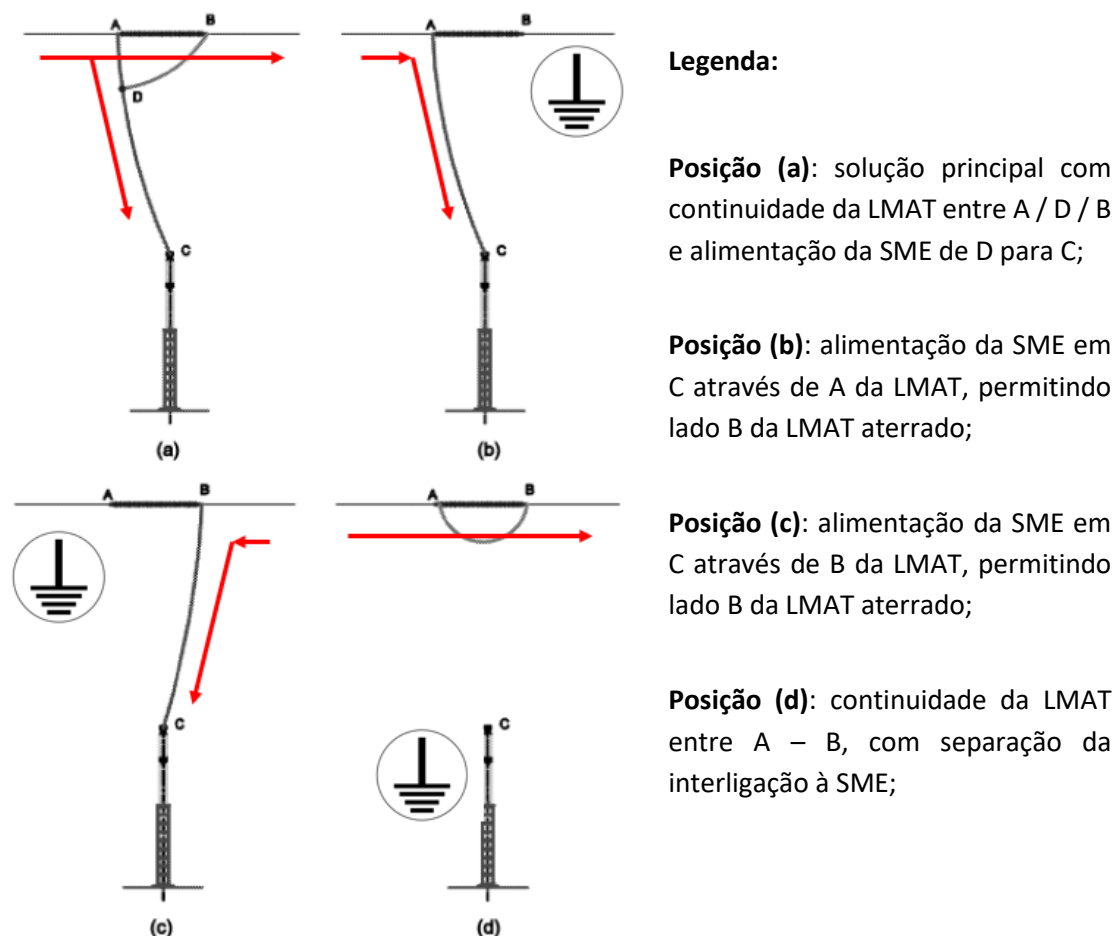


Figura 14 – Soluções de interligação [19]

De acordo com a Figura 14 a derivação permite a sua aplicação em quatro modos diferentes. As soluções de aplicação da interligação à RT dão assim uma confiança acrescida ao ORT, pois ao ser possível libertar qualquer tipo de problema criado pela subestação para a rede apenas com a retirada da baixada mantém-se o abastecimento e integridade da RT. Outro modo diferente de exploração é a retirada do shunt B-D e realocização da posição da baixada, resolvendo assim quais queres problemas relacionados com necessidade de ação corretiva ou preventiva em qualquer um dos lados da LMAT. Todas as ações anteriores descritas carecem, no entanto, da real indisponibilidade do elemento de rede, ou seja, da LMAT e da respetiva SME, pois só assim as equipas de manutenção poderão selecionar o modo de exploração da DSME. Pretende-se desta forma evidenciar o reduzido impacto da introdução desta solução numa qualquer linha MAT, possibilitando o compromisso da elevada disponibilidade de abastecimento do PCVE com o cenário de indisponibilidade parcial da LMAT para efeitos de manutenção.

Descarregadores de sobretensão

A localização da instalação da subestação para a ME é importante, pois embora possa ficar sob a LMAT, a situação mais comum é existir um determinado afastamento entre a posição vertical dos condutores de fase e o início da SME. Se na primeira abordagem, menos comum, a amarração do cabo condutor pode ser feita a uma coluna de isoladores (CI), uma vez que está sob a proteção dos cabos de guarda instalados entre apoios da LMAT, a segunda forma de localização permite a ligação do cabo condutor diretamente a um descarregador de sobretensões (DST), conferindo assim proteção da SME contra descargas atmosféricas. Os DST são utilizados para proteger equipamentos e instalações, das eventuais descargas atmosféricas e de sobretensões de manobra e normalmente são classificados pela sua capacidade de descarga de corrente. É fundamental que o DST tenha um comportamento estável sob as condições de operação a que venha a ser sujeito, pois dele depende a proteção dos equipamentos dispendiosos da SME.

Seccionador de isolamento e de terra

A instalação de seccionadores de isolamento permite a separação da subestação da RNT, proporcionando uma abertura visível entre dois circuitos. A manobra do seccionador apenas pode ocorrer sem que exista circulação de corrente, uma vez que não tendo capacidade de poder de corte em carga o equipamento fica impedido para efetuar a interrupção de correntes, quer do valor normal de funcionamento quer de defeito, sob o risco de ocorrência de arco elétrico não controlado. Naturalmente que, embora não exista carga no circuito, existirá sempre

no momento de abertura ou fecho do seccionador de isolamento a corrente de magnetização dos TTSA. Na solução apresentada o seccionador escolhido é do tipo abertura horizontal (Figura 15), existindo ainda soluções de corte vertical. A este seccionador é acoplado um seccionador de terra. O termo acoplado sugere a existência de um encravamento mecânico entre os dois equipamentos, garantindo que apenas o



Figura 15 – Sec. Abertura horizontal

circuito interno da subestação é ligado à terra quando o Seccionador de Isolamento (SI) está aberto. A qualquer um destes equipamentos está ligado uma caixa de comando motorizada que permite o comando elétrico controlado no local e à distância. As dimensões dos isoladores serão

determinadas pelas tensões estipuladas, os respectivos níveis de isolamento e as linhas de fuga, de acordo com o nível de poluição do local.

Transformador de Intensidade

Os Transformadores de Intensidade (TI) utilizados nas redes de transporte assemelham-se à construção dos transformadores de potência, ou seja, têm dois enrolamentos, um primário e um secundário. A sua função é transformar a corrente primária numa corrente adequada no secundário que possa ser utilizada pelos equipamentos de medida e proteção. Os transformadores de corrente são ligados em série com a rede e devem ter a capacidade de suportar as correntes de curto-circuito e sobretensões que possam surgir.

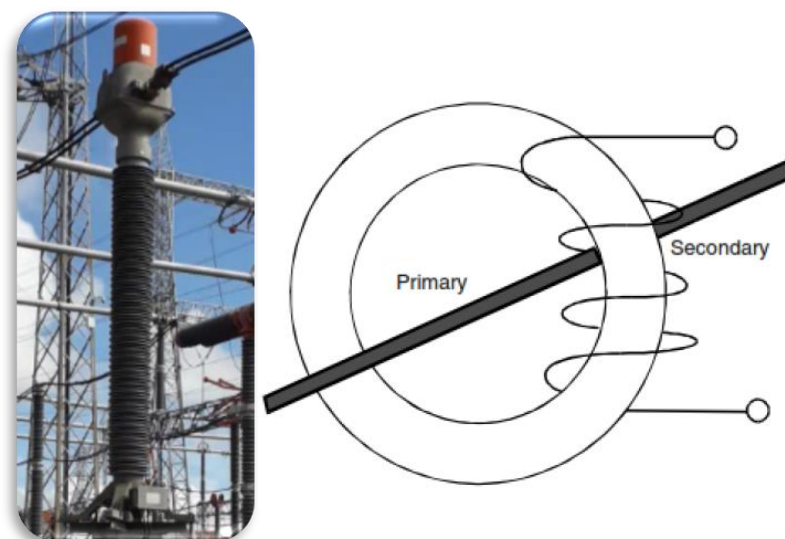


Figura 16 – TI com barra no primário e secundário com núcleo toroidal [19]

Tipicamente, os TI são constituídos por barra no primário e com núcleo toroidal, Figura 16. Toda a corrente primária atravessa o transformador pela barra surgindo a sua imagem no enrolamento secundário, de acordo com a relação de transformação do equipamento.

A instalação de transformadores de corrente pode ser incluída ou não nas soluções de SME a construir. Depende essa escolha do grau de estabilidade da RT e dos critérios do ORT. Na solução preconizada é escolhido a instalação de transformadores de corrente (TI) para aplicação no exterior e resistentes à intempérie, de isolamento interno a papel-óleo e com isolador externo em compósito, em vez da habitual porcelana, garantindo assim uma melhor eficácia a valores mais altos de poluição devido ao seu contínuo bom desempenho quanto à hidrofobicidade. A

principal função do TI na SME é a de poder auxiliar os relés de proteção nos extremos da LMAT, indicando se o defeito por eles registado é a jusante, lado SME, ou a montante, na LMAT. Este assunto é abordado mais à frente junto com a análise dos sistemas de comando e proteção. Estes aparelhos têm no secundário enrolamentos de medida, proteção e de contagem, diferentes entre si consoante a sua classe de precisão.

Transformador de Tensão



Figura 17 – Transformador de Tensão de Alta Potência

Os transformadores de tensão de alta potência (Figura 17), designados também por transformadores de tensão para serviços auxiliares (TTSA), ao serem alimentados diretamente a partir da rede de MAT permitem disponibilizar uma elevada potência numa rede de BT, fazendo com que deixe de ser necessária a utilização ou até ampliação da rede de distribuição em média ou baixa tensão em algumas situações. Os TTSA tornam-se particularmente relevantes quando permitem conjugar a utilização da relação de transformação e as características de isolamento de um transformador de tensão convencional com as características habituais de disponibilização de potência como os convencionais transformadores de potência.

Podendo ser utilizados até gamas de 550 kV os TTSA garantem potência suficiente para abastecimento em baixa tensão de locais onde a MAT está disponível. Para a subestação da solução são escolhidos os TTSA de 100 kVA, que utilizam como isolamento interno o gás SF₆ e disco de rutura em cada um dos equipamentos, sendo assim evitado o registo de explosão por defeito interno. Estes aparelhos utilizam densímetros para a supervisão remota da condição de isolamento ao monitorizar internamente a densidade do gás e recorrem à instalação de sensores de temperatura PT100 para monitorizar a temperatura interna. A utilização de um dielétrico específico associado ao design de um núcleo de maiores dimensões, semelhante ao dos transformadores de potência para a distribuição, bem como a implementação de uma travessia

interna de longo cone, permite criar as condições necessárias para a utilização destes equipamentos como se de transformadores de potência se tratassem. Outra característica relevante nos TTSA é o isolamento galvânico entre enrolamentos primários e secundários, que são enrolados sobre o mesmo núcleo magnético com isolamento independente. As seguintes características contribuem para a promoção da relação de transformação necessária à utilização destes transformadores de tensão nos vários níveis de MAT.

Nível de tensão mais alto	Nível de tensão mais baixo
• Maior número de voltas • Mais isolamento entre as camadas • Secção transversal mais baixa devido à corrente mais baixa	• Menor número de voltas • Menos isolamento entre as camadas • Secção transversal mais alta devido à corrente mais alta

O secundário é composto por dois tipos de enrolamento, um enrolamento de potência e um enrolamento de medidas/proteção. Na saída do secundário de cada TTSA existe um fusível de alto poder de corte protegendo o transformador contra curto-circuitos a jusante.

Distribuição em BT

É no quadro geral de distribuição (QGD) que estão integrados os circuitos de potência de BT, suas proteções e restantes funcionalidades de apoio à SME. É também neste quadro que estão instalados os sistemas de comando e controlo para promoção dos comandos dos equipamentos AT e BT, da recolha e catalogação de toda a alarmística gerada pelas anomalias que possam ocorrer na subestação. É no QGD que estão localizados os equipamentos de proteção onde serão ligadas as correntes trifásicas dos TI instalados no parque de MAT. Caso ocorra algum defeito fase-fase ou fase-terra na SME o sistema de proteção indica às proteções nos extremos da LMAT que:

Caso o defeito seja a jusante do TI (interior da SME)

As proteções nos extremos da LMAT devem efetuar o disparo, com abertura dos respetivos disjuntores, inibindo aí a função religação.

Caso o defeito seja a montante do TI (exterior da SME)

As proteções nos extremos da LMAT devem efetuar o disparo, com abertura dos respetivos disjuntores, permitindo aí a função religação.

A possibilidade de discriminação da sede de defeito (LMAT ou SME) evidencia o reduzido impacto da ligação da SME sobre a fiabilidade da LMAT, uma vez que não se inibe a religação rápida na eventualidade da ocorrência de um defeito fugitivo na linha, situação que representa a larga maioria das ocorrências na RNT.

A unidade de comando e proteção deve ser compatível com os protocolos IEC utilizados pelo ORT. A unidade terá as seguintes funções:

- Comando remoto aos seccionadores de linha e de terra;
- Supervisão e monitorização das posições dos seccionadores de linha e de terra e envio de esta informação para os extremos da linha de transmissão;
- Detecção de curto-circuitos no circuito de muito alta tensão no primário do transformador, usando uma função de máxima intensidade de fase;
- Inibição do comando de religação nos dois extremos da linha de transmissão, assim como a sua energização manual, no caso de atuação da função de máxima intensidade;
- Entradas binárias para supervisão local.

O SPCC terá acesso remoto através da utilização de rede de comunicações disponível na subestação, permitindo assim a interligação de todas as funções de comunicação com os sistemas instalados na rede de transmissão, quer seja ao nível de trocas de informações entre proteções, quer ao nível de troca de informações entre Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition -) e unidades de comando instaladas na SME.

São instalados diversos equipamentos que permitem o bom funcionamento da rede de comunicações entre os disjuntores BT, os equipamentos dos SPCC e a rede de dados presente:

- Controlador industrial para automação dos disjuntores de potência instalados (-CBG1 e -CB1), com comunicação Modbus ou TCPModbus;
- Serial server industrial para ligação da comunicação Modbus com TCPModbus;
- *Switch* industrial.

Problema identificado # *será possível obter em todas as soluções um acesso à rede de comunicações do ORT, evitando a utilização de uma qualquer rede de um operador de telecomunicações.*

Telecontagem

No quadro geral de distribuição também é instalado um sistema de contagem de energia com acesso remoto, permitindo a recolha e partilha das grandezas elétricas. O sistema de telecontagem constitui o suporte de base para a recolha e o processamento de dados associados aos fluxos de energia elétrica necessários para as liquidações dos relacionamentos comerciais entre as várias entidades que constituem o sistema da ME.

Serviços Auxiliares em CA e CC

A subestação torna-se totalmente independente ao nível dos serviços auxiliares com a instalação no QGD de um sistema de alimentações em corrente contínua (CC), constituído por dois retificadores e um banco de baterias 62 Ah/12V. A alimentação em CC fornece também 48V para as unidades do sistema de controlo e proteção, o acionamento dos seccionadores através de motores de CC e as unidades auxiliares de comunicações. O barramento de 48V alimenta ainda conversores 48V/24V CC. Os 24V são utilizados na alimentação, comando e proteção dos disjuntores de 400V de grande potência, visíveis na Figura 18 (entrada do quadro geral distribuição e alimentação barramento 400V CA).

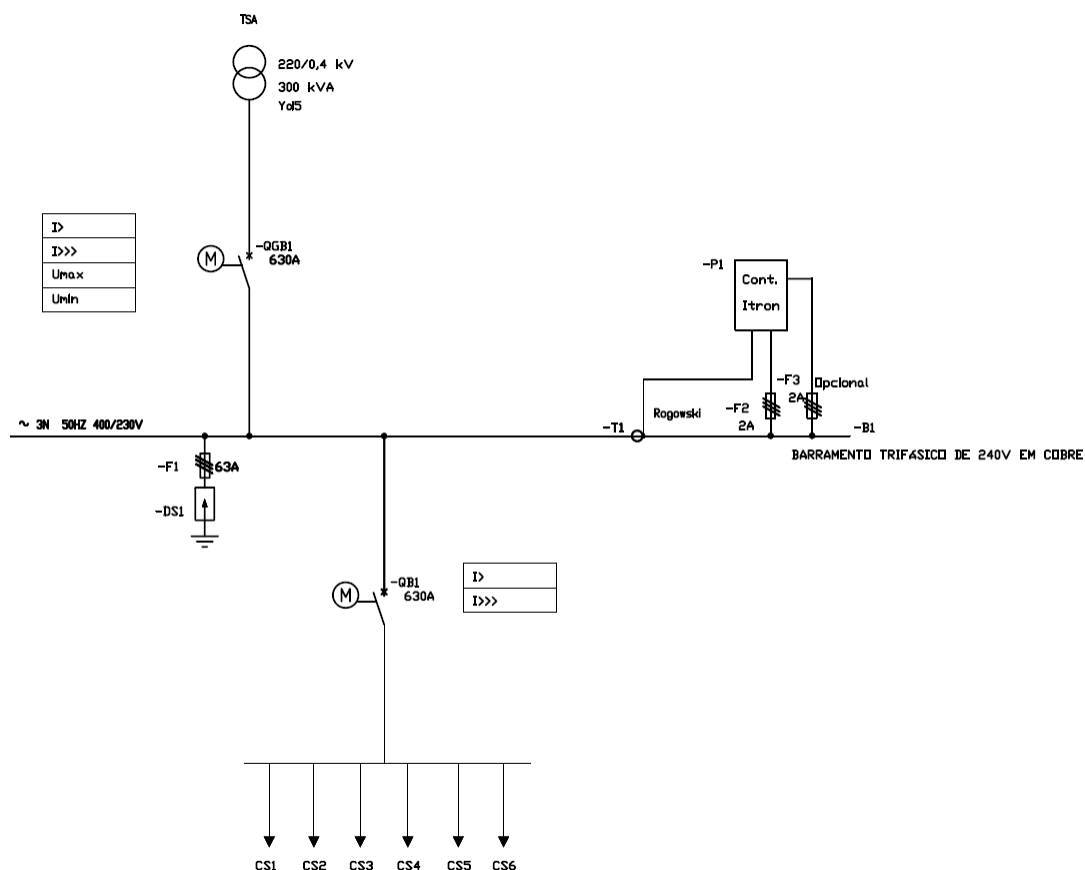


Figura 18 – Esquema unifilar simplificado do circuito de potência do QGD

Legenda:

QGB1 – corte geral	F1 – fusível 63A, proteção DST	B1 – barramento principal 400V
QB1 – alimentação barramento carregadores	F2, F3 – fusível 2ª, proteção contador	DS1 – descarregador de sobretensões 400V
CS1...CS6 – saídas para as unidades de carregamento	T1 – transformador de corrente toroidal	P1 – contador com comunicação Ethernet TCP/IP

4.4. Operação da SME

A subestação é explorada em modo não presencial, não existindo qualquer técnico permanentemente na SME. A colocação em serviço da subestação, de acordo com o fluxograma da Figura 19, é efetuada através do fecho do seccionador de isolamento, energizando os TTSA e disponibilizando os 400V ao QGD. O fecho do disjuntor motorizado QGB1 (Figura 18) permite a alimentação do barramento principal de 400V. Com a presença de tensão em B1 400V efetua-se o comando de fecho ao disjuntor motorizado QB1. Nesta fase o QGD fica totalmente energizado, substituindo a alimentação de 48V das baterias, que apoiavam os circuitos essenciais.

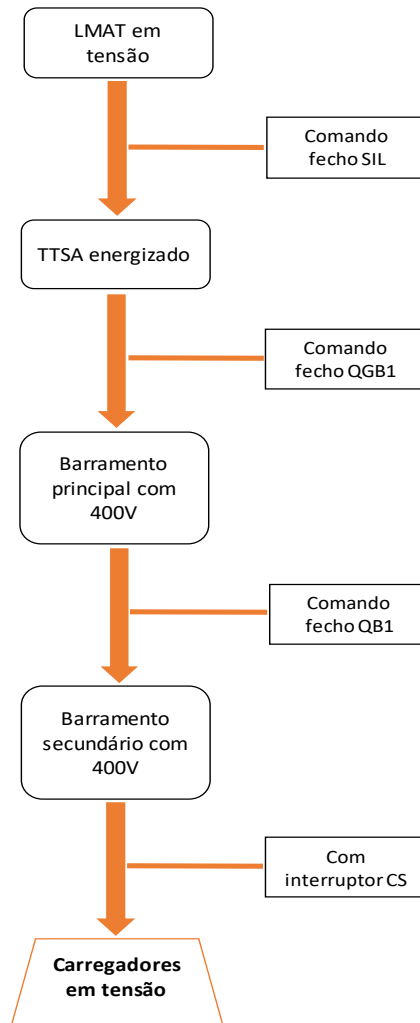


Figura 19 - Fluxograma de comandos para energização da SME

Com os interruptores parciais de alimentação dos carregadores fechados são energizados todos os PCVE ligados à SME. Os principais disjuntores de BT instalados no QGD, QGB1 e QB1, têm incorporados diversas funções de proteção, conforme indicado na Tabela 8.

Tabela 8 - Funções das proteções dos disjuntores BT

Tipo proteção	Função	Disjuntor	
		QGB1	QB1
I>	Proteção MI homopolar	X	X
I>>>	Proteção MI de fase	X	X
U _{max}	Proteção máxima tensão	X	
U _{min}	Proteção mínima tensão	X	

Em caso de tensão nula na zona MAT da subestação e de forma a proteger os equipamentos de energização inversa, a função de mínima tensão abre o disjuntor QGB1 automaticamente. Esta

ação permite a colocação ao serviço da SME e respetiva alimentação do PCVE muito rapidamente, pois caso a falta de tensão tenha tido origem num acontecimento fortuito e/ou isolado na LMAT, nem sequer existe abertura do seccionador de isolamento de linha (ver Figura 20).

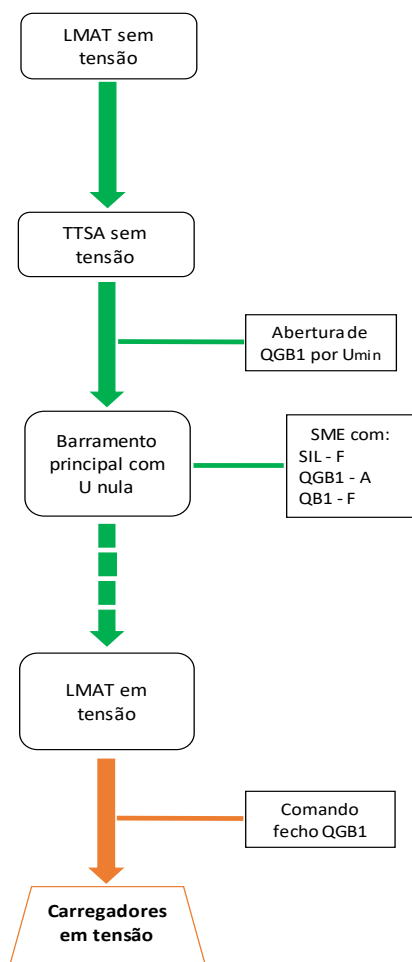


Figura 20 – Fluxograma de comandos para energização da SME após U_{nula}

4.5. Capacidade de expansão da solução

Sendo uma solução inovadora a forma da subestação descrita, onde é demonstrada uma solução realista e consolidada, capaz de resolver e suplantar inúmeros obstáculos como a falta de potência de energia em muitos locais ao longo do território, desde que o mesmo seja atravessado por linhas da RNT, o certo é que existem outras soluções para utilizar o abastecimento de energia em BT a partir da MAT. A utilização do abastecimento de energia em BT a partir dos TTSA, quer seja de forma monofásica ou trifásica, vem ao encontro da resolução de problemas que terão nesta solução inovadora uma possibilidade de concretização. Para além da utilização da SME no abastecimento de PCVE em áreas de serviço, no abastecimento de frotas de transporte de passageiros ou de mercadorias, ou ainda, em PCVE instalados em hiper parques

de estacionamento público ou de frotas, e tendo sempre como elo de partida a disponibilidade da rede MAT, a SME pode vir a proporcionar soluções para:

- Abastecimento de zonas remotas do território, onde é difícil encontrar potência na rede do ORD suficiente para a real implantação da mobilidade elétrica, evitando reforços da RND normalmente associados a processos morosos;
- Abastecimento de instalações militares provisórias ou postos de emergência e socorro através de soluções móveis de abastecimento de energia;
- Carregamento elétrico de barcos em rios com docas apropriadas;
- O abastecimento de máquinas elétricas de grandes dimensões na desmatção da floresta.

Naturalmente que a subestação deve-se adaptar às necessidades descritas, efetuando a ligação à LMAT de diferentes formas. Essa capacidade de inovar pode passar por:

- Criação de estrutura para suporte de caixas fim-de-cabo e fixação aos apoios das LMAT, permitindo ligação aos TTSA através de cabos elétricos para alta tensão;
- Aplicação dos TTSA sobre um veículo de transporte com carroçaria rebaixada;
- Utilização de veículo de dimensões para transporte de cabos de AT e respetivas caixas fim-de-cabo, equipado com meio de elevação dos equipamentos até aos suportes nos apoios;
- Aplicação de compartimento GIS com seccionador de isolamento no interior na estrutura do veículo de transporte dos TTSA, permitindo uma solução integrada.

4.5.1. Locais de aplicação

Tomando como referência a existência de uma LMAT e a instalação de uma SME, semelhante à solução apresentada, junto das vias rodoviárias mais importantes do território nacional, considerando no conjunto dessas vias as autoestradas, os itinerários principais e os itinerários complementares, identificando ainda todos os parques logísticos com frotas de distribuição e grandes superfícies comerciais, foi verificada a existência de cerca de 1700 pontos potenciais de interconexão (ver Figura 21). Fato relevante é a curta distância entre a LMAT e o PCVE, tornando o dimensionamento e aplicação da SME mais fácil.



Figura 21 – Localização de potenciais SME

4.5.2. Vantagens da solução

Numa era onde um dos desígnios principais é a diminuição das emissões de CO₂, em particular devido aos efeitos da utilização de combustíveis fósseis no setor dos transportes, o surgimento de soluções inovadoras que acelerem o desenvolvimento de uma infraestrutura de carregamento de VE onde os utilizadores confiem, será um instrumento de sucesso no desenvolvimento da ME. Essa confiança do utilizador do VE torna-se real uma vez que não existe limite de potência para promoção do carregamento em simultâneo de vários veículos e ainda possibilita a disponibilidade de potência onde surgem os carregadores super-rápidos, levando o utilizador a gastar o mesmo tempo associado ao abastecimento do veículo com combustível. Uma infraestrutura de carregamento de VE fortemente implantada no território, para além da confiança acrescida do utilizador, trará num desenvolvimento coordenado, uma maior e mais eficiente utilização da produção de energia através de fontes renováveis. Associado a todos estes fatores e de relevo para a implantação nacional da ME é o fato da rede de MAT ter uma

distribuição efetiva por todo o território, permitindo assim ultrapassar as barreiras já identificadas e indo ao encontro de um acesso equitativo ao VE, pois a disponibilidade de carregamento chegará a todo o lado e não apenas aos grandes centros urbanos. Simultaneamente a relativa facilidade em montar a SME, onde respeitando toda a legislação de implantação de instalações elétricas de AT, será mais um fator impulsionador do desenvolvimento da infraestrutura. Uma subestação de baixo custo em virtude da pequena quantidade de equipamentos a instalar e de fácil aquisição, dado estarmos na presença de tecnologias conhecidas e assimiladas, quer pelas empresas responsáveis pela construção quer pelo ORT, pode ser construída e colocada em serviço num curto espaço de tempo. Por outro lado, a fiabilidade dos equipamentos que a compõem diminui a perda de tempo com o seu comissionamento e inclusive com a sua manutenção. Fato relevante para tal sucesso é a não aplicação de disjuntores no nível da MAT. Face às grandezas elétricas em causa no lado MAT e ao tipo de transformador utilizado caso seja necessário alimentar diversas dezenas de carregadores rápidos, apenas é preciso fazê-lo de forma múltipla, sendo que a LMAT, por exemplo de 220 kV, para o funcionamento simultâneo de 80 carregadores de 50 kW no mesmo local, atingirá cerca de 1% da sua capacidade, não tornando essa instalação intrusiva na RNT e evitando um risco de sobrecarga no futuro.

Problema identificado # *caso a aposta seja o ORD investir no reforço de redes, quem resolve os problemas que daí surgirão – quem paga o investimento - Todos os consumidores? Os utilizadores dos VE?*

4.6. Dimensionamento-tipo da SME

4.6.1. Objetivos gerais

Neste ponto apresentam-se algumas características e cálculos que permitem efetuar o dimensionamento tipo da SME. De acordo com a solução descrita, estamos perante uma subestação instalada no exterior através da montagem dos respetivos equipamentos de MAT nesse ambiente.

4.6.2. Localização e principais características

Embora já tenha sido apresentada a possibilidade da instalação da SME em 1700 pontos definidos no território nacional, optou-se por não definir um local exato para a instalação da subestação, evitando assim a beneficiação de qualquer lugar ou empresa. No entanto é apresentado um exemplo de dimensionamento a partir dos dados de um ponto de ligação à RNT de 220 kV, mais concretamente na região de Lisboa junto da via rodoviária A36, permitindo assim apresentar algumas grandezas e cálculos necessários ao estudo prévio da instalação da subestação.

A SME em estudo é ligada ao nível de tensão de 220 kV, através de uma transição direta de uma linha aérea a 220 kV, pertença à RNT. São instalados três TTSA de 100 kVA cada, obtendo-se uma potência trifásica secundária de 300 kVA, permitindo assim a instalação de 6 carregadores rápidos de 50 kW e o carregamento simultâneo de 12 veículos. O reduzido valor de corrente expetável no primário do TTSA permite equacionar a ampliação da SME, através da introdução de mais transformadores de tensão, sem qualquer constrangimento para a rede de MAT.

As características gerais da rede elétrica no ponto de ligação à SME são as seguintes apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Principais características no ponto de ligação à rede⁷

Número de fases	3
Tensão nominal	220 kV
Tensão mais elevada	245 kV
Frequência nominal	50 Hz
Potência máxima curto-circuito trifásico	9547,9 MVA
Potência mínima curto-circuito trifásico	7680,7 MVA
Potência máxima curto-circuito fase-terra	1037 MVA
Tempo de corte	0,5 s

4.6.3. Disposição geral e tecnologia a implementar

Na Figura 22 é apresentado um esquema simplificado da subestação tipo, onde se verifica que para a construção do painel na SME serão utilizados os seguintes equipamentos:

⁷ Valores baseados em dados presentes em diversos documentos internos do ORT, correspondentes a pontos de ligação à RNT próximos do local da subestação em dimensionamento.

- Descarregadores de sobretensões;
- Seccionador de isolamento horizontal;
- Seccionador de terra;
- Transformadores de corrente;
- Transformadores de tensão de serviços auxiliares.

A SME é uma subestação do tipo convencional, ou seja, os equipamentos a instalar são tipo convencional exterior, com isolamento a ar com exceção do TTSA que terá isolamento a SF6. De acordo com a implantação dos equipamentos e as distâncias mínimas de segurança o painel terá um passo de acordo com o dimensionamento, mas nunca superior a 15m, sendo as ligações de alta tensão distribuídas por dois planos, um plano inferior, onde se localizam as ligações tendidas entre a aparelhagem AT, e um plano a uma cota superior com as ligações da DSME junto dos cabos ativos da linha MAT.

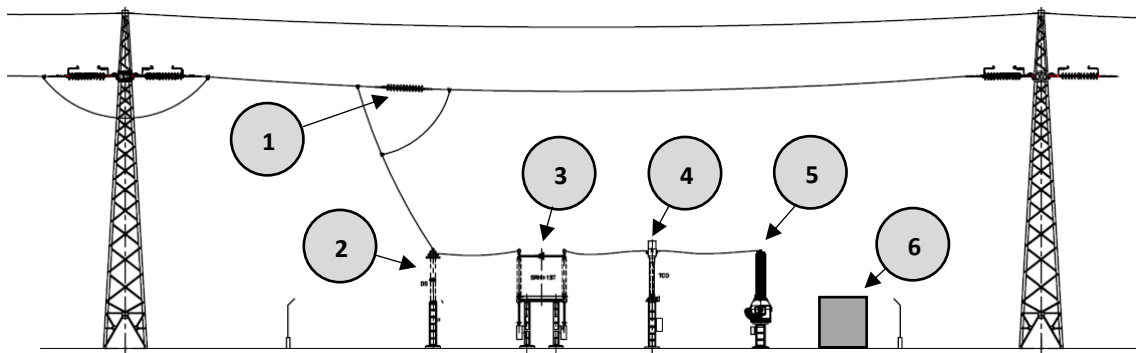


Figura 22 – Esquema simplificado da subestação tipo

Legenda:

- | | |
|-----------------------------------|--|
| 1 – Cadeia de derivação | 4- Transformador de Corrente |
| 2 – Descarregador de sobretensões | 5 – Transformador de Tensão de Alta Potência |
| 3 – Seccionador de isolamento | 6 – Quadro Geral de Corrente Alternada |

4.6.4. Coordenação de isolamento

Não sendo objeto deste estudo a coordenação de isolamento de uma subestação de MAT, a verdade é que o isolamento elétrico é essencial para proteger as instalações elétricas, indo ao

encontro da segurança de pessoas e animais, contra contatos diretos e indiretos. Em linguagem técnica, o isolamento elétrico consiste em evitar as fugas de corrente elétrica para a terra [21].

Assim, a coordenação de isolamento é muito relevante no dimensionamento das instalações de transporte e de distribuição de eletricidade em AT e MAT. Em situação normal de funcionamento os diversos equipamentos instalados estão sujeitos a vários tipos de sobretensões. As sobretensões podem exigir esforços dielétricos nos equipamentos e, caso não seja dimensionada a instalação no sentido de evitá-las ou mesmo eliminá-las, levar inclusive à sua interrupção ou destruição, colocando em causa a fiabilidade e a continuidade do abastecimento elétrico. Solicitações elétricas são todos os esforços aos quais os equipamentos na instalação estão sujeitos em resultado da aplicação de um determinado campo elétrico. É a amplitude da tensão aplicada aos terminais de um equipamento que influencia o campo elétrico. De acordo com a norma IEC 60071-1 [22] as sobretensões são classificadas em dois grupos:

- um grupo onde a origem é externa ao sistema, resultante de descargas atmosféricas e que se pode manifestar de duas formas, ou pela incidência direta sobre as linhas/subestações, ou pela incidência nas torres e/ou cabos de guarda que pode provocar contornamento destes para as linhas;
- o segundo grupo diz respeito às sobretensões com origem interna ao sistema, onde se refere as sobretensões de manobra e temporárias. Como as suas origens são comuns e podem ocorrer em simultâneo, a sua combinação é relevante para a seleção do isolamento [21].

É nesse sentido que em cada dimensionamento da coordenação de isolamento de uma instalação de AT ou MAT deve ser identificado o valor da tensão suportável máxima, a partir dos dados fornecidos pelo fabricante de cada equipamento, e escolhido o valor da tensão suportável normalizada de acordo com as listas de tensões suportáveis de curta duração à frequência industrial estipuladas normalizadas e das tensões de impulso suportáveis estipuladas normalizadas presentes na IEC 60071-1 [22] e do Guia de coordenação de isolamento para a rede [23].

Os níveis de isolamento normalizado a adotar numa instalação têm como base a verificação das condições atmosféricas normais presentes na norma [22] e que se apresentam:

- A temperatura do ar não excede os 40°C, e o seu valor médio num período de 24h não exceda os 35°C. As temperaturas mínimas não devem ser menores que: -10°C, -25°C e -40°C conforme as classes “-10°C exterior”, “-25°C exterior”, “-40°C exterior” respetivamente;
- A altitude não exceda os 1000 m acima do nível do mar;
- A poluição não exceda o nível de poluição médio, de acordo com a Tabela 10;
- A presença de chuva ou condensação é comum.

As condições atmosféricas de referência para as quais as tensões suportáveis normalizadas se aplicam são:

- Temperatura: $t_o = 20^\circ\text{C}$
- Pressão: $b_o = 101,3 \text{ kPa}$ (1013 mbar)
- Humidade absoluta: $h_o = 11 \text{ g/m}^3$

A Tabela 10 apresenta as distâncias de linha de fuga recomendadas de acordo com o nível de poluição local segundo a norma IEC 60071-2 [24].

Tabela 10 - Distância específica mínima nominal (mm/kV) [24]

Nível de poluição	Distância específica mínima nominal (mm/kV)
I - Ligeiro	16,0
II - Médio	20,0
III - Forte	25,0
IV – Muito Forte	31,0

Para a solução em estudo e segundo os princípios de coordenação de isolamento recomendados pelo IEC e pelo Guia de Coordenação de Isolamento para a Rede de Transporte, os equipamentos do painel da SME são protegidos contra sobretensões vindas do exterior por descarregadores de tensão. Por sua vez, a linha de fuga a considerar na instalação é de 25 mm/kV, correspondente ao nível de poluição forte, dada a localização escolhida ser numa zona urbana, mas junto de alguma indústria e, em particular, junto da via rodoviária com forte densidade de trânsito.

De forma sucinta, indo ao encontro das normas já referidas e a partir da distância de linha de fuga identificada segundo o nível de poluição considerado, os níveis de isolamento e proteção a adotar na SME são os indicados na Tabela 11.

Tabela 11 - Nível de isolamento nominal dos equipamentos AT

Tensão mais elevada (kV _{ef})	Seccionadores, Transformadores de Medição, etc.					
	Fase – Terra			Fase - Fase		
	50 Hz 1 minuto (kV _{ef})	Choque atmosf. (kV)	Choque manobra (kV)	50 Hz 1 minuto (kV _{ef})	Choque atmosf. (kV)	Choque manobra (kV)
245	460	1050	---	460	1050	---

Na Tabela 12 estão indicadas as medidas mínimas de isolamento e proteção no ar a partir das partes em tensão.

Tabela 12 - Distâncias de isolamento [21]

Tensão mais elevada (kV _{ef})	Distâncias de isolamento (cm)		Distância ao solo (cm)	Distância de trabalho (cm)	
	Fase-Terra	Fase-Fase		Horizontal	Vertical
245	210	240	435	385	335

4.6.5. Correntes de curto-circuito

A estabilidade da RNT exige que existam sistemas de proteção com capacidade e fiabilidade capazes de interromper qualquer curto-circuito na rede no menor tempo possível. Um curto-circuito não eliminado provoca esforços térmicos e eletrodinâmicos, podendo sujeitar os componentes da RNT a danos irreparáveis, e provocar efeitos dramáticos nas pessoas que possam estar em contato com o componente em defeito

Um curto-circuito define-se como um percurso de baixa impedância resultante de um defeito, através do qual se fecha uma corrente, em geral muito elevada. Na Figura 23 está representado um esquema simplificado onde ocorre um curto-circuito.

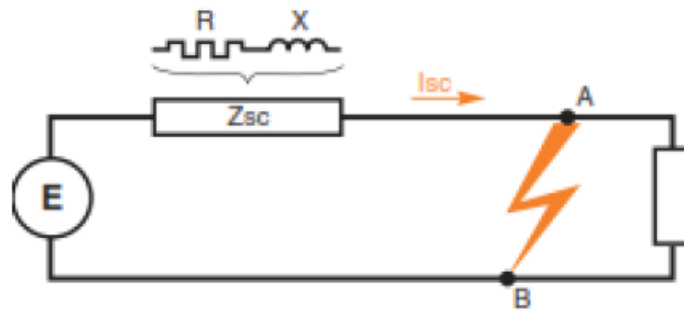


Figura 23 – Apresentação de um curto-circuito baseado num esquema simplificado [20]

Os curto-circuitos podem ser causados por diversos fatores numa rede de MAT, de onde se destaca a rutura de condutores ou falência dos seus apoios, descargas atmosféricas, defeitos de isolamento, falsas manobras, poluição excessiva nos isoladores e ainda contatos inadvertidos provocados por pessoas, animais ou objetos condutores. É de grande relevo o cálculo dos curto-circuitos, pois conhecendo a corrente máxima que um defeito pode atingir podemos efetuar um correto dimensionamento dos equipamentos da RNT, como condutores, isoladores, barramentos e enrolamentos. São dois os equipamentos que em conjunto permitem a deteção e eliminação dos defeitos provocados pelos curto-circuitos e utilizando se o cálculo da respetiva corrente máxima e mínima podemos definir o poder de corte dos disjuntores e o valor de regulação dos relés de proteção, respetivamente.

Corrente de Curto-circuito no nível MAT

Para o cálculo da corrente de curto-circuito trifásica simétrica, no interior da subestação é utilizada a seguinte expressão em (1).

$$I_{K3} = \frac{c_{m\acute{a}x} \times U_n}{|Z_K|} [pu] \quad (1)$$

Em que:

$c_{m\acute{a}x}$ – Fator de carga para a corrente de curto-circuito máxima (ver Tabela 13);

U – Tensão no barramento [pu];

Z_K – Impedância equivalente vista da instalação [pu];

I_{K3} – Corrente de curto-circuito trifásico simétrico [pu].

Tabela 13 - Fatores de tensão [25]

Tensão nominal do sistema	Fator de tensão c para o cálculo de:	
	Correntes de curto-circuito máximas	Correntes de curto-circuito mínimas
U_n	$C_{m\acute{a}x}^a$	$C_{m\acute{i}n}$
Baixa tensão: 100 V a 1000 V (IEC 60038:2009, Tabela 1)	1,05 ^c 1,10 ^d	0,95 ^c 0,90 ^d
Média tensão ^b : >1 kV a 230 kV (IEC 60038:2009, Tabelas 3, 4)	1,10	1,00
Alta tensão ^{b, e} : >230 kV (IEC 60038:2009, Tabela 5)	1,10	1,00

^a $C_{m\acute{a}x} U_n$ não deve exceder a tensão mais elevada U_m para equipamentos dos sistema de energia.

^b Deve ser aplicada $C_{m\acute{a}x} U_n = U_m$ ou $C_{m\acute{a}x} U_n = 0,90 U_m$ se a tensão nominal do sistema não é definida.

^c Para sistemas de baixa tensão com tolerância $\pm 6\%$, sistemas renomeados de 380V para 400V.

^d Para sistemas de baixa tensão com tolerância $\pm 10\%$.

^e Os fatores de tensão c não são definidos na norma CEI 60909 para sistemas com tensão nominal cuja $U_m > 420$ kV

Utilizando o método das impedâncias para cálculo da corrente de curto-circuito é necessário conhecer a impedância equivalente do sistema, vista a partir da instalação, conforme Figura 24. De acordo com o considerado, a instalação apenas tem como finalidade a alimentação de cargas.

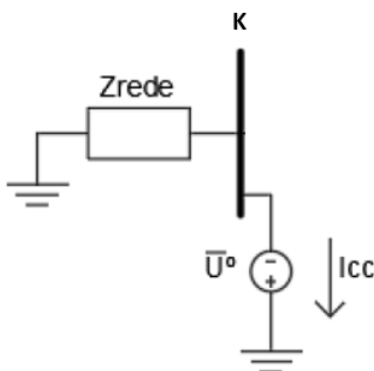


Figura 24 – Esquema para cálculo de curto-circuito no barramento K

Impedância da rede

No caso da ligação da SME à RNT compete ao ORT fornecer a ficha de caracterização do ponto de ligação da instalação à rede, identificando a potência máxima e mínima de curto-circuito (ver dados Tabela 9).

Com o intuito de simplificar, os cálculos são efetuados em valores *pu*. É definida uma potência de base (S_b), como um valor único para todo o dimensionamento, e a tensão de base (U_b) igual à tensão nominal da SME, vista a partir do barramento K, conforme Figura 24.

$$S_b = 100MVA$$

$$U_b = 220 kV$$

Assim as grandezas elétricas conhecidas ficam da seguinte forma em valores *pu*.

$$S''_k = \frac{S_{Kcc\ max}}{S_b} = \frac{9547,9 \times 10^6}{100 \times 10^6} = 95,47\ pu$$

$$U_K = \frac{U_n}{U_b} = \frac{220 \times 10^3}{220 \times 10^3} = 1\ pu$$

Em que:

S''_k - Potência de curto-circuito no ponto K [pu];

$S_{Kcc\ max}$ - Potência de curto-circuito no ponto K [MVA];

U_n – Tensão nominal na rede [V];

U_K – Tensão nominal no ponto K [pu];

U_b e S_b – Valores base.

A impedância equivalente no lado MAT da subestação, ou seja, no barramento K, é obtida a partir da expressão em (2), aplicando-se os valores da potência de curto-circuito fornecidos.

$$Z_K[pu] = \frac{c \times (U_K)^2}{S''_k} \quad (2)$$

$$Z_K[pu] = \frac{1,1 \times 1}{95,47}$$

$$Z_K[pu] = 0,012pu$$

Em que:

Z_K – Impedância no barramento K [pu];

S''_K - Potência de curto-circuito no ponto K [pu];

U_K – Tensão nominal no ponto K [pu];

c – Fator de carga para a corrente de curto-circuito.

Considerando que para redes com $U_n > 35$ kV, obtemos uma impedância $Z_K = X_K$ e $R_K \approx 0$.

Assim:

$$X_K = 0,012 [pu]$$

$$R_K = 0 [pu]$$

Aplica-se a expressão (1) e obtém-se o cálculo da corrente de curto-circuito trifásica simétrica, multiplicando-se o resultado obtido pela corrente de base respectiva, de forma a calcularmos o valor em kA (3).

Obtenção da corrente de base,

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} \times U_b}$$
$$I_b = \frac{100 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 220 \times 10^3}$$
$$I_b = 262,432 \text{ kA}$$

Utilizando (1) obtemos,

$$I_{K3} = \frac{c_{\max} \times U_n}{|Z_K|} [pu]$$
$$I_{K3} = \frac{1,1 \times 1}{|0,012|}$$
$$I_{K3} = 91,7 \text{ pu}$$

$$I_{K3 \max} = I_{K3} (pu) \times I_B [kA] \quad (3)$$

$$I_{K3 \max} = 91,7 \times 262,43$$

$$I_{K3 \max} = 24 \text{ kA}$$

Em que:

U_K – Tensão da rede [kV]

U_n – Tensão nominal [pu]

Z_K – Impedância no barramento K [pu]

S_b – Potência de base [MVA]

I_b – Corrente de base MAT [kA]

I_{K3} – Corrente máxima de curto-circuito trifásico [pu]

$I_{K3 \max}$ – Corrente máxima de curto-circuito trifásico [kA]

X_K – Reatância no ponto K [pu]

R_K – Resistência no ponto K [pu]

Corrente de Curto-circuito no nível BT

A definição da corrente de curto-circuito máxima (4) no lado da BT é fundamental para a definição do poder de corte do equipamento de proteção e para a obtenção dos dados que permitem o dimensionamento do barramento de 400 V, quer das suas dimensões quer da forma de fixação.

$$I_{MBTmax} = \frac{c \times \sqrt{3} \times U_{n \ BT}}{Z_{M \ BT}} \quad (4)$$

Em que:

I_{MBTmax} – Corrente de curto-circuito máxima no ponto M;

$U_{n \ BT}$ – Tensão nominal na baixa tensão;

$Z_{M \ BT}$ – Impedância no ponto M.

O fator de tensão c varia de acordo o tipo de curto-circuito (máximo ou mínimo) bem como a tensão (BT ou AT). U_n é a tensão nominal da instalação e Z_M é a impedância resultante do somatório de todas as impedâncias a montante do curto-circuito.

Esses cálculos podem ser efetuados utilizando o método das impedâncias, calculando se a impedância equivalente da instalação vista a partir do barramento M (400V), conforme a Figura 25.

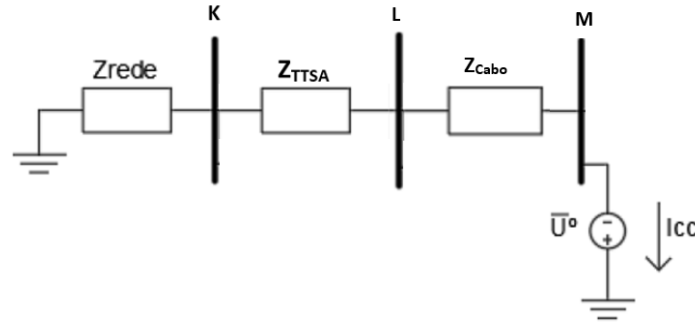


Figura 25 – Esquema para cálculo de curto-circuito no barramento M

Assim a impedância equivalente vista a partir do barramento M ($Z_{M BT}$) é obtida a partir da equação (5).

$$Z_{M BT} = \sqrt{(R_K + R_{TTSA} + R_{Cabo\ 20^\circ})^2 + (X_K + X_{TTSA} + X_{Cabo\ 20^\circ})^2} \quad (5)$$

Onde:

$Z_{M BT}$ – Impedância equivalente no ponto M [pu];

R_K e X_K – valores resistivos obtidos no ponto K [pu];

R_{TTSA} e X_{TTSA} – valores resistivos do transformador de tensão [pu];

$R_{Cabo\ 20^\circ}$ e $X_{Cabo\ 20^\circ}$ – valores resistivos do cabo entre o TTSA e o QGCA, à temperatura de 20°C.

Conhecendo se o valor do lado da rede, segue-se a obtenção dos dados do TTSA e do cabo BT entre o transformador e o quadro de BT.

Impedância do TTSA

O tipo de construção do TTSA, com uma tensão muito mais elevada no primário em relação ao secundário e com elevada potência disponível no secundário, permite equiparar este

transformador ao desempenho de um transformador de potência convencional. No ANEXO A encontram-se os dados técnicos do transformador de tensão de elevada potência, destacando-se algumas grandezas na Tabela 14 necessárias aos cálculos que se seguem.

Tabela 14 - Características TTSA

Tensão de curto-circuito	~ 6,7%
Potência de perdas nos enrolamentos	0,7 kW

A equivalência anterior assumida permite que a impedância do transformador de tensão (Z_{TTSA}) seja obtida de acordo com a equação (6), tendo em consideração ainda as seguintes características:

$$U_n = 400 \text{ V} = 0,4 \text{ kV}$$

$$S_n = 300 \text{ kVA} = 0,3 \text{ MVA}$$

$$Z_{TTSA} = \frac{U_{CC}}{100} \times \frac{S_b}{S_n} \quad (6)$$

$$Z_{TTSA} = \frac{6,7}{100} \times \frac{100 \times 10^6}{0,3 \times 10^6}$$

$$Z_{TTSA} = 22,33 \text{ pu}$$

De seguida efetua-se o cálculo da resistência do transformador segundo a equação (7), utilizando-se os valores da potência de perdas do transformador em pu (8) e da corrente estipulada (9) do transformador.

$$R_{TTSA} = \frac{P_{kr \text{ pu}}}{I_{rt \text{ pu}}^2} \quad (7)$$

$$R_{TTSA} = \frac{0,000007}{0,003^2}$$

$$R_{TTSA} = 0,78 \text{ pu}$$

$$P_{kr \text{ pu}} = \frac{P_{kr}}{S_b} \quad (8)$$

$$P_{kr \text{ pu}} = \frac{0,7 \times 10^3}{100 \times 10^6}$$

$$P_{kr \text{ pu}} = 0,000007 \text{ pu}$$

$$I_{rt\ pu} = \frac{I_{rt}}{I_b} = \frac{\frac{S_{rt}}{\sqrt{3}U_{rt}}}{\frac{S_b}{\sqrt{3}U_b}} \quad (9)$$

$$I_{rt\ pu} = \frac{I_{rt}}{I_b} = \frac{\frac{300 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 220 \times 10^3}}{\frac{100 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 220 \times 10^3}}$$

$$I_{rt\ pu} = 0,003\ pu$$

Com os valores de (7) e (8) calcula-se a reatância de curto-circuito através da equação (10).

$$X_{TTSA} = \sqrt{(Z_{TTSA})^2 - (R_{TTSA})^2} \quad (10)$$

$$X_{TTSA} = \sqrt{22,33^2 - 0,78^2}$$

$$X_{TTSA} = 22,31\ pu$$

Onde:

R_{TTSA} – Resistência do transformador;

X_{TTSA} – Reatância do transformador;

$I_{rt\ pu}$ – Corrente do TTSA;

$P_{kr\ pu}$ – Potência de perdas do TTSA;

S_{rt} – Potência estipulada do TTSA;

U_{rt} – Tensão estipulada do TTSA.

Impedância do cabo entre o TTSA e o QGCA

A obtenção das grandezas respeitantes ao cabo de BT entre o TTSA e o quadro geral de 400 V dependem do prévio dimensionamento do mesmo.

Assim, através da equação (11), obtemos a corrente nominal na BT.

$$I_{n\ BT} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \times U_{n\ BT}} \quad (11)$$

$$I_{n\ BT} = \frac{300 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400}$$

$$I_{n\ BT} = 433\ A$$

Onde:

$I_{n\ BT}$ – Corrente nominal na BT;

S_n – Potência aparente dos transformadores de tensão;

$U_{n\ BT}$ – Tensão nominal na BT.

Caraterísticas físicas do cabo:

- Tipo de isolamento: XLPE
- Temperatura ambiente: 30⁰ C
- $k_1=1$ – Fator de correção temperatura ambiente (RTIEBT Parte 5/Anexos-Quadro 52-D1);
- $k_2=0,85$ – Fator de correção para condutor/cabo (RTIEBT Parte 5/Anexos-Quadro 52-E1);
- Método de referência: B (RTIEBT Parte 5 – Quadro 52H);
- Tipo de material condutor: cobre.

Através da corrente nominal na BT deve ser calculada a corrente admissível na canalização (12), influenciada pelos fatores de correção da temperatura e radiação a que o elemento vai estar exposto, de acordo com as RTIEBT [28].

$$I'_Z = \frac{I_{n\ BT}}{\prod_{i=1}^n k_i} \quad (12)$$

$$I'_Z = \frac{I_{n\ BT}}{k_1 \times k_2}$$

$$I'_Z = \frac{433}{1 \times 0,85}$$

$$I'_Z = 509,4\ A$$

$$I'_{Zcabo} = \frac{I'_Z}{n_{cabos}} = \frac{509,4}{2} = 254,7\ A$$

Sendo:

I'_Z - Corrente admissível na canalização;

$I_{n\ BT}$ – Corrente nominal na BT;

$k_1 \times k_2$ – Fatores de correção da temperatura e radiação.

Assim, com o valor do I'_{Zcabo} faz-se a escolha da secção do cabo de cobre de 95 mm² (RTIEBT Parte 5/Anexos-Quadro 52-C4).

De acordo com o enunciado em [28], após a escolha da secção do cabo, efetua-se o cálculo das suas grandezas resistivas máximas em (13) e (14), utilizando a temperatura inicial aplicada ao condutor e a resistividade elétrica do material do condutor a 20°C, segundo os seguintes dados obtidos em [28] e implantação da SME em estudo.

$$\rho_{20^\circ} = 17,241 \times 10^{-6} \Omega \cdot mm$$

$$l = 14 \text{ m} - \text{comprimento do cabo}$$

$$\begin{aligned} R_{Cabo\ 20^\circ} &= \frac{\rho_{20^\circ} \times l}{s} \\ R_{Cabo\ 20^\circ} &= \frac{\frac{\rho_{20^\circ} \times l}{s}}{n_{cabos}} \\ R_{Cabo\ 20^\circ} &= \frac{\frac{17,241 \times 10^{-6} \times 14}{95 \times 10^{-3}}}{2} \\ R_{Cabo\ 20^\circ} &= 0,0013 \Omega \end{aligned} \tag{13}$$

Onde:

$R_{Cabo\ 20^\circ}$ - Resistência do cabo, obtida com valor de temperatura a 20°;

ρ_{20° – Resistividade do cobre (Cu) a 20°C;

l – Comprimento do cabo;

s – Secção do cabo.

Definindo-se como valor médio da reatância do cabo identificado o valor de $X_c = 0,08m\Omega/m$.

Logo,

$$\begin{aligned}X_{Cabo\ 20^\circ} &= X_c \times l \\X_{Cabo\ 20^\circ} &= \frac{0,08 \times 10^{-3} \times 14}{2} \\X_{Cabo\ 20^\circ} &= 0,1 \times 10^{-3}\Omega\end{aligned}\tag{14}$$

Onde:

$X_{Cabo\ 20^\circ}$ - Reatância do cabo, com temperatura a 20° ;

l – Comprimento do cabo.

A impedância máxima no barramento M de acordo com a equação (5) obtém-se utilizando os dados supra calculados.

$$\begin{aligned}Z_{M\ BT} &= \sqrt{(R_K + R_{TTSA} + R_{Cabo\ 20^\circ})^2 + (X_K + X_{TTSA} + X_{Cabo\ 20^\circ})^2} \\Z_{M\ BT} &= \sqrt{(0 + 0,78 + 0,0013)^2 + (0,012 + 22,31 + 0,0001)^2} \\Z_{M\ BT} &= 22,3\ pu\end{aligned}$$

Obtém-se a corrente de curto-circuito máximo na BT segundo a equação (4).

$$\begin{aligned}I_{MBTmax} &= \frac{1,1 \times \sqrt{3} \times 1}{22,3} \\I_{MBTmax} &= 0,09\ pu\end{aligned}$$

Passando os valores pu para amperes (16) utilizando o cálculo da corrente de base na BT (15).

$$\begin{aligned}I_{b\ BT} &= \frac{S_b}{\sqrt{3} \times U_{b\ BT}} \\I_{b\ BT} &= \frac{100 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 400}\end{aligned}\tag{15}$$

$$I_{b\ BT} = 144338\ A$$

$$I_{M\ max} = I_{MBT\ max}\ (pu) \times I_{b\ BT}\ [A] \quad (16)$$

$$I_{M\ max} = 0,09 \times 144338$$

$$I_{M\ max} = 12990\ A$$

Onde:

$I_{M\ max}$ – Corrente de curto-circuito máxima no ponto M [A];

$I_{MBT\ max}$ – Corrente de curto-circuito máxima no ponto M [pu];

$I_{b\ BT}$ – Corrente de base na BT [A].

Assim, a corrente de curto-circuito máxima no barramento M ($I_{M\ max}$) é de 12,99 kA.

4.6.6. Rede geral de terra

Introdução

A importância da segurança de pessoas e bens dentro de uma subestação faz com que o correto dimensionamento da rede de terras seja muito relevante. Uma rede de terras a ser construída, tem de ser estruturada como uma terra única que englobará toda a subestação, respeitando o Regulamento de Segurança de Subestações e Postos de Transformação e Seccionamento (RSSPTS) [26].

São dois os objetivos da ligação à terra, assegurar que as pessoas nas proximidades de instalações ligadas à terra não estejam expostas ao perigo (eletrocussão ou eletrização) e providenciar meios para conduzir correntes elétricas para a terra em condições de defeito sem exceder os limites estipulados dos equipamentos ou afetar a continuidade de serviço.

Assim, a rede geral de terras é constituída pela instalação subterrânea e pelas respectivas interligações aos equipamentos. Para além da rede geral de terras, é necessário proceder à equipotencialização de todas as massas metálicas sem potencial. Das estruturas e partes metálicas existentes numa subestação destacam-se as seguintes:

- Vedação metálica de delimitação da área da subestação;
- Portas, portões e tampas metálicas interiores ou exteriores;

- Armários, quadros e chassis metálicos;
- Equipamentos de baixa tensão com estrutura metálica;
- Terminais de terra de todos os aparelhos AT;
- Manípulos de comando dos órgãos de manobra da aparelhagem;
- Transformador de serviços auxiliares;
- Descarregadores de sobretensões;
- Seccionadores de terra;
- Cabos de guarda;
- Postes e estruturas;
- Armaduras metálicas embebidas em betão (edifício de comando e muro exterior da subestação).

Obtenção dados de campo

O local escolhido para instalação de uma subestação está diretamente relacionado com o dimensionamento da rede de terra, em particular a resistividade do terreno. Um dos fatores importantes é a área total disponível para implantação da rede, pois quanto maior esta for, mais baixa será a resistência de terra associada e, conseqüentemente, menor será a elevação do potencial de terra.

Cálculo da secção e diâmetro dos condutores de terra

Para evitar a autodestruição dos condutores em consequência da elevação da temperatura devido à passagem da corrente de curto-circuito, deve ser tido em conta a secção mínima dos condutores, obtendo se através da expressão (17).

$$s_{min} = \frac{I_k''}{\sqrt{\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)}} \quad (17)$$

Em que:

s_{min} – Secção mínima dos condutores [mm²]

$TCAP$ – Capacidade térmica por unidade de volume [$J \text{ cm}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$]

t_c – Tempo de duração da corrente de defeito [s]

I_k'' – Corrente de curto-circuito máxima defeito fase-terra [kA]

T_m – Temperatura máxima permitida [°C]

T_a – Temperatura ambiente [°C]

α_r – Coeficiente de variação da resistividade à temperatura de referência [°C⁻¹]

ρ_r – Resistividade do solo à temperatura de referência [Ωm]

K_0 – Inverso do coeficiente de variação da resistividade [°C]

Segundo os dados da Tabela 9 a potência de curto-circuito máximo no defeito fase-terra é:

$$S_k'' = 1037 \text{ MVA}$$

Assim, obtemos a corrente de curto-circuito máxima no defeito fase-terra através de (18).

$$I_k'' = \frac{S_k''}{U / \sqrt{3}} \quad (18)$$

$$I_k'' = \frac{1037 \times 10^6}{\frac{220 \times 10^3}{\sqrt{3}}}$$

$$I_k'' = 2721,4 \text{ A}$$

Dos dados de campo do local escolhido para implantação da SME obtém-se as seguintes características.

Natureza do terreno: Terreno arável gordo e aterro compacto húmido

$\rho = 50 \Omega m$ (valor médio pela natureza do terreno, segundo RTIEBT)

Área da subestação: $A = 55 \times 40 = 660 \text{ m}^2$

Considerando que os condutores de terra são de cobre eletrolítico macio, regista-se os valores das constantes, de acordo com o identificado no RSSPTS [26].

$$\alpha_r = 0,00393^\circ\text{C}^{-1}$$

$$K_0 = 234^\circ\text{C}$$

$$\rho_r = 1,72 \mu\Omega.cm$$

$$TCAP = 3,42 J/cm^3 \text{ } ^\circ C$$

$$T_m = 1083^\circ C$$

Considera-se ainda que:

$$T_a = 40^\circ C$$

$$t_c = 0,5s$$

Assim, através de (17) calcula-se a secção mínima.

$$s_{min} = \frac{2,72}{\sqrt{\frac{3,42 \times 10^{-4}}{0,5 \times 0,00393 \times 1,72} \ln\left(\frac{234 + 1083}{234 + 40}\right)}}$$
$$s_{min} = 6,82 \text{ mm}^2$$

Escolhendo condutores circulares para composição da rede pode-se obter o seu diâmetro (19) utilizando a secção mínima.

$$d_{min} = \sqrt{\frac{4 \times s_{min}}{\pi}} \text{ [mm]} \quad (19)$$
$$d_{min} = \sqrt{\frac{4 \times 6,82}{\pi}}$$
$$d_{min} = 2,95 \text{ mm}$$

Em que:

d_{min} – Diâmetro mínimo do condutor [mm];

s_{min} – Secção mínima [mm].

Embora acarrete um custo maior na aquisição do cabo, procurando ir ao encontro duma normalização dos habituais materiais aplicados nas subestações e prevendo a expansão da

subestação, o cabo de cobre escolhido é de 120 mm^2 a que corresponde um diâmetro de 14,2 mm.

Tensão de contato

A tensão de contacto corresponde à diferença de potencial entre a elevação do potencial de terra e o potencial à superfície onde uma pessoa tem os pés. Esta é a tensão tolerável pelo corpo humano sem o perigo de se estabelecer uma corrente que atravesse

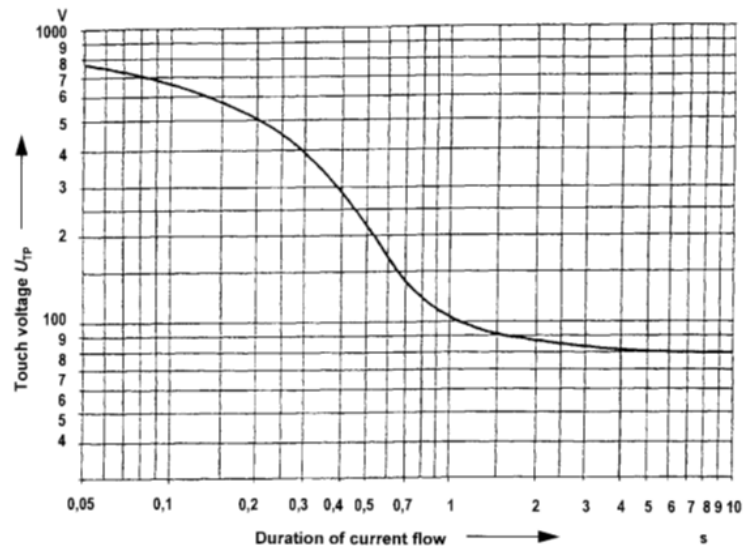


Figura 26 - Valores de U_{TP} em função do tempo de duração do defeito [24]

o corpo e provoque a fibrilação cardíaca. Os valores de U_{TP} são dados obtidos no gráfico da Figura 26 em função do tempo de duração do defeito, verificando-se:

$$T_c = 0,5 \text{ s} \rightarrow U_{TP} = 220 \text{ V (tensão máxima tolerável)}$$

Configuração inicial da Rede Geral de Terra

Com o intuito de obter-se o comprimento total dos elementos de terra através da expressão (20) ou (21), consoante se utilizem ou não elétrodos de terra ao longo do perímetro, é necessário utilizar os dados da configuração inicial da rede de terra da subestação, a seguir identificados.

$$L_x = 55m$$

$$L_y = 40m$$

$$A = 2200 \text{ m}^2$$

Dimensão da quadricula: $2m \times 2m$

$$L_r = 4m$$

Distância entre a área de construção e vedação: $3m$

Assim, existem 28 condutores com 40 m e 21 condutores com 55 m. A ligação à vedação será realizada nos cantos da subestação através de condutor de 2,8m.

Assim o comprimento total dos condutores obtém-se da seguinte forma:

$$L_c = 28 \times 40 + 21 \times 55 + (2 \times 3 \times 28) + (2 \times 3 \times 55) + (4 \times 2,8) = 2784,2m$$

Na subestação existem 24 caixas de visita destinadas à instalação de 2 elétrodos de 4 metros, instaladas ao longo do perímetro. Assim, o comprimento total de elétrodos enterrados é dado por:

$$L_r = 2 \times 4 \times 24 = 192m$$

Onde:

A - área total da subestação [m^2];

L_x – comprimento da instalação [m];

L_y – largura da instalação [m];

L_v – comprimento de cada piquete [m];

L_R – comprimento total dos elétrodos de terra enterrados [m];

L_C – comprimento total dos condutores enterrados [m];

L_T – comprimento total dos condutores na rede de terra [m].

No caso da solução apresentada, obtemos o comprimento total dos condutores na rede de terra através da equação (20) uma vez que não são aplicados elétrodos de terra ao longo do perímetro.

$$L_T = L_C + \left[1,55 + 1,22 \frac{L_v}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right] \times L_R \quad (20)$$

(rede com elétrodos de terra ao longo do perímetro)

$$L_T = L_C + L_R \quad (21)$$

(para redes sem elétrodos de terra ao longo do seu perímetro)

Obtenção do comprimento total de condutores através de (20).

$$L_T = 2784,2 + \left[1,55 + 1,22 \frac{4}{\sqrt{55^2 + 40^2}} \right] \times 192$$

$$L_T = 3095,98 \text{ m}$$

Resistência da rede de terra

Para o cálculo da resistência da rede de terra R_g utilizamos a equação expandida de Sverak [28], segundo a expressão (22).

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20 \times A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] [\Omega] \quad (22)$$
$$R_g = 50 \left[\frac{1}{3095,58} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 2200}} \left(1 + \frac{1}{1 + 2 \sqrt{\frac{20}{2200}}} \right) \right]$$
$$R_g = 0,454 \Omega$$

Em que:

h – Profundidade de enterramento da rede de terra [m]

R_g – Resistência da rede de terra.

Corrente máxima da rede de terra

A corrente máxima que flui para a terra é dada pela expressão (23).

$$I_G = D_f \times S_f \times I_k'' [\text{kA}] \quad (23)$$

Em que:

D_f – Fator de depreciação correspondente ao tempo de duração do defeito

I_k'' – Corrente de curto-circuito máxima defeito fase-terra [kA]

S_f - Divisor de corrente devido à dispersão de elementos ligados à rede de terra da subestação e outras terras, no entanto esta grandeza não é considerada em virtude da SME não ter ligação física aos cabos de guarda da linha MAT;

O fator D_f obtém-se através das expressões (24) e (25).

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}}\right)} \quad (24)$$

$$T_a = \frac{X}{\omega R} = \frac{X}{100\pi R} \quad (25)$$

Em que:

t_f – Tempo de duração do defeito

Os valores de D_f calculados para os tempos habituais de atuação das proteções e semelhantes aos aplicados neste dimensionamento são praticamente iguais à unidade, considerando se assim $D_f \cong 1$.

Assim por (24) obtemos a corrente máxima que flui para terra.

$$I_G = 1 \times 2,72 = 2,72 \text{ kA}$$

Elevação do potencial de terra

Com os dados da resistência da rede de terra R_g e da corrente de defeito I_G , obtém-se a elevação do potencial máximo U_E da terra que irá ocorrer na rede de terra através da expressão (26).

$$U_E = I_G \times R_g \quad (26)$$

$$U_E = 2,72 \times 0,454$$

$$U_E = 1 \text{ kV}$$

Onde:

U_E – Elevação do potencial de terra máximo;

I_G – Corrente de defeito entre a rede e a terra;

R_g – Resistência da rede de terra.

O valor da elevação do potencial de terra deve ser verificado se é igual ou inferior ao dobro da tensão máxima de contacto tolerável pelo corpo humano de acordo com a expressão (27) e que segundo a Figura 26, para um tempo de atuação de 0,5 seg, a tensão máxima admissível é de 220V.

$$\begin{aligned} U_E &\leq 2 \times U_{TP} \\ 1 &\leq 2 \times 0,220 \end{aligned} \quad (27)$$

Em que:

U_{TP} - Tensão máxima de contacto tolerável pelo corpo humano;

Caso a condição se verificasse, segundo indicação do documento HD 637 S1:1999 da CENELEC [27], a rede de terra projetada ficaria validada. Dado que a condição não se verificou, temos de averiguar se em algum ponto da rede de terra poderá existir tensões de malha superiores a $2 \times U_{TP}$.

Tensão da malha

Tensão de malha (E_m) é a máxima tensão de contacto na quadrícula mais afastada da malha formada pela rede de terra e obtém-se através da expressão (28).

$$E_m = \frac{\rho \times K_m \times K_i \times I_G}{L_T} [V] \quad (28)$$

Em que:

E_m – Tensão de malha [V];

ρ – Resistividade média do solo [Ωm];

I_G – Corrente máxima que flui da rede para a terra [kA];

L_T – Comprimento total dos condutores enterrados [m];

K_i – Fator de correção relativamente à irregularidade da corrente [kA];

K_m – Fator de malha definido para n condutores paralelos.

A relação entre a tensão de malha e o fator de malha depende da relação entre a densidade de corrente na periferia dos condutores e a densidade de corrente nos condutores interiores. De modo a incorporar este efeito, este fator é calculado através da expressão (29).

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16 \times h \times d} + \frac{(D + 2 \times h)^2}{8 \times D \times d} - \frac{h}{4 \times d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \times \ln \left(\frac{8}{\pi \times (2 \times n - 1)} \right) \right] \quad (29)$$

Em que:

D – Distância da quadrícula da malha [m];

d – Diâmetro do cabo de cobre [m];

K_{ii} – Fator de correção para redes com ou sem elétrodos de terra na periferia.

Para redes com elétrodos de terra ao longo do seu perímetro, o fator K_{ii} (30) assume o valor de 1, caso contrário é calculado através da seguinte expressão:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}} \quad (30)$$

O fator K_h é dado pela expressão (31).

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (31)$$

Sendo $h = 2$, obtemos:

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{2}{1}} = 1,73$$

Em que:

h – Profundidade de enterramento da rede de terra [m]

h_0 – Profundidade de referência, igual a 1 m;

No cálculo de K_m poderão ser realizadas estimativas e aproximações e assim ser necessário introduzir uma compensação pelo fato do modelo matemático para “n” condutores em paralelo não representar na globalidade os efeitos geométricos da rede. Assim, o fator K_i é calculado através da equação (32).

$$K_i = 0,644 + 0,148 \times n \quad (32)$$

Obtém-se o valor de “n” através da expressão (33).

$$n = n_a \times n_b \times n_c \times n_d \quad (33)$$
$$n_a = \frac{2 \times L_c}{L_T}$$

Com:

$$n_b = 1, \text{ para redes de em quadrado, sendo a expressão para outros formatos: } n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \times \sqrt{A}}}$$

$$n_c = 1, \text{ nas redes quadradas e retangulares, e para outros formatos: } n_c = \left(\frac{L_x \times L_y}{A}\right)^{\frac{0,7 \cdot A}{L_x - L_y}}$$

$$n_d = 1, \text{ nas redes quadradas, retangulares e em 'L', e para outros formatos: } n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}$$

Em que:

L_c – Comprimento total de condutores na rede de terra [m];

L_p – Perímetro da rede [m];

A – Área total da rede de terra [m²];

L_x – Comprimento máximo da rede na direção dos eixos “xx” [m];

L_y – Comprimento máximo da rede na direção dos eixos “yy” [m];

Assim, considerando $n_b = n_c = n_d = 1$, obtemos (33),

$$n_a = n = \frac{2 \times 2784,2}{2 \times (55 + 40)}$$

$$n_a = n = 29,3$$

e a expressão (25), $K_i = 0,644 + 0,148 \times 29,3 = 4,98$

Com os dados já obtidos, calcula-se o fator da malha através da expressão (29).

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2}{16 \times 2 \times 0,0142} + \frac{(2 + 2 \times 2)^2}{8 \times 2 \times 0,0142} - \frac{2}{4 \times 0,0142} \right) + \frac{1}{1,73} \times \ln \left(\frac{8}{\pi \times (2 \times 29,3 - 1)} \right) \right]$$
$$K_m = 0,51$$

Assim, obtemos a tensão na malha através de (28).

$$E_m = \frac{50 \times 0,51 \times 4,98 \times 2,72}{3095,98}$$
$$E_m = 0,112 \text{ V}$$

Como,

$$E_m \leq 2 \times U_{TP}$$
$$0,112 \leq 2 \times 0,22$$

Como a condição é verificada (1º critério de validação), a rede de terra projetada fica assim validada de acordo com o documento em [26].

Especificação do equipamento

O dimensionamento efetuado da SME, através do cálculo de algumas das características elétricas, permitirá a escolha de diversos equipamentos que compõem a subestação, no entanto, não sendo objeto os dimensionamentos exaustivos da instalação existem características por identificar, não permitindo a seleção de todos os equipamentos, como p.e. as cadeias e colunas de isoladores.

Os parâmetros gerais e principais características da aparelhagem, de acordo com o dimensionamento efetuado, são os seguintes:

Sistema:	trifásico
Frequência:	50 Hz
Tensões nominais:	220 kV e 400V
Tensões mais elevadas das redes:	245kV e 420 V
Regime de neutro 220 kV:	diretamente à terra
Corrente de curta duração MAT:	24 kA
Corrente de curta duração BT:	12,9 kA
Duração admissível do CC:	0,5 seg.
Corrente nominal MAT:	0,787 A
Corrente nominal BT:	433 A
Rede de terra com cabo de CU de:	120 mm ²
Nível de poluição:	forte
Linha de fuga:	25 mm/kV

Caraterísticas dos transformadores de tensão (ver catálogo do fabricante no Anexo A)

Tensão nominal (U _{pr}) (kVef)	220
Tensão máxima de serviço (U _m) (kVef)	245
Relações de transformação - Tensão nominal primária (kVef)	220/√3
Tensão secundária (kV)	0,4/√3
Potencia secundária (monofásica) (KVA)	100
Potencia secundária (trifásica) (KVA)	300
Duração admissível da corrente de curto-circuito (s)	1
Tensão à terra suportável à frequência industrial 1 min. (kVef)	460
Tensão à terra suportável ao choque atmosférico (kV)	1050
Cargas estáticas de ensaio aos terminais primários (N)	1250
Linha de fuga específica mínima (cm/kV)	2,5

Capítulo V – Conclusões

5.1. Principais conclusões

O presente trabalho corresponde a um trabalho de consolidação que tem por base a análise de estudos realizados por organismos europeus do setor elétrico e nas publicações de opinião consultadas os quais apresentaram um conjunto de fatores que fazem do VE e respetivo carregamento um marco importante para a descarbonização do setor dos transportes. Para o efeito foram identificados os interlocutores presentes no carregamento de VE e apresentados os ORT como os atores capazes de tomar a dianteira no processo emergente que é a ME. Em particular, o envolvimento dos ORT, permite tornar possível e de forma mais consistente, a reação ao impacto que as infraestruturas de carregamento terão na rede de MAT, com o crescente número de VE a circular. Este crescimento acentuado do número de VE está patente no estudo SDS com a previsão de 245 milhões de veículos a circular em 2030. Claro que para este cenário ser alcançado contribuem as diversas políticas de discriminação positiva postas em prática em várias cidades europeias ou mesmo incentivos financeiros promovidos por vários países com intuito de acelerar a distribuição do VE pelos utilizadores, conforme se evidencia durante este trabalho. Uma vez mais, dada a atuação apenas nacional ou até regional das diversas ações postas em prática, surge o papel do ORT como único capaz de promover a necessária cooperação com o ORD, onde serão ambos intervenientes no planeamento da adaptação da rede, na previsão da curva de carga e na operação da rede e respetivo despacho. Foi ainda visível que será através do ORT que políticas de justiça social no âmbito da transição para a ME serão implementadas, dada a sua distribuição por todo o território.

Com base nos recursos referenciados foi possível evidenciar o número útil de carregadores elétricos públicos existentes e os resultados que se pretendem alcançar, sempre apoiado nas tecnologias atuais de carregamento apresentadas e respetivas formas operacionais de o fazer. Uma vez mais, este desenvolvimento do número de carregadores assenta nos vários incentivos de apoio evidenciados e na descrição das ações de cada um dos atores presentes na mobilidade elétrica.

O dimensionamento apresentado visa ser uma evidência da fácil aplicação da solução inovadora enunciada. A implantação de uma subestação para a ME, de acordo com os critérios definidos, permitirá a alimentação do PCVE praticamente sem qualquer tipo de constrangimento, uma vez que a potência disponível da linha MAT é cerca de mil vezes superior à potência do conjunto de

transformadores de tensão propostos na solução, verificando-se a possibilidade de alimentação dos carregadores sugeridos. Conforme o dimensionamento apresentado demonstra, este tipo de subestação, ao integrar os transformadores de tensão de alta potência, permite efetuar a transformação a partir da MAT para a BT, a custos diferentes de uma subestação convencional, uma vez que utiliza um menor número de equipamentos MAT. Por outro lado, como é evidenciado em 4.2.3, existe a possibilidade de aumentar a potência disponível no posto de carregamento de veículos elétricos, aumentando assim o número de carregadores e de veículos a carregar, bastando para isso aumentar o número de transformadores de tensão instalados. A capacidade de a solução promover uma expansão da rede de carregamento elétrico em todo o território é evidenciada através dos seguintes fatores.

- **Disponibiliza uma cobertura nacional para o uso generalizado de VE**, permitindo a implementação nas zonas limítrofes dos centros urbanos ou nas vias rodoviárias, utilizando pontos de cruzamento ou proximidade das linhas elétricas com as vias de comunicação;
- **Elimina restrições de rede**, através da ligação direta à Rede de MAT, evitando a necessidade de reforço de redes, em particular nas zonas rurais, potenciando uma rápida transição;
- **Disponibiliza potência virtualmente ilimitada nos vários pontos de ligação**, promovendo a escalabilidade e capacidade de implantação de carregamento rápido, solucionando as dúvidas sobre a ‘ansiedade de bateria’, disponibilizando múltiplos carregadores, e sobre o tempo de carga, ao disponibilizar mais potência;
- **Aumento da Qualidade de Serviço**, ao ceder aos utilizadores dos VE uma qualidade de serviço de uma rede de transporte de energia, com valores mínimos de interrupção.

5.2. Sugestões de trabalho futuro

Com o crescente desenvolvimento tecnológico de soluções sustentáveis que influenciam diariamente a tomada de decisões sobre o caminho da ME, surgirão naturalmente atualizações à solução preconizada, podendo assim o trabalho apresentado ser complementado. Existem ainda aspetos e ações de relevo na solução que podem ter impacto na RNT e que não foram objeto de estudo neste trabalho, como sejam as consequências para o TTSA e restantes

equipamentos no momento de energização e retirada de energia através operação do seccionador de isolamento da SME e a ocorrência de fenómenos de ferro-ressonância na rede em virtude da instalação de um transformador de tensão indutivo de grande potência. No trabalho foi ainda apresentada a necessidade de acesso a rede de telecomunicações íntegra e fiável. Na sequência dos constrangimentos e ações de melhoria supra identificados, são sugeridas duas ideias para a progressão do desenvolvimento do estudo.

- A modelização e simulação da solução proposta, permitindo efetuar a análise da influência da operação da instalação para os equipamentos da SME, em particular o TTSA, e os efeitos de fenómenos de ferro-ressonância na rede em virtude da instalação de um transformador de tensão indutivo de grande potência.
- A identificação de caraterísticas e respetivo dimensionamento de infraestrutura de comunicações, para acesso remoto e interligação com as subestações nos extremos da LMAT.

Referências Bibliográficas

- [1] Estratégia Europeia de Mobilidade Hipocarbónica, Comunicação da Comissão Europeia-Bruxelas, 20.7.2016;
- [2] ENTSO-E, “Electric Vehicles integration into power grids”, 2021;
- [3] ENTSO-E, “Research, Development & Innovation Roadmap 2020 – 2030”;
- [4] IEA-International Energy Agency, “Global EV Outlook 2020”;
- [5] EV City Casebook 2014. Disponível em:
<https://www.crescimentosustentavel.org/publicacoes/projectos-de-investigacao/vencer-o-desafio-da-mobilidade-eletrica-em-portugal>
- [6] T&E-Transport and Environment, “Recharge EU: how many charge points will Europe and its Members States need in 2020s”, Published January 2020
- [7] Diretiva 2014_94_UE do Parlamento Europeu e do Conselho, relativa à criação de uma infraestrutura para combustíveis alternativos
- [8] DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia: “Guia Técnico das Instalações Elétricas para Alimentação de Veículos Elétricos” – Versão 19 de setembro de 2017
- [9] CT_Circutor_catálogo sobre carregamento elétrico. Disponível em:
https://docs.circutor.com/docs/CT_RVE_PT.pdf
- [10] Red Eléctrica joins the sustainable mobility challenge aimed at promoting the use of electric cars in municipalities and facilitating the installation of public charging points. Disponível em: <https://www.ree.es/en/press-office/news/press-releases/2018/12/red-electrica-joins-sustainable-mobility-challenge-aimed-at-promoting-the-use-of-electric-cars-in-municipalities-and-facilitating-the-installation-of-public-charging-points>
- [11] The biggest electricbus project in poland with chargers from ekoenergetyka-polska. Disponível em: <https://www.sustainable-bus.com/components/ekoenergetyka-powers-volvo-electric-buses-in-inowroclaw/>
- [12] Porsche Italia, Q8 and Enel X join forces to expand the ultrafast charging network across Italy. Disponível em:
<https://www.enel.com/media/explore/search-press-releases/press/2021/01/porsche-italia-q8-and-enel-x-join-forces-to-expand-the-ultrafast-charging-network-across-italy>
- [13] France launches €100 million funding programme for electric vehicle fast charging. Disponível em: <https://www.electrive.com/2021/02/15/france-to-fund-fast-charging-sites-with-e100mn/>

- [14] Extension of the Portuguese EV charging network. Disponível em: <https://www.interregeurope.eu/emobility/news/news-article/10817/extension-of-the-portuguese-ev-charging-network/>
- [15] International Research Journal, Volume 12, Number 3, Fall 2014: The Electric Vehicles Ecosystem Model: Construct, Analysis and Identification of Key Challenges
- [16] Expresso, 20MARÇO2021 _ REN cria solução inovadora para carros elétricos
- [17] REN — Dados Técnicos, 2020
- [18] DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia: “Guia Técnico Das Instalações Elétricas para Alimentação de Veículos Elétricos” – Versão 19 de setembro de 2017
- [19] Jorge Martins, REN-Redes Energéticas Nacionais - “HPEVCS - High Power Electric Vehicle Charging Stations”, Renewable Energy Grid Integration Week 2021, Germany, 27 ...Disponível em: <https://conference-service.com/regridweek2021>;
- [20] Miguel Ribeiro Seixas, “Sistemas de Proteção em Redes Elétricas e Automatização de Subestações”, ISEP 2020
- [21] Carlos Filipe Ribeiro Queirós, “Coordenação de isolamento em subestações”. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [22] ISO/IEC. Insulation co-ordination - Part 1: Definitions, principles and rules. IEC 60071-1, 8ª edição, 2006.
- [23] Alexandre Barreira, Castilho Neves, Nelson Cruz, Allen Lima, Andrade Lopes, e Mota Duarte. Guia de coordenação de isolamento para a rede AT, EDP, dezembro 1985.
- [24] ISO/IEC. Insulation co-ordination - Part 2: Application guide. IEC 60071-2, 3ª edição, 1996.
- [25] Neutro à terra – Revista Técnico Científica, Nº26, 2º semestre de 2020, ano 13, artigo sobre “Correntes de Curto-Circuito em Sistemas Trifásicos”
- [26] RSSPTS; (1960)-Regulamento de Segurança de Subestações e Postos de Transformação e Seccionamento, março 1960.
- [27] HD 637 S1 da CENELEC, 1999
- [28] RTIEBT-Regras Técnicas das Instalações Elétricas de Baixa Tensão, Edição de 2020

Anexos

Anexo A - Caraterísticas TTSA



Equivalent Circuit of Power Voltage Transformer

TG reference: PSVS 245 – 100

PSVS 245 – 100 (abstract from winding instruction)

Reihe-U _m [kV]	245	Primärsp. [V]	220000 / $\sqrt{3}$
U _{pruf} -Wick. [kV]	3	Sekundärsp. [V]	400 / $\sqrt{3}$
U _{pruf} -wind. [kV]	460	Wicklung	
Stoßpegel [kV]	1050	S _n [VA]	100000
Frequenz [Hz]	50	Klasse	+/- 3%
Isolierstoffklasse	E	SG [VA]	100000
1,5 · U _n 30"		Betriebsart	DB

Technical data sheet

245 kV

Item 0100: Power Voltage Transformer (gas insulated)

Apparatus Type	PSVS 300-100 for 245 kV level
Standard	IEC 61869-3, IEC 60076
Insulation	SF ₆
Insulation Class	E
Leakage rate	<0,5%
Design	Explosion-proof

Service Conditions

Maximum altitude	m	≤ 1000
Ambient temperature range	°C	-25 to +40

Insulation Coordination

Rated voltage U _N	kV	220
Highest voltage U _M	kV	245
Rated power frequency f _N	Hz	50
PD level at 1,1 U _N / $\sqrt{3}$	pC	≤ 5
Power frequency withstand voltage primary (50 Hz/1 min)	kV	460
Power frequency withstand voltage secondary (50 Hz/1 min)	kV	3
Lightning impulse withstand voltage	kV	1050
Switching impulse withstand voltage	kV	n.a.

Electrical data

- Number of secondary windings (power windings):	2
- Voltage factor	1.2 / continuous 1.5 / 30 s 220 000: $\sqrt{3}$ V
- Rated primary voltage line to ground V	220 000: $\sqrt{3}$ V
- Rated secondary voltage(s) for power winding(s)	400 V
- Total continuous output power at 40°C ambient temperature	100 kVA

Secondary power windings

- Ratio / Burden / Ratio deviation:	
- winding 1: 50 kVA; voltage ratio deviation depending on load ≤ ±3%	
- winding 2: 50 kVA; voltage ratio deviation depending on load ≤ ±3%	

Insulator

Insulator type:	mm	Composite insulator with silicone sheds (LSR), light grey
Creepage distance:	mm	≥ 7595 mm (≥ 31 mm/kV)
Arcing distance:	mm	≥ 2350 mm