



Simulador e Controlador de Carga da Bateria de um Veículo Elétrico

GONÇALO SANTOS CRUZ

Outubro de 2022

SIMULADOR E CONTROLADOR DE CARGA DA BATERIA DE UM VEÍCULO ELÉTRICO

Gonçalo Santos Cruz

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Sistemas Autónomos

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de
Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: Gonçalo Santos Cruz, Nº 1171161, 1171161@isep.ipp.pt

Orientação científica: Doutor António Quadros Flores, aqf@isep.ipp.pt

Empresa: Efacec Electric Mobility, S.A.

Supervisão: Eng.º Rui Faria Gonçalves, rui.goncalves@efacec.com



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Área de Especialização em Sistemas Autónomos

2022

“People want to see something that shows them you can do what you say.

That’s the trick.”

Christopher Nolan

Agradecimentos

Ao longo da realização da presente dissertação, existe uma série de contributos que não devem deixar de ser mencionados. Por esta razão, gostaria de proferir os mais sinceros agradecimentos às várias pessoas e entidades que, direta ou indiretamente, desempenharam um papel importante nesta fase académica.

Em primeiro lugar, agradeço ao Doutor António Quadros Flores, pelo apoio, orientação, conhecimento partilhado e motivação no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, que me acompanhou ao longo dos últimos cinco anos e me preparou para a minha carreira profissional.

Agradeço aos Engenheiros Rui Gonçalves e Nuno Costa, pela supervisão prestada e pelas ideias partilhadas, salientando a sua disponibilidade para a discussão de aspetos importantes do projeto.

Agradeço à Efacec, pela forma notável como me acolheu e pelas condições disponibilizadas. Um especial agradecimento à equipa de I&D, pela oportunidade, companheirismo e por facilitarem o processo de integração na empresa.

Agradeço à equipa de Engenharia do Produto e, em especial, ao André Santos e Júlio Correia, pela disponibilidade e pelo incessante apoio na concretização da solução final.

Agradeço a todos os meus amigos, que sempre estiveram disponíveis para prestar auxílio, pelos momentos partilhados e pela força que me deram ao longo desta jornada.

Por último, agradeço, de forma calorosa e emocional, aos meus pais e família, por sempre acreditarem em mim, guiarem-me durante o meu percurso académico e contribuírem positivamente para a pessoa em que me tornei hoje.

Resumo

O presente projeto foi proposto pela Efacec Electric Mobility, S.A. (EEM) em colaboração com o Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). A dissertação foca-se no desenvolvimento de um simulador de bateria e controlador de carga de um Veículo Elétrico (VE). O principal objetivo é a implementação de um sistema que permita estabelecer diferentes cenários de carga e testar a comunicação com o carregador.

O aumento das vendas de VEs reforça a necessidade do desenvolvimento de soluções específicas para a simulação laboratorial do VE por parte das empresas que fabricam infraestruturas para o seu carregamento. Nesse sentido, torna-se vantajosa a automatização de casos de teste e deteção de falhas, bem como o registo de toda a informação durante o processo de carga.

Projetou-se, implementou-se e testou-se um sistema que permite realizar ensaios de carga, ensaios de esforço e ensaios de falha, envolvendo carregadores de 45 kW e de 120 kW. Foram executados com sucesso diversos testes de validação da solução.

Os resultados permitiram concluir que o sistema implementado é robusto, preciso e apresenta uma rápida resposta. O simulador adapta-se aos limites de potência dos carregadores. Além disso, deteta e identifica possíveis falhas durante o carregamento, facilitando a sua correção.

O trabalho desenvolvido e o protótipo implementado cumpriram com os objetivos propostos, constituindo uma mais-valia para a empresa.

Palavras-Chave

Simulador de bateria, Controlador de carga, Veículo Elétrico, Carregador de Veículos Elétricos, CHAdeMO, CCS

Abstract

This project was proposed by Efacec Electric Mobility, S.A. (EEM) in collaboration with Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). The dissertation focuses on the development of a battery simulator and charge controller for an Electric Vehicle (EV). The main goal is the implementation of a system that allows establishing different charging scenarios and testing the communication with the charger.

The increasing sales of EVs reinforces the need for the development of specific solutions for EV laboratory simulation by companies manufacturing charging infrastructure. The automation of test cases and fault detection, as well as the recording of all information during the charging process, is useful.

A system was designed, implemented and tested that enables load tests, stress tests and failure tests to be carried out, involving 45 kW and 120 kW chargers. Several tests were successfully performed to validate the solution.

The results allowed us to conclude that the implemented system is robust, accurate and presents a fast response. The simulator adapts to the power limits of the chargers. It also detects and identifies possible faults during charging, making it easier to fix them.

The work developed and the prototype implemented met the proposed objectives, constituting an added value for the company.

Keywords

Battery Simulator, Charge controller, Electric Vehicle, Electric Vehicle Supply Equipment, CHAdeMO, CCS

Résumé

Ce projet a été proposé par Efacec Electric Mobility, S.A. (EEM) en collaboration avec l'Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). Cette thèse porte sur le développement d'un simulateur de batterie et d'un contrôleur de charge pour un véhicule électrique (VE). L'objectif principal est la mise en œuvre d'un système qui permet d'établir différents scénarios de charge et de tester la communication avec le chargeur.

L'augmentation des ventes de VE renforce le besoin de développer des solutions spécifiques pour la simulation de laboratoire de VE par les entreprises fabriquant des infrastructures de charge. L'automatisation des cas de test et de la détection des défauts, ainsi que l'enregistrement de toutes les informations pendant le processus de chargement, sont bénéfiques.

Un système a été conçu, mis en œuvre et testé, qui permet de réaliser des tests de charge, des tests de stress et des tests de défaillance, impliquant des chargeurs de 45 kW et 120 kW. Plusieurs tests ont été réalisés avec succès pour valider la solution.

Les résultats ont permis de conclure que le système mis en œuvre est robuste, précis et a une réponse rapide. Le simulateur s'adapte aux limites de puissance des chargeurs. Il détecte et identifie également les défauts éventuels pendant la charge, ce qui permet de les corriger plus facilement.

Le travail développé et le prototype mis en œuvre ont répondu aux objectifs proposés, constituant une valeur ajoutée pour l'entreprise.

Mots-clés

Simulateur de batterie, Contrôleur de charge, Véhicule Électrique, Chargeur de Véhicule Électrique, CHAdeMO, CCS

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	2
1.2. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA	3
1.3. OBJETIVOS E CALENDARIZAÇÃO	5
1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	5
2. CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA.....	7
2.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS.....	8
2.1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS.....	11
2.1.2 CONSTITUIÇÃO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO	13
2.2 BATERIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS.....	15
2.2.1 CARATERÍSTICAS DAS BATERIAS	16
2.2.2 TIPOS DE BATERIAS	18
2.3 CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS.....	22
2.3.1 ARQUITETURA DE UM CARREGADOR DE VEÍCULOS ELÉTRICOS.....	27
2.3.2 PROTOCOLO CHADEMO	29
2.3.3 PROTOCOLO CCS (COMBINED CHARGING SYSTEM).....	32
3. ESTADO DA ARTE DOS SIMULADORES DE BATERIA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS.....	37
3.1 SIMULADORES DA COMEMSO	38
3.2 SIMULADOR PORTÁTIL.....	44
4. DESENVOLVIMENTO DE SIMULADOR E CONTROLADOR DE CARGA DA BATERIA DE UM VEÍCULO ELÉTRICO	45
4.1 REQUISITOS DO SISTEMA	45
4.2 ARQUITETURA DO SISTEMA	48
4.3 IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL	51
4.3.1 PROJETO ELÉTRICO	52
4.3.2 DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE.....	57
4.3.3 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE.....	63
5. VALIDAÇÃO DO SISTEMA	69
5.1 ENSAIOS	73
5.2 ANÁLISE DE RESULTADOS	77
5.2.1 ENSAIOS DE CARGA.....	77

5.2.2	ENSAIOS DE ESFORÇO.....	88
5.2.3	ENSAIOS DE FALHA	90
6.	CONCLUSÕES	95
6.1	TRABALHOS FUTUROS.....	97
	REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....	99
	ANEXO A. MÁQUINA DE ESTADOS DETALHADA DO PROTOCOLO CHADEMO (SIMULADOR)	105

Índice de Figuras

Fig. 1 - Calendarização do projeto	5
Fig. 2 - Vendas de VEs entre 2015 e 2021 por mercado [5]	8
Fig. 3 - Classificação dos diferentes tipos de VEs [14]	11
Fig. 4 - Constituição de um VE [20].....	13
Fig. 5 - Comparação entre diferentes tipos de baterias de VEs [14].....	21
Fig. 6 - Arquitetura de um carregador de VEs	28
Fig. 7 - Pinos da CHAdeMO visto da extremidade da ficha [28].....	31
Fig. 8 - (a) Pinos da CCS Tipo 1 [30], (b) Pinos da CCS Tipo 2 [31]	33
Fig. 9 - Analisador/Simulador CHAdeMO [35].....	39
Fig. 10 - Analisador/Simulador CA/CC-CCS (versão de 500 kW) [38]	41
Fig. 11 - Simulador Portátil Combinado [40]	43
Fig. 12 - Simulador portátil	44
Fig. 13 - Arquitetura de alto nível do sistema	49
Fig. 14 - Arquitetura detalhada do simulador implementado	51
Fig. 15 - Parte do esquema elétrico do circuito de potência do simulador	53
Fig. 16 - Esquema elétrico da Placa Principal de Controlo	54
Fig. 17 - Circuito de um conversor CA/CC bidirecional.....	55
Fig. 18 - Vista frontal do modelo 3D do protótipo do simulador	56

Fig. 19 - Vista lateral do modelo 3D do protótipo do simulador	56
Fig. 20 - Parte da função de transmissão das mensagens associadas ao protocolo CHAdEMO.....	58
Fig. 21 - Fluxograma do protocolo CHAdEMO (simulador).....	60
Fig. 22 - Fluxograma do funcionamento do conversor	62
Fig. 23 - Tópicos publicados pela Placa Principal de Controlo no <i>broker</i>	64
Fig. 24 - Menu General da interface gráfica.....	65
Fig. 25 - Menu CHAdEMO da interface gráfica	66
Fig. 26 - Menu Signals da interface gráfica	67
Fig. 27 - Menu EV Simulation da interface gráfica	68
Fig. 28 - Menu Logger da interface gráfica.....	68
Fig. 29 - Exemplo do comando para definir a tensão e a corrente à saída do(s) conversor(es).....	70
Fig. 30 - Exemplo do comando para controlo dos contactores	71
Fig. 31 - Exemplo do comando para controlo do CC.....	72
Fig. 32 - Exemplo do comando para definir a tensão e a corrente durante o carregamento.....	72
Fig. 33 - Carregador com uma potência de 45 kW utilizado nos ensaios [46].....	73
Fig. 34 - Carregador com uma potência de 120 kW utilizado nos ensaios [47].....	74
Fig. 35 - Vista frontal do simulador implementado	75
Fig. 36 - Vista lateral do simulador implementado	75

Fig. 37 - Ensaio do carregador de 120 kW com o simulador implementado	76
Fig. 38 - Resultados do ensaio de carga do carregador de 45 kW no Modo Resistência.....	77
Fig. 39 - Medidas durante o ensaio de carga do carregador de 45 kW no Modo Resistência.....	78
Fig. 40 - Estado dos sinais analógicos do protocolo CHAdeMO durante o ensaio de carga do carregador de 45 kW no Modo Resistência	79
Fig. 41 - Resultados do ensaio de carga do carregador de 45 kW no Modo Bateria	80
Fig. 42 - Medidas durante o ensaio de carga do carregador de 45 kW no Modo Bateria	81
Fig. 43 - Simulação da curva de carga do Nissan Leaf entre os 2% e 50% de SoC	81
Fig. 44 - Valores de tensão e corrente durante a simulação da curva de carga do Nissan Leaf entre os 2% e 50% de SoC	82
Fig. 45 - Exemplo de curva de carga do Nissan Leaf em função do SoC (nível da bateria em termos percentuais relativamente à sua capacidade máxima), de acordo com o fabricante [9]	83
Fig. 46 - Simulação da curva de carga do Nissan Leaf entre os 2% e 90% de SoC	83
Fig. 47 - Valores de tensão e corrente durante a simulação da curva de carga do Nissan Leaf entre os 2% e 90% de SoC	84
Fig. 48 - Simulação da curva de carga do Nissan Leaf entre os 50% e 90% de SoC com a potência do carregador limitada a 20 kW.....	85
Fig. 49 - Valores de tensão e corrente durante a simulação da curva de carga do Nissan Leaf entre os 50% e 90% de SoC com a potência do carregador limitada a 20 kW.....	86

Fig. 50 - Simulação da curva de carga do Nissan Leaf entre os 2% e 90% de SoC com comutação dinâmica de potência	87
Fig. 51 - Valores de tensão e corrente durante a simulação da curva de carga do Nissan Leaf entre os 2% e 90% de SoC com comutação dinâmica de potência	88
Fig. 52 - Resultados do ensaio de esforço do carregador de 120 kW	89
Fig. 53 - Medidas durante o ensaio de esforço do carregador de 120 kW	90
Fig. 54 - Resultados do ensaio de falha de comunicação entre a Placa Principal de Controlo do simulador e os conversores	91
Fig. 55 - Resultados do ensaio de falha de comunicação CAN entre o carregador e o simulador	92
Fig. 56 - Resultados do ensaio de falha por paragem de emergência	93
Fig. 57 - Estado dos sinais analógicos do protocolo CHAdeMO após paragem de emergência do carregador	94
Fig. 58 - Máquina de estados detalhada do protocolo CHAdeMO (simulador).....	108

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Capacidade da bateria de diferentes VEs [14].....	16
Tabela 2 - Caraterísticas das baterias de VEs	21
Tabela 3 - Modos de Carregamento da CCS Tipo 1 [26].....	23
Tabela 4 - Modos de Carregamento da CCS Tipo 2 [27].....	25
Tabela 5 - Modos de Carregamento da GB/T 20234 [14]	26
Tabela 6 - Detalhes Técnicos do Analisador/Simulador CHAdeMO	40
Tabela 7 - Detalhes Técnicos do Analisador/Simulador CA/CC-CCS	41
Tabela 8 - Detalhes Técnicos do Simulador Portátil Combinado	43
Tabela 9 - Requisitos do Sistema	46
Tabela 10 - Especificações técnicas do simulador implementado	57

Acrónimos

ACEA – *European Automobile **M**anufacturers **A**ssociation*

ADC – *Analog-to-**D**igital **C**onverter*

ARM – *Advanced **R**ISC **M**achine*

UVE – *Associação de **U**tilizadores de **V**eículos **E**létricos*

BMS – ***B**attery **M**anagement **S**ystem*

BES – ***B**attery **E**xchange **S**tation*

BEV – ***B**attery **E**lectric **V**ehicle*

BoM – ***B**ill of **M**aterials*

BS – ***B**asic **S**ignaling*

BSS – ***B**attery **S**wap **S**tation*

CA – ***C**orrente **A**lternada*

CAN – ***C**ontroller **A**rea **N**etwork*

CC – ***C**orrente **C**ontínua*

CC – ***C**onnection **C**heck*

CCS – ***C**ombined **C**harging **S**ystem*

CEC – ***C**hina **E**lectricity **C**ouncil*

CMS – ***C**entral **M**anagement **S**ystem*

CP – ***C**ontrol **P**ilot*

- DTC – *Diagnostic Trouble Code*
- EEM – **E**facec **E**lectric **M**obility
- EPS – **E**facec **P**ower **S**olutions
- E-REV – *Extended-Range Electric Vehicle*
- EVSE – *Electric Vehicle Supply Equipment*
- FCEV – *Fuel Cell Electric Vehicle*
- GB – **G**uobiao **S**tandards
- HEV – *Hybrid Electric Vehicle*
- HLC – *High Level Communication*
- ICCB – *In-Cable Control Box*
- IEC – **I**nternational **E**lectrotechnical **C**ommission
- IMD – *Insulation Monitoring Device*
- MCI – **M**otor de **C**ombustão **I**nterna
- MOSFET – *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*
- MQTT – **M**essage **Q**ueuing **T**elemetry **T**ransport
- OBC – *On-Board Charger*
- OCPP – *Open Charge Point Protocol*
- PCB – *Printed Circuit Board*
- PE – *Protective Earth*

- PHEV – *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*
- PLC – **Power Line Communication**
- PnC – *Plug and Charge*
- PP – *Proximity Pilot*
- R&D – *Research and Development*
- RFID – *Radio-Frequency IDentification*
- SAE – **Society of Automotive Engineers**
- SiC – *Silicon Carbide*
- SoC – *State of Charge*
- TCO – *Total Cost of Ownership*
- TEPCO – **Tokyo Electric Power Company**
- V2B – *Vehicle-to-Building*
- V2G – *Vehicle-to-Grid*
- V2H – *Vehicle-to-Home*
- V2L – *Vehicle-to-Load*
- V2X – *Vehicle-to-Everything*
- VDI – *Verein Deutscher Ingenieure*
- VE – **Veículo Elétrico**
- WtW – *Well-to-Wheel*

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação acerca das questões ambientais tem levado ao estudo de soluções alternativas face à atual situação da mobilidade. Nas últimas duas décadas, os conceitos energia e ambiente tornaram-se cada vez mais importantes, notando-se um aumento significativo na procura e no consumo de energia. Atualmente, o setor dos transportes é responsável por quase um terço das emissões de CO₂ a nível global [1]. No entanto, a transição para a mobilidade sustentável tem desempenhado um papel importante na descarbonização, com governos de vários países a incentivarem o uso de Veículos Elétricos (VEs) como alternativa aos tradicionais veículos com Motor de Combustão Interna (MCI). Com isto, há a perspetiva de crescimento do uso de VEs, sendo que a agenda política europeia aponta para a redução do petróleo. Os *Battery Electric Vehicles* (BEV) e os *Plug-in Hybrid EVs* (PHEV) são a tecnologia mais utilizada no que diz respeito à mobilidade sustentável, usando a energia armazenada numa bateria para alimentar o motor elétrico.

Nos últimos anos, os três principais obstáculos desta transição têm sido o elevado custo dos VEs, a sua autonomia e aspetos técnicos relacionados com a infraestrutura de carregamento. Porém, estas barreiras têm registado uma mudança significativa. O custo da bateria – o componente mais caro de um VE – tem-se tornado menos dispendioso. Além disso, os custos associados à manutenção são menos dispendiosos nos VEs, fazendo com que o *Total Cost of Ownership* (TCO) se torne mais barato nos anos que se aproximam [2]. Em relação à autonomia, já existem vários modelos com uma capacidade superior a 400 km, ou seja, 3 a 4 vezes mais que os primeiros VEs. Embora comecem a surgir várias empresas a apostar no desenvolvimento de carregadores para VEs, a disponibilidade de infraestruturas de carregamento ainda é um fator limitador na maioria dos países, especialmente para os utilizadores que residem fora das grandes cidades. Um outro aspeto a considerar é o facto dos carregadores para VEs apresentarem maior número de falhas quando comparados aos postos de abastecimento, consequência do crescimento rápido desta indústria e de algumas lacunas em termos de normalização.

A adoção de VEs em larga escala tem exigido uma maior capacidade de resposta por parte da rede elétrica. A implementação de tecnologias como o *Vehicle-to-Grid* (V2G) introduz o conceito do fluxo bidirecional de energia, ao permitir o carregamento e a descarga da bateria do VE [3]. Este apresenta vários casos de uso como, por exemplo, a compensação de possíveis flutuações de tensão e frequência na rede, capacidade de suporte à mesma e armazenamento de energia distribuído. Novos desafios e oportunidades para o crescimento deste tipo de tecnologias dependem não só das marcas de VEs, mas também da evolução das infraestruturas de carregamento.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O trabalho realizado, centrado na área da mobilidade elétrica, insere-se no âmbito da unidade curricular de Tese/Dissertação (TEDI) do 2º ano do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores – Sistemas Autónomos.

O crescimento exponencial do mercado de VEs, com o lançamento de novos modelos a um ritmo elevado, reforça a necessidade do desenvolvimento de soluções específicas para a simulação laboratorial do VE, do ponto de vista da infraestrutura de carregamento. Tais soluções, assumem especial importância, uma vez que permitem explorar a flexibilidade no estabelecimento de condições de operação e casos de teste, que sejam representativos dos VEs disponíveis no mercado, possibilitando a caracterização mais precisa da comunicação com o carregador.

A solução desenvolvida consiste num simulador de bateria e controlador de carga de um Veículo Elétrico. Nesse sentido, foi estudado e implementado um sistema para teste de carregadores de VEs segundo o protocolo de carregamento CHAdeMO. Tal sistema, envolveu o desenvolvimento de *firmware* para controlo dos vários componentes a ele associados, incluindo módulos de potência bidirecionais. De forma a tornar realista a interação entre o carregador e o simulador, foi implementada a simulação automática de perfis de carga de diferentes VEs. Por último, foi desenvolvida uma interface gráfica para análise e controlo de todas as variáveis envolvidas no processo de carregamento.

1.2. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

A Efacec é uma empresa portuguesa com vasta presença internacional e tecnologia própria nas áreas de Produtos de Energia, Engenharia e Mobilidade Elétrica. Sediada na Arroiteia, Leça do Balio, Efacec designa o conjunto das empresas que hoje constituem a Efacec Power Solutions, S.A. (EPS), sendo a Efacec Electric Mobility, S.A. (EEM) a empresa onde foi estudado e desenvolvido o projeto. O Grupo EPS abrange ainda uma enorme rede de filiais, sucursais e agentes espalhados por quatro continentes.

A Efacec tem mais de 70 anos de marca, sendo que a origem, com mais de 100 anos de história, remonta à fundação de A Moderna, em 1905. Em 1917, durante a Primeira Guerra Mundial, a Efacec foi responsável pela produção dos primeiros motores elétricos em Portugal. Em 1921, A Moderna deu origem à Electro-Moderna, Lda., empresa já dedicada à produção de motores, geradores, transformadores e acessórios elétricos,

constituindo a base de arranque da Empresa Fabril de Máquinas Elétricas e onde se criaram as competências necessárias para suportar os grandes desenvolvimentos futuros do que viria a ser a Efacec.

A 12 de agosto de 1948 foi dada origem à EFME – Empresa Fabril de Máquinas Elétricas, SARL, e, conseqüentemente, ao nascimento da marca e do projeto Efacec. O capital da empresa estava então distribuído entre a Electro-Moderna, com 20%, os ACEC – Ateliers de Constructions Électriques de Charleroi com igual valor, a CUF – Companhia União Fabril com 45%, estando os restantes 15% distribuídos por outros acionistas. Após diversas alterações na distribuição do capital, nomeadamente pela saída da CUF, os ACEC passaram a ser acionistas maioritários. O nome EFACEC – Empresa Fabril de Máquinas Elétricas, SARL, nasce em 1962, ano em que se iniciou um período de notável crescimento para a empresa. Entre 1966 e 1973, a Efacec aumentou 2,5 vezes a sua área fabril e 6 vezes o seu volume de encomendas. Já no presente século, de forma a combater a crise económica e financeira que fez abalar todo o mundo, a Efacec adotou uma nova posição que resultou na sua reestruturação. Foi nesta altura que a empresa se passou a designar Efacec Power Solutions, S.A. (EPS).

No final de 2014, a EPS passou a constituir um grupo de empresas que reúne todos os meios de produção, tecnologias e competências técnicas e humanas para o desenvolvimento de atividades nos domínios das soluções de Energia, Engenharia, Ambiente, Transportes e Mobilidade Elétrica [4].

Atualmente, a Efacec é considerada uma marca de prestígio e uma das maiores empresas industriais do país, graças à sua resiliência, adaptabilidade face às adversidades e, acima de tudo, à sua incessante capacidade de inovar.

Recentemente, na área da Mobilidade Elétrica, foram lançados novos produtos nas gamas de carga lenta (PC^{G3}), rápida (QC60/90/120) e ultrarrápida (HV175/350^{G2}).

1.3. OBJETIVOS E CALENDARIZAÇÃO

O principal objetivo do trabalho baseia-se na implementação de um sistema para a simulação laboratorial de um VE que permita estabelecer diferentes cenários de carga e testar a comunicação com o carregador. A automatização de casos de teste e deteção de falhas são essenciais para a compreensão do comportamento da estação de carga.

A Fig. 1 sumariza o plano de trabalho durante a dissertação, sendo possível observar o tempo despendido em cada tarefa.

Descrição	fevereiro	março	abril	maio	junho	julho	agosto	setembro	outubro
Estudo dos Atuais Simuladores									
Identificação dos Requisitos									
Desenho da Arquitetura do Sistema									
Estudo do Projeto Elétrico									
Estudo dos Protocolos CHAdeMO e CCS									
Desenvolvimento do <i>Firmware</i>									
Desenvolvimento do <i>Software</i>									
Testes e Validação do Sistema									
Elaboração da Dissertação									

Fig. 1 - Calendarização do projeto

1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

O presente relatório encontra-se organizado em seis capítulos. Uma breve descrição de cada capítulo irá ser apresentada nos parágrafos seguintes.

No primeiro capítulo, Introdução, é feita uma breve apresentação da empresa e contextualização do tema, bem como os objetivos que se pretendem alcançar.

No segundo capítulo, Contextualização Teórica, são descritos os conhecimentos acerca de Veículos Elétricos, as suas baterias e respetivo carregamento.

No terceiro capítulo, Estado da Arte dos Simuladores de Bateria de Veículos Elétricos, são apresentadas as atuais soluções de simuladores existentes no mercado.

No quarto capítulo, Desenvolvimento de Simulador e Controlador de Carga da Bateria de um Veículo Elétrico, são descritas as várias etapas da implementação experimental. Além disso, são dados a conhecer os requisitos do sistema e a sua arquitetura.

No quinto capítulo, Validação do Sistema, são apresentados os ensaios realizados para validação do sistema e a análise detalhada dos resultados obtidos

No sexto e último capítulo, Conclusão, são reunidas as principais conclusões e perspectivados futuros desenvolvimentos.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA

A aplicação prática do conhecimento apenas é possível após a sua assimilação. Nesse sentido, este capítulo aborda as temáticas inerentes à mobilidade elétrica. No que concerne aos Veículos Elétricos, são apresentadas as suas vantagens e alguns dos desafios ainda por enfrentar. Também são dados a conhecer os diferentes tipos de VEs, bem como a sua constituição. Relativamente às baterias, são apresentadas as suas principais características e os diferentes tipos que existem no mercado, com especial atenção às que são utilizadas no fabrico de VEs. No que diz respeito ao carregamento de VEs, é abordada a arquitetura de um carregador e os dois principais protocolos de carregamento: CHAdeMO e Combined Charging System (CCS).

2.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS

Na última década, notou-se uma acentuada evolução em vários aspetos relacionados com a produção de Veículos Elétricos (VEs), a utilização de novas tecnologias e as vendas destes veículos. A Fig. 2 apresenta a evolução das vendas de VEs nos últimos anos a nível mundial.

Vendas de VEs por mercado

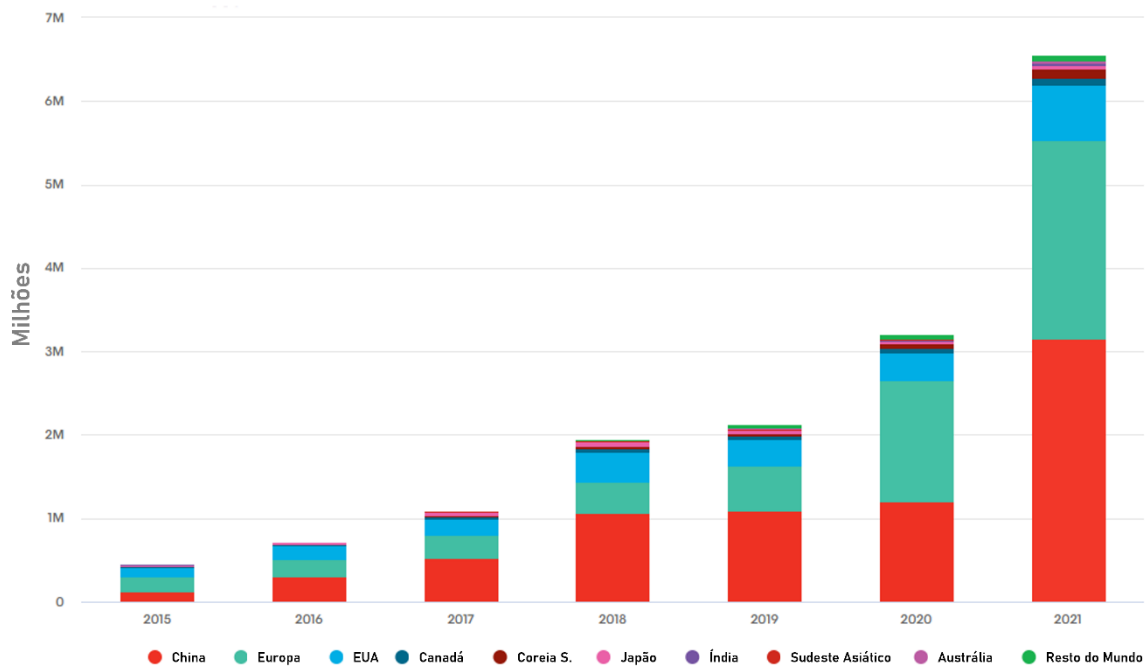


Fig. 2 - Vendas de VEs entre 2015 e 2021 por mercado [5]

Tanto a China como a Europa têm apresentado uma maior evolução face aos restantes países. Em 2021, foram vendidos cerca de 6,6 milhões de VEs em todo o mundo.

Por definição, um VE é qualquer veículo em que parte ou toda a energia utilizada para desenvolvimento de força motriz é fornecida através da eletricidade armazenada numa bateria [6]. Num veículo com Motor de Combustão Interna (MCI), é utilizado um combustível líquido como, por exemplo, gasolina ou diesel para gerar energia mecânica necessária para mover o veículo.

Por um lado, os VEs oferecem as seguintes vantagens em relação aos veículos tradicionais:

- **Zero emissões:** este tipo de veículos não emite poluentes como o dióxido de carbono (CO₂) ou o dióxido de azoto (NO₂). Além disso, os processos de fabrico de VEs tendem a ser considerados mais “amigos do ambiente”, embora o fabrico de baterias contribua negativamente para a pegada de carbono.
- **Simplicidade:** o número de elementos do motor de um VE é menor, o que leva a uma manutenção muito mais barata. Os motores são mais simples e compactos, não é necessário incorporar uma caixa de velocidades manual nem uma embraiagem. Também não são necessários elementos para diminuir o ruído do motor.
- **Fiabilidade:** ter menos e mais simples componentes faz com que este tipo de veículos tenha menos avarias. Além disso, os VEs não sofrem do desgaste inerente produzido pelo funcionamento do motor, vibrações ou corrosão provocada pelo combustível.
- **Custo:** o custo de manutenção do veículo, bem como o custo da eletricidade é muito mais baixo em comparação aos custos de manutenção e combustível de um veículo com MCI. O custo energético por quilómetro é consideravelmente menor nos VEs do que nos veículos tradicionais.
- **Conforto:** viajar num VE é mais confortável, devido à ausência de vibrações e ruído do motor.
- **Eficiência:** os VEs são mais eficientes que os veículos tradicionais. Contudo, a eficiência *Well-to-Wheel* (WtW) depende também da eficiência da central elétrica. Por exemplo, a eficiência WtW dos veículos a gasolina varia de 11% a 27%, enquanto nos veículos a diesel varia de 25% a 37%. Em contraste, a eficiência WtW dos VEs alimentados por uma central elétrica de gás natural varia de 13% a 31%, enquanto os VEs alimentados por fontes de energia renovável apresentam uma eficiência até 70% [7].

- **Acessibilidade:** conduzir um VE permite o acesso a áreas urbanas que não são permitidas a veículos com MCI (ex: zonas de baixas emissões). Os condutores de VEs não estão sujeitos às mesmas restrições de tráfego nas grandes cidades, especialmente em alturas onde o pico de contaminação do ar é elevado. São vários os países a anunciarem planos para a proibição da circulação de veículos que emitam gases poluentes, nas zonas mais populosas. Além disso, existe isenção ou descontos de pagamento de estacionamento. De acordo com um trabalho de investigação da Associação de Utilizadores de Veículos Elétricos (UVE), há, pelo menos, nove municípios portugueses com medidas de discriminação positiva em relação aos VEs: Beja, Guimarães, Lisboa, Loures, Funchal, Mirandela, Oeiras, Porto e Setúbal [8].

Por outro lado, os VEs ainda enfrentam alguns desafios relacionados, principalmente, com as suas baterias:

- **Autonomia:** embora comecem a surgir vários modelos com uma autonomia superior a 400 km, em grande parte dos VEs está limitada entre 200 e 350 km com um carregamento completo. Por exemplo, o Nissan Leaf tem uma autonomia de 235 km [9], enquanto o Tesla Model S Plaid atinge mais de 500 km [10].
- **Tempo de Carga:** dependendo da potência disponibilizada pelo EVSE e da potência máxima aceite pelo VE, o carregamento completo da bateria pode demorar entre 4 e 8 horas. Mesmo uma “carga rápida” pode demorar cerca de 30 minutos até a bateria atingir 80% da sua capacidade. Por exemplo, os carregadores ultrarrápidos conseguem carregar um Model S até 50% em 20 minutos ou até 80% em meia hora [11].
- **Custo da Bateria:** atualmente, os *packs* de baterias são o componente mais dispendioso de um VE. Substituir a bateria de um Tesla Model S pode custar até 20 000€ [12].
- **Dimensão e Peso:** os *packs* de baterias, para além de pesados, ocupam um espaço considerável no VE. As baterias deste tipo de veículos têm um peso aproximado de 200 kg e que pode variar, dependendo da sua capacidade [13].

2.1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

Atualmente, podemos encontrar diferentes tipos de tecnologia associada aos VEs, como apresentado na Fig. 3.

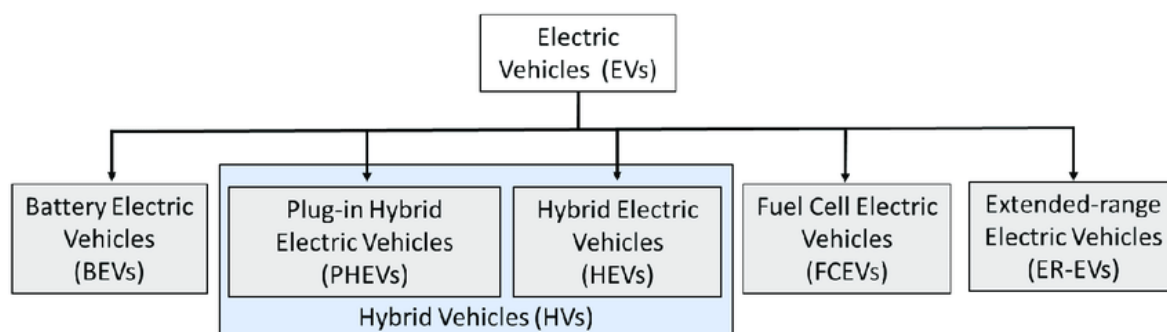


Fig. 3 - Classificação dos diferentes tipos de VEs [14]

De um modo geral, os VEs são classificados em cinco tipos:

- **Battery Electric Vehicles (BEVs):** veículos 100% elétricos, ou seja, funcionam exclusivamente através de um motor elétrico alimentado pela energia armazenada nas suas baterias. Os BEVs não possuem um MCI nem utilizam qualquer tipo de combustível líquido. Normalmente, estes veículos utilizam *packs* maiores de baterias de modo a garantir uma autonomia aceitável. Um BEV típico consegue alcançar entre os 135 e 300 km, embora alguns modelos já atinjam a marca dos 500 km com apenas um carregamento. Um exemplo deste tipo de veículo é o Nissan Leaf e+, que é 100% elétrico e possui uma bateria com uma capacidade de 59 kWh e uma autonomia de 340 km [15].
- **Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEVs):** veículos movidos por um MCI convencional e um motor elétrico alimentado por baterias capazes de serem carregadas através de uma fonte externa de energia. Os PHEVs conseguem armazenar energia suficiente para reduzir significativamente o consumo de combustível em condições normais de condução. Por norma, estes veículos conseguem alcançar os 50 km utilizando apenas o motor elétrico. No entanto, é de salientar que o consumo de combustível dos PHEVs é superior ao indicado pelos fabricantes de automóveis. O Mitsubishi Outlander é um exemplo de um

PHEV e possui uma bateria com uma capacidade de 13,8 kWh, o que permite conduzir cerca de 50 km apenas com o motor elétrico [16].

- **Hybrid Electric Vehicles (HEVs):** veículos que possuem um MCI e um motor elétrico. A grande diferença em relação aos PHEVs é que os HEVs não podem ser ligados à rede elétrica para carregamento das baterias. Na realidade, a bateria que alimenta o motor elétrico é carregada através da energia gerada pelo MCI do veículo. Nos modelos mais recentes, as baterias podem também ser carregadas graças à energia gerada durante a travagem, sendo este processo denominado por travagem regenerativa. O Toyota Prius, no seu modelo híbrido (4ª geração), possui uma bateria com uma capacidade de 1,3 kWh que, teoricamente, possibilita ao veículo ter uma autonomia de 25 km no modo *all-electric* [17].
- **Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs):** veículos que utilizam uma mistura de hidrogénio comprimido e oxigénio obtido do ar para gerar energia para alimentar o motor elétrico, sendo água o único resíduo resultante desta reação. Embora estes veículos sejam apresentados como “zero emissões”, é de salientar que, embora exista hidrogénio verde, a maior parte do hidrogénio utilizado é extraído do gás natural. O Hyundai Nexo é um exemplo deste tipo de veículos, sendo capaz de percorrer 666 km sem reabastecimento [18].
- **Extended-Range Electric Vehicles (E-REVs):** veículos muito semelhantes aos BEVs. No entanto, os E-REVs possuem também um MCI suplementar que carrega as baterias do veículo se necessário. Este motor, ao contrário dos utilizados nos PHEVs e HEVs, é utilizado exclusivamente para carregamento das baterias, não estando este ligado às rodas do veículo. Um exemplo deste tipo de veículos é o BMW i3 com o opcional “Range Extender”. Este modelo possui uma bateria com uma capacidade de 42,2 kWh que resulta numa autonomia de 260 km, e os utilizadores podem beneficiar de 130 km adicionais através do modo *extended-range* [19].

2.1.2 CONSTITUIÇÃO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO

Os VEs são bastante diferentes dos veículos tradicionais com MCI. Desde o mecanismo básico e princípio de funcionamento aos métodos de utilização e manutenção, as duas categorias divergem em vários aspetos. A Fig. 4 apresenta os principais componentes de um VE e respetiva identificação.

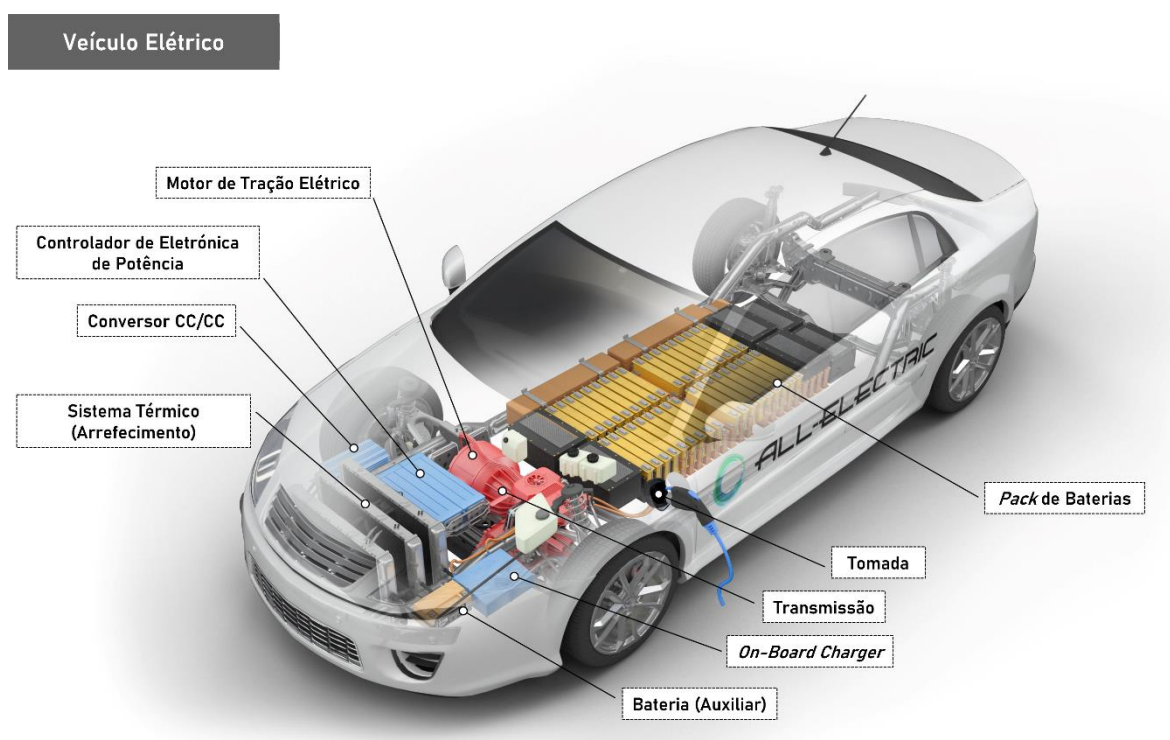


Fig. 4 - Constituição de um VE [20]

Um VE possui um motor elétrico em vez de um MCI. O veículo utiliza um grande *pack* de baterias para alimentar o motor elétrico e deve ser ligado a uma tomada de parede ou a um equipamento de carga, também denominado por *Electric Vehicle Supply Equipment* (EVSE), para recarregar as baterias. Como funciona à base de eletricidade, o veículo não emite qualquer tipo de gás por um tubo de escape e não contém os componentes típicos associado a um MCI, tais como o combustível, o depósito silenciador, o tubo de escape, etc.

Os componentes-chave de um veículo 100% elétrico são a Bateria Auxiliar, a Interface de Carregamento, o Conversor CC/CC, o Motor Elétrico de Tração, o *On-Board Charger*

(OBC), o Controlador de Eletrônica de Potência, o Sistema Térmico (Arrefecimento), o *Pack* de Baterias e a Transmissão (Elétrica).

Num VE, a Bateria Auxiliar fornece energia necessária para alimentar os acessórios do veículo.

A tomada permite ao veículo ligar-se a uma fonte externa de energia com o objetivo de carregar o *pack* de baterias. Atualmente, as fichas mais comuns para carregamento em Corrente Alternada (CA) são a SAE J1772 (Tipo 1) e IEC 62196 (Tipo 2) e para carregamento em Corrente Contínua (CC) são a CHAdeMO e CCS.

O Conversor CC/CC, tal como o próprio nome indica, converte uma tensão CC mais alta proveniente do *pack* de baterias numa tensão CC mais baixa (12 V), de modo a alimentar os acessórios do veículo e, ao mesmo tempo, recarregar a bateria auxiliar.

Alimentado através da energia disponibilizada pelas baterias, o motor elétrico é responsável por movimentar as rodas do veículo.

O OBC recebe a energia CA fornecida através de carregadores lentos ou carregadores portáteis ligados a tomadas domésticas, e converte-a em energia CC para carregar a bateria. No caso de VEs compatíveis com carregamento rápido, o OBC não é necessário, dado que a energia é fornecida diretamente em CC pelo carregador. Também comunica com o equipamento de carga e monitoriza vários parâmetros da bateria durante o carregamento, tais como a tensão, corrente, temperatura e o *State of Charge* (SoC), sendo que este último indica a percentagem de carga da bateria relativamente à sua capacidade.

O Controlador de Eletrônica de Potência gere o fluxo de energia fornecido pela bateria, controlando a velocidade do motor elétrico e o binário por ele produzido.

Durante a condução e o carregamento, a tendência é que a temperatura da bateria do veículo suba. De modo a evitar sobreaquecimentos, o Sistema Térmico (Arrefecimento) mantém uma temperatura adequada ao funcionamento da bateria, motor elétrico, circuito relacionado com a eletrônica de potência e restantes componentes.

O *Pack* de Baterias armazena a energia CC (mais tarde convertida em energia CA) a ser utilizada pelo motor elétrico.

Por último, a Transmissão (Elétrica) transfere a energia mecânica gerada pelo motor elétrico para acionar o movimento das rodas [21].

2.2 BATERIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

A bateria de um VE armazena energia elétrica e é o equivalente a um depósito de combustível num veículo com MCI. A autonomia de um VE é frequentemente determinada pela capacidade da bateria, isto é, quanto maior for a capacidade, maior será a distância que o veículo consegue percorrer. Nesse sentido, aumentar a capacidade da bateria pode parecer uma solução óbvia, uma vez que uma maior autonomia reduz o número de paragens em estações de carregamento ao longo de uma viagem. No entanto, a escolha não é assim tão evidente, porque as dimensões e o peso da própria bateria têm grandes implicações no desempenho do VE. Quanto maior e mais pesada a bateria, menor o espaço disponível no interior do veículo e pior a eficiência energética. Recentemente, a otimização do desempenho de um VE tem-se baseado no estudo de como maximizar a densidade energética da bateria, ou seja, ter uma bateria pequena e leve que armazene tanta energia quanto possível.

Graças aos avanços na tecnologia das baterias, os novos modelos de VEs apresentam melhorias significativas em termos de densidade energética da bateria e autonomia do veículo. O Kia Soul Booster, por exemplo, está equipado com uma bateria de iões de lítio de 64 kWh e apresenta uma autonomia de 386 km. A densidade energética da sua bateria corresponde a 250 Wh/kg [22]. O tempo de vida útil das baterias também aumentou e, assumindo um padrão normal de utilização, a bateria do Kia Soul Booster pode durar durante todo o ciclo de vida do veículo.

2.2.1 CARATERÍSTICAS DAS BATERIAS

Relativamente às principais características das baterias, destacam-se as seguintes:

- **Capacidade:** a capacidade representa a quantidade máxima de energia que pode ser extraída da bateria. Esta unidade pode ser expressa em Ampere-hora (Ah) ou em Watt-hora (Wh), embora a última seja mais comum no ramo da mobilidade elétrica. Considerando que, nos VEs, a capacidade das baterias é um aspeto crítico, visto que tem um impacto direto na autonomia dos veículos, o surgimento de novas tecnologias que permitem o armazenamento de uma maior quantidade de energia no mais curto espaço de tempo possível, é um fator decisivo para o sucesso deste tipo de veículos. A capacidade das baterias está a crescer a um ritmo elevado e espera-se que nos próximos anos comecem a aparecer veículos com capacidades superiores a 100 kWh. A Tabela 1 apresenta a capacidade da bateria de diferentes VEs ao longo dos anos.

Tabela 1 - Capacidade da bateria de diferentes VEs [14]

Veículo Elétrico	Ano	Capacidade (kWh)
Audi duo	1983	8
Fiat Panda Elettra	1990	9
General Motors EV1	2000	26,4
Smart ed	2007	13,2
Nissan Leaf	2009	24
BMW i3	2011	16
Renault Zoe	2012	22
Tesla Model S	2015	70; 90
Kia Soul EV	2016	27
Tesla Model 3	2016	50; 75
Tesla Model X	2016	90; 100
Jaguar I-Pace	2017	90

Nissan Leaf	2017	40
Tesla Model S	2017	75; 100
Audi e-tron	2018	95
Mercedes-Benz EQ	2019	70
Volvo 40 series	2019	100
Volkswagen ID.3	2021	77
Ford Mustang Mach-E	2021	99
Tesla Roadster	2022	200

- **State of Charge (SoC):** refere-se ao nível da bateria em termos percentuais relativamente à sua capacidade máxima. O valor 0% significa que a bateria está descarregada e 100% indica que se encontra totalmente carregada.
- **Densidade Energética:** como mencionado anteriormente, a obtenção da maior densidade energética possível é outro aspeto importante no desenvolvimento de baterias. Por outras palavras, quanta mais energia uma bateria for capaz de armazenar sem que se aumente ao seu tamanho ou peso, melhor. A densidade energética representa a energia que uma bateria é capaz de fornecer por unidade de volume (Wh/L).
- **Energia Específica:** representa a energia que uma bateria é capaz de fornecer por unidade de massa (Wh/kg).
- **Ciclos de Carga:** um ciclo de carga é completado quando uma bateria é utilizada ou carregada a 100%. Uma boa gestão dos ciclos de carga de uma bateria contribui positivamente para o tempo de vida útil da mesma.
- **Tempo de Vida Útil:** outro aspeto a ter em conta é o tempo de vida útil das baterias, sendo este medido através do número de ciclos de carga que uma bateria consegue suportar. O objetivo é obter baterias que garantam um maior número de ciclos de carga e descarga.

- **Resistência Interna:** os componentes que constituem uma bateria não são condutores 100% perfeitos, o que significa que oferecem uma certa resistência à passagem de corrente. Durante o processo de carregamento de um VE, parte da energia é dissipada sob a forma de calor. O calor gerado por unidade de tempo é igual à energia dissipada na resistência, pelo que a resistência interna tem um maior impacto em carregamentos de potência mais elevada. Assim, maior quantidade de energia é desperdiçada durante os processos de carga rápida quando comparados com os de carga lenta. Por conseguinte, é fundamental que as baterias sejam capazes de suportar carregamentos rápidos e altas temperaturas induzidas devido à sua resistência interna. Além disso, a diminuição desta resistência pode reduzir o tempo de carga necessário para a bateria atingir a sua capacidade máxima.
- **Eficácia:** corresponde à percentagem de energia fornecida pela bateria em relação à energia carregada. Quanto menor as perdas da bateria, maior a sua eficácia.

2.2.2 TIPOS DE BATERIAS

Ao viajar com um VE, o fator chave é a autonomia, mas outro fator limitante é o tempo necessário para carregar a bateria. Mesmo no caso da utilização de EVSEs de carregamento rápido, um veículo pode demorar entre 1 e 3 horas, dependendo da potência disponibilizada. Para solucionar este problema, uma alternativa é a criação de *Battery Exchange Stations* (BESs), também conhecidas como *Battery Swap Stations* (BSSs), onde as baterias descarregadas dos VEs são trocadas por outras similares já carregadas [23].

Contudo, o aumento do número de modelos de VEs, bem como os diferentes tipos de baterias e a falta da sua normalização, não tornam a utilização de BESs um processo viável, uma vez que todos os veículos que usufruem deste sistema deveriam utilizar baterias idênticas.

De facto, embora as baterias de íões de lítio (Li-ion) sejam cada vez mais utilizadas no fabrico de VEs, existe uma grande variedade de tecnologias, entre as quais se destacam as seguintes:

- **Baterias de Chumbo-Ácido (Pb-PbO₂):** estas baterias foram inventadas em 1859 e são o tipo de bateria recarregável mais antigo. Embora este tipo de bateria seja muito comum nos veículos convencionais, também já foi utilizado em VEs. Estas possuem uma densidade energética muito baixa. A bateria é formada por um depósito de ácido sulfúrico e um grupo de placas de chumbo. Durante a fase inicial de carregamento, o sulfato de chumbo é reduzido a metal (chumbo) nas placas de polaridade negativa, enquanto, nas de polaridade positiva, é formado óxido de chumbo (PbO₂) [24]. O GM EV1 e o Toyota RAV4 são exemplos de veículos que utilizam este tipo de baterias.
- **Baterias de Níquel-Cádmio (Ni-Cd):** esta tecnologia foi utilizada na década de 90, uma vez que estas baterias possuem uma maior densidade energética comparativamente às de ácido-chumbo. No entanto, o tempo de vida útil deste tipo de baterias é extremamente afetado por consecutivas cargas antes de serem descarregadas por completo (bateria “viciada”). Além disso, o cádmio é um elemento bastante caro e poluente. Por estas razões, as baterias de níquel-cádmio estão atualmente a ser substituídas por baterias de Níquel-Hidreto metálico (Ni-MH).
- **Baterias de Níquel-Hidreto Metálico (Ni-MH):** neste tipo de baterias, o elétrodo negativo corresponde a uma liga que armazena hidrogénio em vez de cádmio (Cd). Embora se descarreguem mais rapidamente que as de Níquel-Cádmio, estas baterias são utilizadas por muitos HEVs, tais como o Toyota Prius e a segunda versão do GM EV1.
- **Baterias de Zinco-Bromo (Zn-Br₂):** este tipo de baterias utiliza uma solução aquosa de zinco-brometo armazenada em dois tanques, e na qual o brometo se transforma em bromo no elétrodo positivo. Esta tecnologia foi aplicada num protótipo, denominado por “T-Star”, em 1993.

- **Baterias de Cloreto de Sódio e Níquel (Na-NiCl):** também designadas por ZEBRA (baterias que funcionam à base de sal extraído de materiais comuns), estas baterias são muito similares às de Sódio-Enxofre (Na-S). A sua principal vantagem é o facto de conseguirem disponibilizar até 30% mais energia em baixas temperaturas, embora o seu intervalo ideal de funcionamento seja entre os 260 e 300° C. A Modec foi uma empresa fabricante de VEs em Coventry, no Reino Unido, que apostou nesta tecnologia em 2006.
- **Baterias de Sódio-Enxofre (Na-S):** este tipo de baterias ZEBRA contém sódio líquido (Na) e enxofre (S). Além de possuírem uma elevada densidade energética, apresentam uma eficiência de 89 a 92% e um tempo de vida útil longo. Outra vantagem é que os materiais utilizados para a sua construção apresentam um custo muito reduzido. No entanto, estas baterias podem atingir temperaturas de funcionamento entre os 300 e 350° C. Esta tecnologia foi utilizada no Ford Ecostar, o modelo lançado em 1992-1993.
- **Baterias de Iões de Lítio (Li-Ion):** desde os telemóveis aos VEs, a bateria de iões de lítio continua a ser a aposta mais frequente. Este tipo de baterias possui, como eletrólito, um sal de lítio que fornece os iões necessários para a reação eletroquímica reversível ocorrida entre o cátodo (elétrodo positivo) e o ânodo (elétrodo negativo). As baterias de iões de lítio apresentam várias vantagens relativamente às tecnologias mencionadas anteriormente como, por exemplo, o facto de serem bastante leves, apresentarem uma maior densidade energética, possuírem uma elevada capacidade e uma resistência interna reduzida, bem como um grande número de ciclos de carga. Ao contrário das baterias de Níquel-Cádmio, a probabilidade de uma bateria de iões de lítio se “viciar” é baixa. Porém, estas baterias funcionam numa área de operação muito restrita, limitada pelos valores de temperatura e tensão. Exceder estes limites pode resultar numa rápida degradação do desempenho da bateria e até mesmo pôr em causa a integridade física dos utilizadores (ex: incendiar ou explodir), dado que a partir dos 150° C os eletrólitos começam-se a degradar significativamente. Atualmente, este tipo de bateria é o mais utilizado pela maioria dos BEVs e PHEVs [25].

A Tabela 2 apresenta as principais características de diferentes tipos de baterias utilizadas no fabrico de VEs.

Tabela 2 - Características das baterias de VEs

	Pb-PbO ₂	Ni-Cd	Ni-MH	Zn-Br ₂	Na-NiCl	Na-S	Li-Ion
Temperatura de Funcionamento (°C)	-20 a +45	0 a 50	0 a 50	20 a 40	300 a 350	300 a 350	-20 a +60
Densidade Energética (Wh/L)	60 a 100	60 a 150	100 a 300	60 a 70	110 a 120	120 a 130	200 a 735
Energia Específica (Wh/kg)	30 a 60	60 a 80	60 a 120	75 a 140	160	130	100 a 275
Tensão da Célula (V)	2,1	1,35	1,35	1,79	2,58	2,08	3,6
Ciclos de Carga	500 a 800	2000	500	> 2000	1500 a 2000	2500 a 4500	400 a 3000

A Fig. 5 apresenta a comparação entre os diferentes tipos de baterias de VEs em termos de Ciclos de Carga (eixo x), Densidade Energética (eixo y), Energia Específica (dimensão do círculo) e Temperatura de Funcionamento (cor do círculo). De notar que cores mais quentes representam temperaturas de funcionamento mais elevadas.

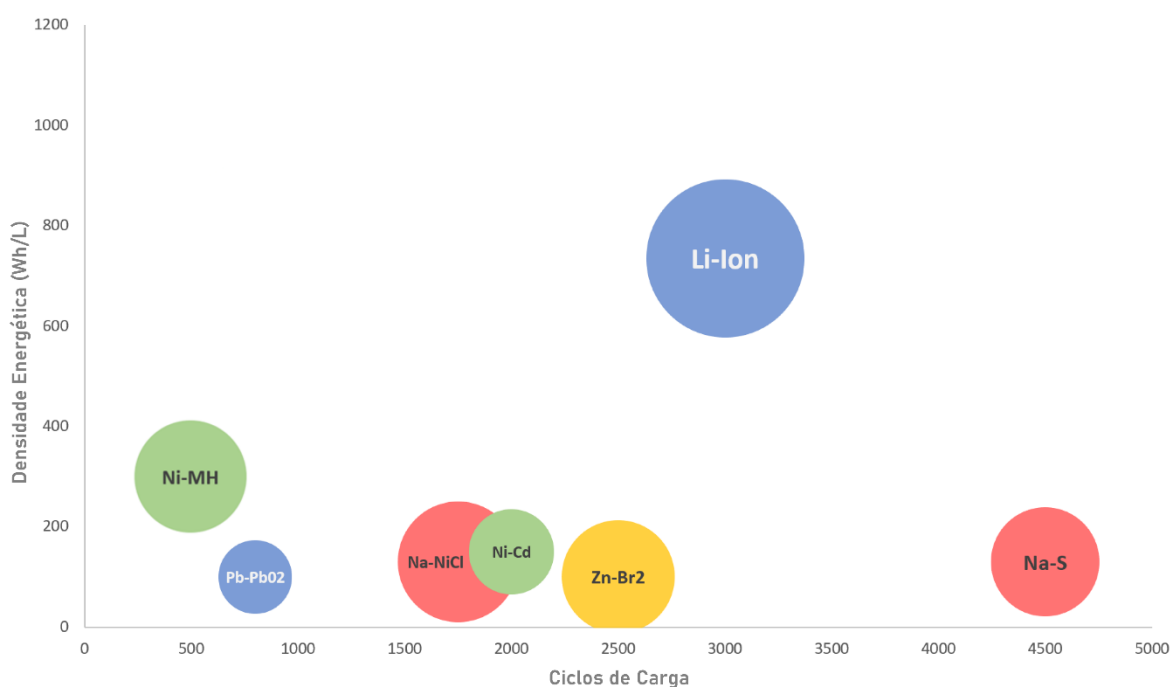


Fig. 5 - Comparação entre diferentes tipos de baterias de VEs [14]

Analisando a Fig. 5, podemos observar que as baterias de Li-Ion possuem uma maior densidade energética (até 735 Wh/L) relativamente às restantes. Em relação ao número de ciclos de carga, as baterias que oferecem piores resultados são as de Ni-MH e Pb-PbO₂, enquanto que as que oferecem melhores resultados são as de Na-S, suportando até 4500 ciclos. No que diz respeito à energia específica, as baterias de Li-Ion voltam a ser as mais vantajosas e as de Pb-PbO₂ e Ni-Cd são as que apresentam piores resultados. Relativamente à temperatura de funcionamento, as baterias de Na-NiCl e Na-S funcionam a temperaturas mais elevadas, enquanto que as de Pb-PbO₂ e Li-Ion funcionam numa gama mais baixa.

Ao considerar todos os parâmetros, percebe-se que a escolha da maioria dos fabricantes de VEs sejam as baterias de Li-Ion, uma vez que esta tecnologia apresenta o melhor desempenho em quase todas as características analisadas.

2.3 CARREGAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Para além da autonomia, outro aspeto importante é a duração e as características associadas ao processo de carregamento das baterias. Para que os VEs se tornem numa solução viável e conveniente, os fabricantes de EVSEs necessitam de garantir que os utilizadores possam carregar os seus veículos de uma forma rápida e simples. Para o efeito, é fundamental a instalação de uma rede de infraestruturas de carregamento sustentável, apta para satisfazer as necessidades dos condutores e que suporte, dentro do possível, vários tipos de veículos e interfaces de carregamento. Isto implica não só o carregamento em casa, mas também a criação de estações de carregamento capazes de efetuar várias cargas rápidas ao dia.

Em relação ao carregamento de VEs, existem diferentes normas, que são determinadas, principalmente, pela região onde estão a ser utilizadas ou aplicadas. Mais especificamente, na América do Norte e na zona do Pacífico é aplicada a norma CCS Tipo 1 para o carregamento de VEs. Contudo, na China é utilizada a norma GB/T 20234, enquanto na Europa foi introduzida a norma CCS Tipo 2. A principal diferença entre estas três normas é que enquanto as duas primeiras classificam os modos de carregamento de

acordo com o tipo de corrente (CA ou CC), a última classifica tais modos através da potência de carregamento envolvida.

A CCS Tipo 1 é uma norma para o carregamento de VEs suportada pela Society of Automotive Engineers (SAE) *International*. Esta norma é comum nos EUA e no Japão, e estabelece os seguintes modos de carregamento:

- **CA Nível 1:** tomada elétrica *standard* que fornece uma tensão de 120 V em CA e uma corrente máxima de 16 A, resultando numa potência máxima de 1,9 kW.
- **CA Nível 2:** tomada elétrica *standard* com uma tensão de 240 V CA e uma corrente limite de 80 A, logo a potência máxima corresponde a 19,2 kW.
- **CC Nível 1:** carregador externo que, aplicando uma tensão máxima de 500 V CC e uma corrente máxima de 80 A, fornece uma potência máxima de 40 kW.
- **CC Nível 2:** carregador externo que, aplicando uma tensão máxima de 500 V CC e uma corrente máxima de 200 A, fornece uma potência máxima de 100 kW.

A Tabela 3 resume os diferentes modos de carregamento contemplados na norma CCS Tipo 1.

Tabela 3 - Modos de Carregamento da CCS Tipo 1 [26]

Modo de Carregamento	Tensão (V)	Corrente Máxima (A)	Potência Máxima (kW)
CA Nível 1	120	16	1,9
CA Nível 2	240	80	19,2
CC Nível 1	200 a 500	80	40
CC Nível 2	200 a 500	200	100

A CCS Tipo 2 é uma norma internacional suportada pela International Electrotechnical Commission (IEC) para o carregamento de VEs na Europa e na China. Esta norma estabelece as características gerais do processo de carregamento, bem como a forma como a energia é fornecida. A CCS Tipo 2 baseia-se, entre outras, na série de normas IEC 61851 e classifica o modo de carregamento de acordo com a potência envolvida e,

consequentemente, com o tempo de carregamento. Assim, são considerados quatro modos para o carregamento de VEs:

- **Modo 1 (Carregamento Lento):** é definido como um modo de carregamento doméstico, com uma corrente máxima de 16 A, e utiliza uma tomada elétrica *standard* que pode ser monofásica ou trifásica. Este modo é o mais utilizado nas casas. Além disso, é o modo de carregamento mais simples, pois necessita apenas de uma ficha que ligue o veículo à rede.
- **Modo 2 (Carregamento Lento):** este modo é utilizado nas casas e em áreas públicas, a corrente máxima definida é 32 A e, à semelhança do modo anterior, utiliza uma tomada elétrica *standard* que pode ser monofásica ou trifásica. Normalmente, existe uma *In-Cable Control Box* (ICCB) que se encontra instalada no cabo de ligação entre o VE e a rede. Este aparelho assume as funções de segurança e comunicação de uma estação de carregamento quando o VE se encontra ligado a uma tomada elétrica.
- **Modo 3 (Carregamento Semirrápido):** proporciona uma corrente igual a 63 A. Contrariamente aos modos de carregamento anteriores, este requer a utilização de um EVSE. Este equipamento efetua a comunicação com os VEs, monitoriza o processo de carregamento a partir do momento em que a ficha é ligada à tomada do veículo, incorpora sistemas de proteção, e controla o fluxo de energia. Este modo visa aumentar a segurança do carregamento de um VE e reduzir o risco associado a eventuais erros de manipulação dos utilizadores e defeitos de isolamento elétrico do veículo ou da ficha.
- **Modo 4 (Carregamento Rápido):** publicado na norma IEC 62196-3, define a ligação direta do VE a um barramento CC, com uma corrente até 400 A e uma tensão máxima de 1000 V, correspondendo a uma potência máxima de 400 kW. Este modo também requer um carregador externo que efetue a comunicação com o veículo, bem como a proteção e o controlo do carregamento. Dado que a bateria do VE é alimentada diretamente em CC, o processo de carga torna-se mais rápido e eficiente. Neste caso, a energia pode circular do VE para o carregador e,

consequentemente, para a rede elétrica (tecnologia V2G). A comunicação entre o EVSE e o VE baseia-se em protocolos de carregamento como o CHAdeMO ou o Combined Charging System (CCS). Por sua vez, o EVSE utiliza um protocolo denominado por *Open Charge Point Protocol* (OCPP) para a comunicação com um *Central Management System* (CMS) responsável por gerir o estado dos carregadores. O CMS possui a capacidade de registar todas as transações realizadas num determinado EVSE ligado à sua rede.

A Tabela 4 resume os diferentes modos de carregamento contemplados na norma CCS Tipo 2.

Tabela 4 - Modos de Carregamento da CCS Tipo 2 [27]

Modo de Carregamento	Sistema de Alimentação	Tensão (V)	Corrente Máxima (A)	Potência Máxima (kW)
Modo 1	CA Monofásico	230 a 240	16	3,7
	CA Trifásico	480		11
Modo 2	CA Monofásico	230 a 240	32	7,4
	CA Trifásico	480		22
Modo 3	CA Monofásico	230 a 240	63	14,5
	CA Trifásico	480		43,5
Modo 4	CC	600 a 1000	250 a 400	400

A Guobiao Standards (GB) criou a norma GB/T 20234 para infraestruturas de carregamento de VEs na China. Embora a China tenha inicialmente adotado a norma Europeia CCS Tipo 2, a utilização da sua própria norma tem crescido cada vez mais. Esta norma classifica os modos de carregamento em CA e CC. A Tabela 5 resume os diferentes modos de carregamento contemplados na norma GB/T 20234.

Tabela 5 - Modos de Carregamento da GB/T 20234 [14]

Modo de Carregamento	Norma	Tensão (V)	Corrente Máxima (A)	Potência Máxima (kW)
Carregamento CA	GB/T 20234.2	250	10	27,7
			16	
			32	
		440	16	
			32	
			63	
Carregamento CC	GB/T 20234.3	750/1000	80	250
			125	
			200	
			250	

Com base no que foi mencionado, a norma CCS Tipo 1 é a única que inclui um modo de carregamento com uma tensão de 120 V. As restantes normas, mesmo nos seus modos de carregamento de menor potência, oferecem tensões mais elevadas. Quanto aos modos de maior potência, a CCS Tipo 1 é a norma que oferece a tensão mais baixa (500 V) quando comparada aos 1000 V oferecidos tanto pela CCS Tipo 2 como pela GB/T 20234.

Relativamente à corrente, a norma que oferece uma intensidade mais baixa é a GB/T 20234 com 10 A contra os 16 A oferecidos pelas outras duas normas. No entanto, nos modos de maior potência, a CCS Tipo 1 suporta apenas uma corrente máxima de 200 A, comparativamente aos 250 A da GB/T 20234 e aos 400 A da CCS Tipo 2.

No que diz respeito aos modos de carregamento que se baseiam em energia CA, a norma que oferece uma menor potência é a CCS Tipo 1 com 1,9 kWh comparados aos 2,5 kWh da GB/T 20234 e aos 3,7 kWh fornecidos pela CCS Tipo 2. Ainda neste contexto, a norma que oferece uma maior potência é a CCS Tipo 2 com 43,5 kWh, contra os 27,7 kWh da GB/T 20234 e os 19,2 kWh da CCS Tipo 1. Algo semelhante acontece nos modos de

carregamento com base em energia CC, onde a CCS Tipo 2 é a norma que oferece a maior potência (400 kWh), contra os 250 kWh da GB/T 20234 e os 100 kWh oferecidos pela CCS Tipo 1.

De notar que a Tesla também possui os seus próprios pontos de carregamento rápido, chamados *Superchargers*. Estes carregadores trabalham em CC e, até há pouco tempo, utilizavam apenas as suas próprias fichas. Em 2019, a Tesla anunciou a adição de fichas CCS aos seus carregadores, bem como adaptadores para as tomadas dos seus veículos. Enquanto a segunda geração dos *Superchargers* apresenta uma potência máxima de 150 kW, a mais recente geração, terceira, consegue debitar até 250 kW.

Nos dias de hoje, existem mais de 35 000 *Superchargers* instalados em todo o mundo [11].

2.3.1 ARQUITETURA DE UM CARREGADOR DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Atualmente, existem vários modelos de carregadores de VEs com diferentes níveis de potência e para aplicações distintas. Nesta sub-subsecção, é abordada a constituição geral de um carregador de carregamento rápido.

Geralmente, um carregador de VEs é alimentado pela rede elétrica ligada a um circuito de entrada responsável por fornecer energia a todos os restantes blocos. O circuito de entrada possui proteções, como um seccionador de entrada e disjuntores de calibre adequado às características dos circuitos que alimentam.

Como o carregamento rápido é feito diretamente em CC, é necessário um circuito de conversão CA/CC constituído por conversores CA/CC de potência variável. Quanto maior o número de conversores, maior a potência que o carregador pode disponibilizar. À entrada dos conversores, podem existir um ou mais medidores de energia CA para contagem da mesma.

O circuito de controlo da saída CC possui contactores que controlam o fluxo de corrente do carregador para o VE e devem ser os primeiros a atuar no caso de uma emergência para que o circuito seja interrompido. Quando existe mais que uma saída CC e o

carregador permite o carregamento simultâneo, é inevitável a implementação de uma matriz de contactores que direcionam a corrente para a respetiva saída.

O circuito de potência CC, geralmente, inclui sensores de tensão e corrente para monitorização do barramento de saída. Caso exista mais que uma saída CC, é colocado um sensor de tensão e corrente por saída. Além disso, este circuito possui proteções, como fusíveis de calibre ajustado à corrente máxima injetada pelo carregador. Podem também surgir díodos para proteção contra correntes inversas.

O carregador deve possuir dispositivos que constantemente monitorizem a sua resistência de isolamento, a fim de despistar possíveis fugas à terra. Estes dispositivos designam-se por *Insulation Monitoring Device (IMD)*.

Todos os blocos encontram-se, direta ou indiretamente, ligados a uma unidade de controlo central constituída por uma ou mais placas eletrónicas microcontroladas. Esta unidade interage com os restantes blocos através do uso de protocolos de comunicação ou atuação de Entradas/Saídas, dependendo dos componentes em questão.

Finalmente, deve existir uma interface do utilizador para que o cliente possa interagir com o carregador e consiga iniciar ou parar o carregamento. Nesta interface é possível visualizar o tempo de carga, potência disponibilizada e energia consumida.

Na Fig. 6 está representada a arquitetura geral de um carregador de VEs, com todos os blocos anteriormente descritos.

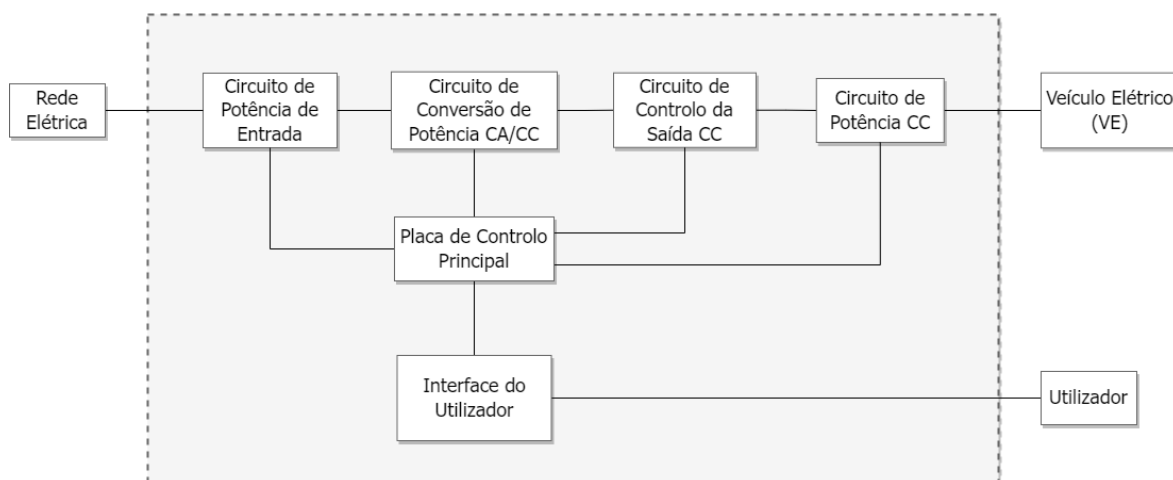


Fig. 6 - Arquitetura de um carregador de VEs

2.3.2 PROTOCOLO CHAdeMO

CHAdeMO é simultaneamente o nome de um protocolo de carregamento CC para VEs e da organização encarregue de o desenvolver. CHAdeMO é uma abreviatura do termo francês “CHARge de MOve”, equivalente a “*move using charge*”, uma referência ao facto de o carregamento ser rápido. O nome deriva de uma expressão japonesa que significa “Que tal uma chávena de chá?”, indicando que os utilizadores de VEs podem recarregar o seu veículo em tão pouco tempo quanto o necessário para tomar uma chávena de chá.

A CHAdeMO foi formada pela Tokyo Electric Power Company (TEPCO), Nissan, Mitsubishi e Fuji Heavy Industries (agora Subaru Corporation). A Toyota juntou-se mais tarde como o seu quinto membro executivo, seguida pela Hitachi, Honda e Panasonic. O departamento de *Research and Development* (R&D) da CHAdeMO foi criado em 2005 com o objetivo de desenvolver uma infraestrutura pública de carregadores rápidos que permitissem aos utilizadores conduzirem os seus VEs sem se preocuparem com a autonomia da sua bateria.

A primeira infraestrutura de carregamento CHAdeMO foi comissionada em 2009 juntamente com o lançamento do Mitsubishi i-MiEV.

Em 2014, a CHAdeMO foi publicada como parte das normas IEC (IEC 61851-23 para o sistema de carregamento, IEC 61851-24 para o protocolo de comunicação e IEC 62196-3 configuração AA para a ficha).

Em dezembro de 2015, a CHAdeMO atingiu a marca de 10 000 pontos de carregamento em 50 países espalhados por todo o mundo (5974 na Ásia, 2755 na Europa e 1400 na América do Norte).

Em julho de 2017, a CHAdeMO anunciou que o número tinha aumentado para mais de 16 000 carregadores instalados globalmente, estando a maior parte localizada no Japão (aproximadamente 7100). A Europa tinha mais de 4600, a América do Norte tinha mais de 2200 e 2000 estavam situados noutros locais.

Em 2018, o número total de pontos de carregamento CHAdeMO na Europa ultrapassou o do Japão.

Em abril de 2019, havia cerca de 25 300 pontos de carregamento CHAdeMO a nível mundial, com a maior fatia, 9200, na Europa, 7600 no Japão, 3200 na América do Norte e mais de 5300 noutros países.

Em julho de 2020, a Nissan lançou o Nissan Ariya nos mercados da UE/EUA, tendo este apenas uma tomada compatível com CCS. Após esta notícia, vários meios de comunicação social relataram que este era o fim da CHAdeMO na Europa e nos EUA. No mesmo ano, vários novos VEs compatíveis com CHAdeMO, tais como o Xpeng G3, o Mitsubishi Eclipse Cross e o Lexus UX300e foram lançados no mercado europeu. Em outubro de 2020, a CHAdeMO alcançou a marca de um milhão de veículos equipados com uma tomada CHAdeMO no mundo.

Atualmente, já se encontram 44 900 pontos de carregamento CHAdeMO instalados em 96 países, sem incluir os mais de 10 000 sistemas *Vehicle-to-Everything* (V2X) implementados globalmente.

A primeira versão do protocolo a ser emitida foi a CHAdeMO 0.9, podendo fornecer até 500 V e 125 A, o que corresponde a uma potência máxima de 62,5 kW. A maioria dos carregadores CHAdeMO instalados a nível mundial funcionam de acordo com a primeira versão do protocolo. Seguiu-se a versão 1.0, reforçando o protocolo a nível de proteção do veículo, compatibilidade e fiabilidade. Na versão 1.1, o botão de paragem de emergência tornou-se opcional e um diâmetro de cabo mais pequeno para *Vehicle-to-Home* (V2H) foi incluído. A versão 1.2 aumentou a potência máxima para 200 kW, mantendo o limite de tensão a 500 V e ampliando o limite de corrente para 400 A. Este avanço obrigou à implementação da proteção contra sobreaquecimentos, sobrecargas e curtos-circuitos. A versão CHAdeMO 2.0 já permite uma tensão até 1000 V e uma corrente até 400 A, logo pode fornecer uma potência máxima de 400 kW, e é compatível com a funcionalidade *Plug and Charge* (PnC). Através da colaboração entre a CHAdeMO e o China Electricity Council (CEC), foi lançada a versão CHAdeMO 3.0, permitindo uma potência até 900 kW (1500 V e 600 A). Este projeto inclui uma nova ficha denominada por ChaoJi. Ao adotar o arrefecimento líquido no interior do cabo e passando o mecanismo de bloqueio da ficha para o lado do veículo, a ChaoJi torna-se significativamente mais leve e compacta do que o anterior *design* da CHAdeMO.

Para além de fornecer energia, a ficha CHAdeMO, visível na Fig. 7, também envia e recebe dados do veículo utilizando o protocolo de comunicação Controller Area Network (CAN). Este desempenha funções tais como o bloqueio de segurança da ficha para evitar a passagem de corrente antes de ser seguro, transmite parâmetros da bateria à estação de carregamento, incluindo quando parar o processo de carga, o valor de tensão desejado, a capacidade total da bateria e o valor de corrente de saída que o carregador deve fornecer ao longo do carregamento.

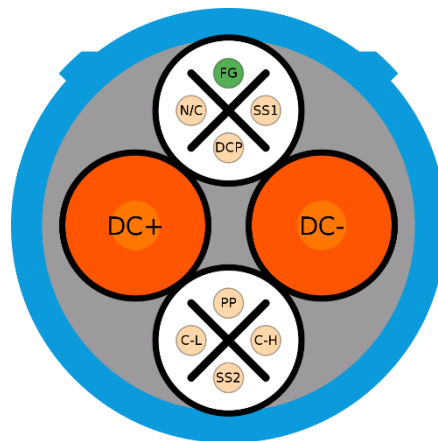


Fig. 7 - Pinos da CHAdeMO visto da extremidade da ficha [28]

Observando a Fig. 7, pode-se identificar os pinos da ficha CHAdeMO. O pino FG corresponde ao *Ground* e serve de referência para os sinais de controlo. Os pinos SS1 e SS2 correspondem ao *Charger Start/Stop 1* e *Charger Start/Stop 2*, respetivamente. O pino N/C significa *Not Connected* e, como o próprio indica, não é utilizado. O pino DCP corresponde ao *Charging enable/disable* e é o sinal que concede permissão ao EVSE para iniciar ou parar a carga. O DC+ e DC- correspondem às linhas de potência por onde flui a corrente. O pino PP (ou CC) corresponde ao *Connection check* e assegura o bloqueio da ficha. Por último, as linhas de comunicação CAN são representadas pelo C-L (CAN-Low) e C-H (CAN-High).

Embora a eletrificação dos transportes seja necessária para neutralizar as emissões de carbono, a adoção em massa de VEs tem sobrecarregado a rede, uma vez que muitos utilizadores começam a carregar os seus veículos ao mesmo tempo e as produtoras de energia com base em renováveis têm o problema da intermitência, que requer fontes de

energia flexíveis para as complementar. A função de carregamento bidirecional, tipicamente chamada de V2G, pode evitar tais congestionamentos de energia e assegurar a integração eficiente de fontes de energia renováveis. Atualmente, o protocolo de carregamento CHAdeMO é o único no mundo com a tecnologia V2G, com produção para o mercado e um sistema de certificação em vigor para assegurar a comunicação entre os VEs e os dispositivos compatíveis com V2G. Esta funcionalidade permite que os utilizadores de VEs utilizem o veículo como uma fonte de armazenamento de energia, poupando custos ao otimizar o uso de energia e injetando-a de volta para a rede.

Existem várias aplicações que surgiram do carregamento bidirecional como, por exemplo, o *Vehicle-to-Load* (V2L) para fornecimento de energia em locais de campismo ou construção e outras situações onde seja necessária uma fonte de energia móvel, tais como em casos de emergência; o V2H para otimização da gestão de energia doméstica; o *Vehicle-to-Building* (V2B) que possui a mesma função que o V2H, mas para o contexto de escritórios e edifícios residenciais [29].

2.3.3 PROTOCOLO CCS (COMBINED CHARGING SYSTEM)

Combined Charging System (CCS) é uma norma para carregamento de VEs que compreende as fichas Combo 1 e Combo 2. Estas duas fichas são extensões das SAE J1772 (Tipo 1) e IEC 62196 (Tipo 2) e incluem dois pinos adicionais para um carregamento CC de alta potência, como apresentado na Fig. 8. No entanto, a CCS permite o carregamento CA utilizando apenas a ficha Tipo 1 ou Tipo 2, dependendo da região geográfica.

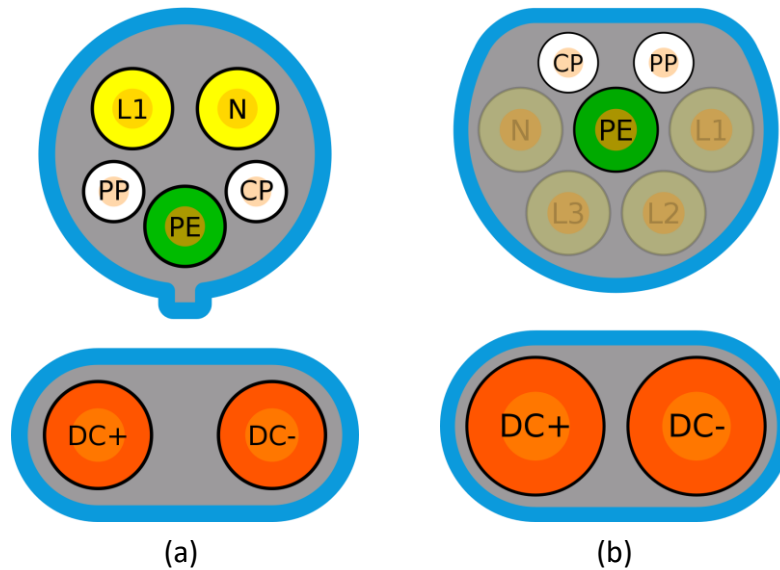


Fig. 8 - (a) Pinos da CCS Tipo 1 [30], (b) Pinos da CCS Tipo 2 [31]

Observando a Fig. 8, pode-se identificar os pinos das fichas CCS Tipo 1 e Tipo 2. Na Fig. 8 (a), o L1 e N correspondem às linhas de potência para carregamento CA monofásico. O pino PP corresponde ao *Proximity Pilot* e serve para indicar ao EVSE que a ficha se encontra ligada à tomada. O pino CP corresponde ao *Control Pilot* e é utilizado para a comunicação entre o VE e o EVSE. O DC+ e DC- correspondem às linhas de potência para carregamento CC. O pino PE corresponde ao *Protective Earth* e é utilizado como referência para os sinais PP e CP. Na Fig. 8 (b), o L1, L2, L3 e N correspondem às linhas de potência para carregamento CA monofásico ou trifásico. Neste caso, os pinos foram removidos, retratando as situações em que apenas o carregamento CC é possível.

A SAE e a European Automobile Manufacturers Association (ACEA) acordaram em adicionar duas linhas CC às fichas CA existentes na altura, de forma que houvesse apenas uma ficha que suportasse os vários modos de carregamento. Esta proposta foi publicada no 15º Congresso Internacional da VDI (*Verein Deutscher Ingenieure*) ou, traduzido para o português, Associação de Engenheiros Alemães, em outubro de 2011.

Em meados de 2012, sete fabricantes de automóveis (Audi, BMW, Mercedes-Benz Group AG, Ford, General Motors, Porsche e Volkswagen) aceitaram em introduzir a CCS.

Em junho de 2013, a Volkswagen construiu a primeira infraestrutura pública de carregamento rápido compatível com CCS com o objetivo de testar o Volkswagen E-Up. Duas semanas mais tarde, a BMW instalou o seu primeiro ponto de carregamento CCS para apoiar os utilizadores do BMW i3.

Na Alemanha, a Charging Interface Initiative e. V. (CharIN) foi fundada por um conjunto de empresas envolvidas na área automóvel para promover a adoção da CCS [32].

Atualmente, a CharIN afirma a existência de 29 000 pontos de carregamento CCS instalados na Europa, mais de 5000 na América do Norte e 13 000 na Ásia.

A CCS pode fornecer até 920 V e 500 A, correspondendo a uma potência máxima de 350 kW. Esta inclui as fichas e as respetivas tomadas, bem como todas as funções de controlo. Além disso, gere as comunicações entre o VE e a infraestrutura. As fichas foram desenvolvidas pela Phoenix Contact com o objetivo de resistirem a 10 000 ciclos de carga. As tomadas incluem mecanismos de proteção para um carregamento seguro e estão equipadas com os pinos necessários para todos os cenários de carga. O sistema de bloqueio evita que a ficha seja acidentalmente puxada da tomada durante o carregamento e, conseqüentemente, provoque um arco elétrico. O processo de carregamento é controlado por um conjunto de sinais elétricos desde o momento em que a ficha é ligada à tomada até ao final da carga.

O protocolo de comunicação utilizado pela CCS é o HomePlug Green PHY para Power Line Communication (PLC). Embora este protocolo não seja comum na indústria automóvel, é frequentemente utilizado em aplicações de *smart grid*. Nos próximos anos, a tendência é que os carregadores de VEs de maior potência sobrecarreguem a rede elétrica e a sua compatibilidade com os protocolos utilizados em *smart grids* acaba por se tornar vantajosa.

Ao contrário da ficha e da tomada, que dependem da localização geográfica, a comunicação durante o carregamento é igual em todo o mundo. Geralmente, podemos diferenciar dois tipos de comunicação: *Basic Signaling* (BS) e *High Level Communication* (HLC).

O BS é feito usando um sinal *Pulse Width Modulation* (PWM) que é enviado pelo EVSE através da linha *Control Pilot* (CP), de acordo com a norma IEC 61851-1. Este tipo de comunicação é utilizado para funções relacionadas com a segurança do carregamento, indicando, por exemplo, se a ficha se encontra encaixada na tomada antes de apresentar tensão aos seus terminais e se tanto o EVSE como o VE estão prontos para iniciar o processo de carga. O carregamento CA é possível utilizando apenas este sinal PWM. Neste caso, o EVSE altera o *duty cycle* do PWM para informar o VE da corrente máxima disponível no carregador. Um *duty cycle* de 5% indica que será utilizada a HLC.

A HLC, baseada em PLC, é utilizada para o carregamento CC e transferência de informação mais complexa como, por exemplo, o Balanceamento de Carga e o Modo de Autorização de Carga. Este tipo de comunicação também pode ser utilizado no carregamento CA. A HLC é baseada na norma internacional ISO/IEC 15118 e na norma alemã DIN SPEC 70121.

A CCS apresenta dois métodos distintos para o Balanceamento de Carga: Reativo e Agendado.

O Reativo é caracterizado pelo facto de o fluxo de energia do EVSE para o VE poder ser alterado instantaneamente para um limite específico.

O Agendado, além de suportar o Reativo, permite planear o fluxo de energia com diferentes limites de potência e indicadores de custo ao longo do tempo. A grande vantagem do Balanceamento de Carga Agendado é que possibilita prever o comportamento do processo de carga e otimizar a distribuição de energia numa *smart grid*.

No que diz respeito ao Modo de Autorização de Carga, existem igualmente dois métodos: PnC e Pagamento Externo.

O PnC é um Modo de Autorização de Carga onde o utilizador apenas tem de ligar o seu VE ao EVSE e todos os aspetos relativos à autenticação, autorização e pagamento são automaticamente tratados sem qualquer intervenção do utilizador. O PnC baseia-se em mecanismos de segurança e certificados para autenticação e identificação do utilizador. A

autorização pode incluir a cobrança gratuita e é possível limitar o utilizador autorizado a um grupo de utilizadores pré-definido.

O Pagamento Externo obriga o utilizador a identificar-se com um cartão Radio-Frequency IDentification (RFID) no leitor de RFID do EVSE ou realizar o pagamento com um cartão de débito, antes de proceder ao carregamento do veículo. Este Modo de Autorização de Carga também pode incluir a cobrança gratuita e é aplicável, por exemplo, a uma *wallbox* montada numa garagem [33].

3. ESTADO DA ARTE DOS SIMULADORES DE BATERIA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Os recentes desenvolvimentos na área da mobilidade elétrica confrontam os fabricantes de veículos e infraestruturas de carregamento com novos desafios. As normas relativas ao carregamento de VEs descrevem os requisitos que os carregadores devem cumprir, os protocolos de interface e a comunicação para controlar o processo de carga. Com isto, a combinação de VEs e carregadores de diferentes marcas pode resultar em diferentes tolerâncias do sistema de carregamento e influências provocadas pelo ruído, ou outras perturbações. Normalmente, as causas das falhas no carregamento de um VE são difíceis

de identificar devido ao longo processo de negociação na sessão de carga e às diferentes interações. Tais falhas, levam à necessidade de criar dispositivos capazes de simular o comportamento de um VE durante o carregamento e a comunicação com o carregador, seguindo os protocolos de comunicação referidos anteriormente. Neste capítulo, são identificadas algumas das soluções de simuladores de bateria de VEs, destacando-se os produtos do fabricante alemão Comemso (Complex embedded solutions) GmbH que serviram de apoio às escolhas efetuadas ao longo do desenvolvimento deste projeto.

3.1 SIMULADORES DA COMEMSO

A Comemso é uma empresa pioneira em tecnologias de teste e medição, bem como em soluções individuais personalizadas para a área automóvel, em particular, para a mobilidade elétrica. Foi fundada em dezembro de 2009 em Ostfildern, perto de Estugarda, na Alemanha. Em 2010, o desenvolvimento de um “Battery Cell Simulator” começou como o primeiro produto para teste de *Battery Management Systems* (BMSs) para VEs. A segunda família de produtos a ser adicionada foi a de dispositivos para a análise do sistema de carregamento, em 2011.

Atualmente, a Comemso oferece uma família completa de produtos do tipo “Charger Analyzer” que serve de suporte a todas as normas de carregamento de VEs espalhadas por todo o mundo [34]. Este tipo de equipamento pode ter um custo na ordem das centenas de milhares de euros.

O Analisador/Simulador CHAdeMO, visível na Fig. 9, é um dispositivo para a análise e simulação de carregamentos CC para sistemas CHAdeMO. Este simulador mede e verifica se tanto a comunicação como o circuito de carga se encontram em conformidade com o protocolo ao longo de todo o período de carga, registando todos os desvios. Desta forma, não só as causas das falhas do carregamento podem ser identificadas, mas também é possível exibir e visualizar estes eventos. Além disso, é possível utilizar este dispositivo como simulador de carregador ou *Man-in-the-Middle* (medição sem influência). De modo a assegurar a fiabilidade do sistema, estão disponíveis bibliotecas de testes automatizados que incluem a estimulação de falhas e testes de robustez. No entanto, a

Comemso oferece a possibilidade de programar testes manuais ou semi-automatizados como, por exemplo, a criação de *StopEvents* nos vários estados de carga, a implementação de *timeouts* e a interrupção do protocolo de comunicação CAN utilizado pelo CHAdeMO. A comunicação entre o computador e o simulador é feita através de uma interface gráfica CAN disponibilizada pela Comemso. No modo de simulação do VE, a bateria é simulada através de uma resistência eletrônica CC que pode ser igualmente controlada via CAN.



Fig. 9 - Analisador/Simulador CHAdeMO [35]

De uma forma mais detalhada, este simulador permite detetar os estados da carga, detetar eventos de paragem, medir e verificar os tempos, medir a tensão e a corrente dos diferentes sinais, medir a tensão e a corrente CC do circuito principal, medir os tempos em que as mensagens CAN são transmitidas e rececionadas, verificar a ordem das mensagens CAN, medir a qualidade do sinal CAN e detetar as causas de problemas no carregamento. No final de cada carregamento é gerado um relatório com os casos de sucesso e insucesso [36].

A Tabela 6 apresenta alguns detalhes técnicos acerca do Analisador/Simulador CHAdeMO.

Tabela 6 - Detalhes Técnicos do Analisador/Simulador CHAdeMO

Detalhes Técnicos	
Casos de Uso	Simulação do VE, Simulação do Carregador e <i>Man-in-the-Middle</i>
Tensão Máxima da Tomada (CC)	500 V
Corrente Máxima da Tomada (CC)	125 A
Medição de Sinais	Sinais de Baixa Tensão (12 V) e Análise Qualitativa da Camada Física do CAN
Simulação de Sinais	Sinais de Baixa Tensão (12 V) para a simulação do VE e do Carregador
Protocolos de Comunicação	Análise e Simulação do CHAdeMO 0.9.1, 1.0, 1.0.1, 1.1, 1.2 e 2.0

O Analisador/Simulador CA/CC-CCS, à semelhança do Analisador/Simulador CHAdeMO, é um dispositivo para a análise e simulação de carregamentos CA e CC, sendo este último direcionado para sistemas CCS. Cabe ao utilizador decidir se pretende que seja integrado o CCS Tipo 1, Tipo 2 ou ambos. Este simulador permite a análise CA de acordo com os modos de carregamento 1, 2 e 3 da norma IEC 61851-1, SAE J1772 e GB/T 18487.1 (apenas CA). Também permite a análise CC de acordo com o modo de carregamento 4 da norma IEC 61851-1, DIN 70121, ISO 15118 e SAE J1772, bem como a IEC 61851-23 Anexo "CC". Além disso, este dispositivo atua como um PLC *tracer* (regista todas as comunicações por PLC), mede a tensão e a corrente CA/CC em tempo real e testa de forma automatizada o sinal CP para verificar que se encontra conforme as normas. O facto de se poder variar a resistência do *Proximity Pilot* (PP) permite simular o encaixe e desencaixe da ficha no simulador. Esta solução, além de testar a tolerância do sinal PP, permite ao utilizador definir um número de carregamentos seguidos sem necessitar de intervir [37]. Para testes laboratoriais, a Comemso desenvolveu uma versão que permite atingir os 500 kW de potência, visível na Fig. 10.



Fig. 10 - Analisador/Simulador CA/CC-CCS (versão de 500 kW) [38]

A Tabela 7 apresenta alguns detalhes técnicos acerca do Analisador/Simulador CA/CC-CCS.

Tabela 7 - Detalhes Técnicos do Analisador/Simulador CA/CC-CCS

Detalhes Técnicos	
Casos de Uso	Simulação do VE, Simulação do Carregador e <i>Man-in-the-Middle</i> (medição sem influência)
Tensão Máxima da Tomada (CA/CC)	400 V/1000 V
Corrente Máxima da Tomada (CA/CC)	50 A/200 A
Medição de Sinais	Sinais de Baixa Tensão (12 V) e Análise das Comunicações PLC
Simulação de Sinais	Sinais de Baixa Tensão (12 V) para a simulação do VE e do Carregador
Normas de Teste/Análise	CA: IEC 61851-1, SAE J1772 e GB/T 18487.1 (apenas CA)/CC: IEC 61851-1, DIN 70121, ISO 15118, SAE J1772 e IEC 61851-23 Anexo "CC"

O número de estações de carregamento tem aumentado e com ele o esforço das equipas que prestam serviço no terreno. De modo a verificar que um carregador está a funcionar corretamente e que nada foi esquecido durante um comissionamento, é essencial um teste final de funcionamento após cada manutenção ou reparação. Com isto, a Comemso desenvolveu uma família do tipo Simulador Portátil Combinado que simula os sinais dos VEs, os protocolos de comunicação e os circuitos de carga dos protocolos de carregamento CHAdeMO e CCS e, se necessário, CA. Desta forma, é possível colocar dois “veículos” numa mala portátil e fácil de utilizar. Os resultados dos testes são apresentados em tempo real num ecrã tátil e adicionalmente armazenados no próprio dispositivo, podendo ser posteriormente importados em formato PDF para o computador.

O Simulador Portátil Combinado, visível na Fig. 11, permite a simulação de um VE compatível com CHAdeMO 1.2 ou inferior e CCS (DIN 70121 e ISO 15118) e, opcionalmente, CA. Uma das vantagens é o facto de não ser necessário um computador para efetuar testes no terreno. Este simulador permite efetuar testes de segurança (CCS apenas) do EVSE para verificar se existem falhas de isolamento. Além disso, é possível simular falhas nas linhas dos sinais da CCS como, por exemplo, cortar o *Protective Earth* (PE) e curto-circuitar o CP. Este dispositivo também possui entradas isoladas para a medição e validação externa da tensão CC. O Simulador Portátil Combinado pode ser alimentado ligando-o ao isqueiro de 12 V do carro através de um inversor de onda sinusoidal de 1 kW. No entanto, os carregamentos estão limitados a um período de, aproximadamente, 30 segundos [39].



Fig. 11 - Simulador Portátil Combinado [40]

A Tabela 8 apresenta alguns detalhes técnicos acerca do Simulador Portátil Combinado.

Tabela 8 - Detalhes Técnicos do Simulador Portátil Combinado

Detalhes Técnicos	
Casos de Uso	Simulação do VE
Tensão Máxima da Tomada (CC)	300 V
Corrente Máxima da Tomada (CC)	6 A
Tempo de Simulação Aprox.	30 s
Medição de Sinais	Sinais de Baixa Tensão (12 V) e Análise das Comunicações
Simulação de Sinais	Sinais de Baixa Tensão (12 V) para a simulação do VE
Normas de Teste/Análise	CHAdeMO: 0.9.1, 1.0.0, 1.0.1, 1.1 e 1.2 CCS: DIN 70121 e ISO 15118

3.2 SIMULADOR PORTÁTIL

Na Fig. 12, pode-se observar um simulador portátil utilizado pela empresa. Este apresenta uma tomada CHAdeMO e uma tomada CCS Tipo 2. O simulador possui no seu interior cargas resistivas para simular o consumo da corrente de carregamento. A corrente máxima aceite pelo simulador corresponde a 10 A, sendo necessário ter atenção ao tempo de carga para evitar o sobreaquecimento das resistências. É ainda possível ligar o computador ao simulador por porta série e enviar comandos para alterar o valor da corrente. No entanto, este não deteta qualquer tipo de falha durante o processo de carga nem possui uma interface gráfica para controlo do mesmo. Como o barramento de entrada é partilhado por ambas as tomadas, apenas se pode utilizar uma delas por carregamento.



Fig. 12 - Simulador portátil

4. DESENVOLVIMENTO DE SIMULADOR E CONTROLADOR DE CARGA DA BATERIA DE UM VEÍCULO ELÉTRICO

4.1 REQUISITOS DO SISTEMA

Numa primeira fase, foram identificados os requisitos do sistema e especificações, tendo sido atribuído um grau de prioridade a cada requisito, como apresentado na Tabela 9. A prioridade mais elevada corresponde a P0.

Tabela 9 - Requisitos do Sistema

Requisitos do Sistema		
#	Descrição	Grau de Prioridade
1	O sistema deverá permitir o controlo do carregamento CHAdeMO: <ul style="list-style-type: none"> Implementação do protocolo CHAdeMO 0.9.1, 1.2 e V2G. 	P0
2	O sistema deverá permitir o controlo do carregamento CCS Tipo 1/Tipo 2: <ul style="list-style-type: none"> Implementação do protocolo CCS. 	P1
3	O sistema deverá permitir o carregamento simultâneo CHAdeMO e CCS: <ul style="list-style-type: none"> Implementação do controlo de carga com múltiplos módulos. 	P1
4	O sistema deverá permitir o controlo do conversor CA/CC bidirecional: <ul style="list-style-type: none"> Implementação do protocolo de comunicação CAN com o conversor; Implementação da máquina de estados do conversor; Gestão da carga ao longo do período de carregamento. 	P0
5	O sistema deverá possuir um conjunto de contactores para controlo do fluxo da corrente: <ul style="list-style-type: none"> Implementação do controlo dos contactores e respetivo <i>feedback</i>. 	P0
6	O sistema deverá permitir a comutação entre a regeneração de energia e o uso de cargas resistivas para dissipação da mesma: <ul style="list-style-type: none"> Implementação de um seletor para a comutação entre a injeção de energia na rede e o uso de cargas resistivas. 	P0
7	O sistema deverá efetuar a medição de energia à entrada (CC) e à saída (CA): <ul style="list-style-type: none"> Implementação do protocolo de comunicação RS-485 com os medidores de energia. 	P1

8	<p>O sistema deverá possuir sensores de tensão e corrente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Leitura dos valores de tensão e corrente através de ADCs. 	P0
9	<p>O sistema deverá possuir sensores de temperatura nas tomadas e pontos críticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Uso de cartas eletrônicas de temperatura para a leitura dos sensores. 	P1
10	<p>O sistema deverá possuir uma aplicação que permita:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Configurar perfis de bateria e demais características (ex: tensão máxima da bateria, capacidade da bateria, tempo máximo de carga, etc.); • Simular a curva de tensão/corrente de uma bateria; • Simular o SoC de uma bateria; • Definir valores de tensão e corrente. 	P0
11	<p>O sistema deverá permitir a implementação de testes automáticos, tais como:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cargas de período variável; • Simular defeitos de pólo à terra (positivo e negativo); • Paragens normais e de emergência; • Desligar fisicamente a bateria durante o carregamento (<i>Load dump</i>); • Correntes de pico (<i>Inrush current</i>); • Ensaio normativos de segurança no carregamento CHAdEMO (ex: cortar o CC, <i>switch k</i> e GND); • Ensaio normativos de segurança no carregamento CCS (ex: cortar/variado o CP, cortar o PP e GND); • Falhas de comunicação. 	P0
12	<p>Deverá ser desenvolvida uma ferramenta que permita a análise dos <i>logs</i> do sistema e que possua as seguintes funcionalidades:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desenho da curva de carga; • Geração de relatórios. 	P0
13	<p>O sistema deverá possuir uma interface do utilizador.</p>	P2

4.2 ARQUITETURA DO SISTEMA

O sistema desenvolvido consiste num simulador de uma bateria de um Veículo Elétrico e um controlador de carga, e respetivas interfaces de comunicação que, em conjunto, permitem simular na sua plenitude o comportamento do VE durante uma sessão de carga.

A simulação da bateria é realizada por intermédio de conversores CA/CC bidirecionais que, juntamente com um módulo avançado de controlo, permitem emular o perfil da bateria do VE em termos de curva de tensão/corrente e SoC, entre outras características. Através do controlo em malha fechada dos conversores, é possível definir vários parâmetros, sendo o mais importante a tensão. Dessa forma, a corrente fornecida pelo carregador será consumida pelos conversores, resultando na sua injeção na rede. Tanto o valor de tensão como o limite de corrente de descarga são impostos pelo controlador de carga. Estes valores são ajustáveis e podem ser alterados através da interface gráfica, permitindo replicar diferentes perfis de bateria.

O controlador de carga, como o próprio nome sugere, é responsável pelo controlo dos conversores, comunicação com o carregador de VE e interface gráfica, e deteção de falhas.

A Fig. 13 apresenta a arquitetura de alto nível do sistema.

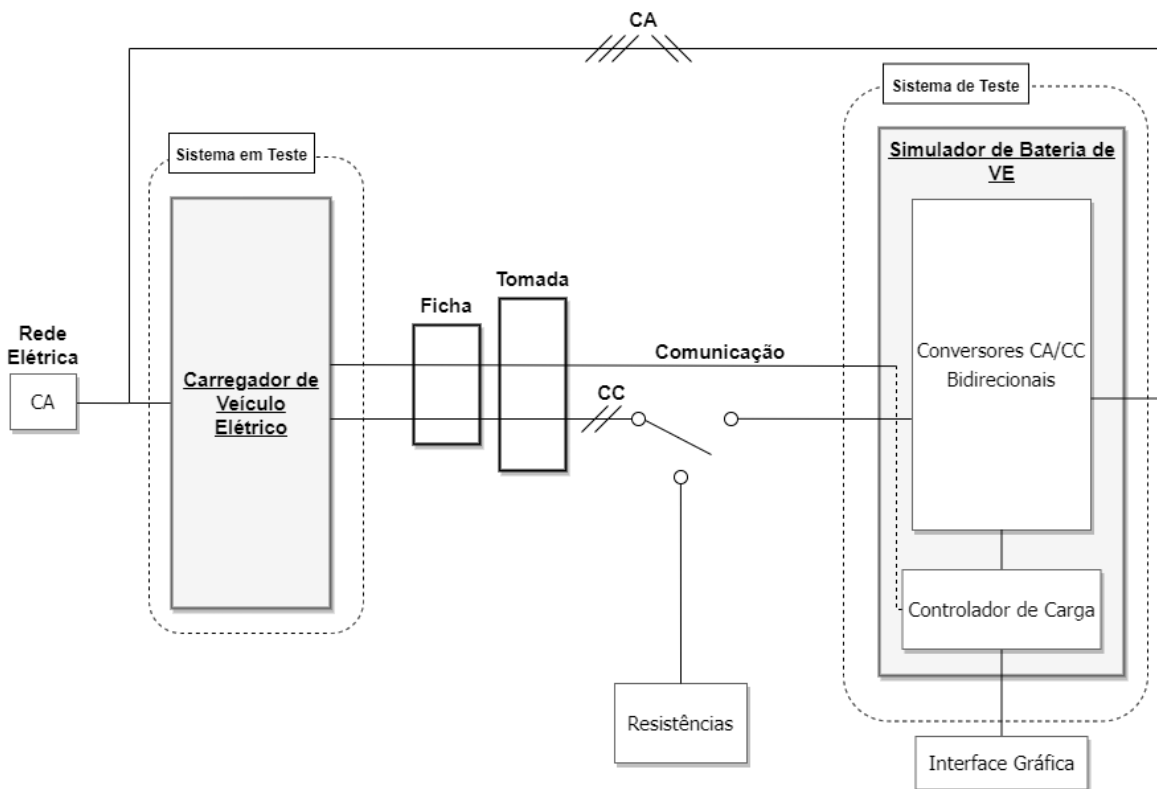


Fig. 13 - Arquitetura de alto nível do sistema

De forma mais detalhada, o simulador apresenta uma arquitetura modular, ou seja, é possível acrescentar (em paralelo) ou retirar conversores CA/CC bidirecionais, de acordo com a potência de carregamento que se pretende testar. Com uma eficiência até 96%, cada conversor permite carregar ou descarregar até 22 kW. Estes suportam uma tensão máxima de 1000 V e uma corrente máxima de 73.3 A.

O protocolo de carregamento implementado corresponde ao CHAdEMO (versões 0.9.1 e 1.2), daí o sistema possuir uma tomada do tipo CHAdEMO. Tanto os sinais analógicos de baixa tensão (12 V) como o protocolo de comunicação CAN utilizados pelo protocolo CHAdEMO, são controlados por uma *Printed Circuit Board* (PCB) denominada Placa Principal de Controle. Esta PCB integra um microcontrolador Advanced RISC Machine (ARM) e é dotada de Entradas/Saídas necessárias para o controlo da carga e interação com o EVSE. Relativamente ao protocolo CCS, este será futuramente integrado no sistema. Dado isso, a solução final conta com uma tomada CCS Tipo 1 e uma tomada CCS Tipo 2, sendo a CCS Control Board a PCB responsável pelo controlo do protocolo.

O controlo dos conversores é realizado através da Placa Principal de Controlo e, também ele, emprega o protocolo de comunicação CAN. O facto da Placa Principal de Controlo possuir mais de um barramento CAN isolado, permite interagir, simultaneamente, com a CHAdeMO e com os conversores.

O circuito de potência inclui, entre outros, um par de contactores (um para cada pólo do barramento CC), fusíveis, um sensor de tensão e um sensor de corrente. Os contactores, igualmente controlados pela Placa Principal de Controlo, permitem gerir o fluxo da corrente do carregador para o simulador. Os sensores estão ligados a dois canais *Analog-to-Digital Converter* (ADC) independentes da Placa Principal de Controlo e monitorizam os valores de tensão e corrente ao longo de todo o processo de carga.

A grande particularidade do sistema reside no facto dos conversores se encontrarem ligados à rede elétrica para que, durante a simulação, a corrente utilizada seja injetada de novo na rede e, assim, as perdas de energia sejam mínimas. No entanto, a flexibilidade do sistema permite optar entre o uso dos conversores ou de cargas resistivas, que podem ser utilizadas para simular o consumo da corrente de carregamento.

O simulador conta ainda com um sistema para a medição de energia à entrada e à saída.

Por último, o utilizador pode ligar o computador ao Switch/Router via Ethernet e aceder a uma interface gráfica para controlo do simulador e de certas variáveis como, por exemplo, a tensão e a corrente, dentro dos limites definidos. Além disso, pode ser seleccionado um perfil de bateria para que seja simulada a respetiva curva de carga. Todos os parâmetros da simulação são monitorizados e apresentados em tempo real. A interface gráfica corre na Placa de Interface Gráfica (Rock Pi S) [41], sendo esta um *Single Board Computer* (SBC) com um sistema operativo Linux.

A Fig. 14 descreve a arquitetura detalhada da solução final.

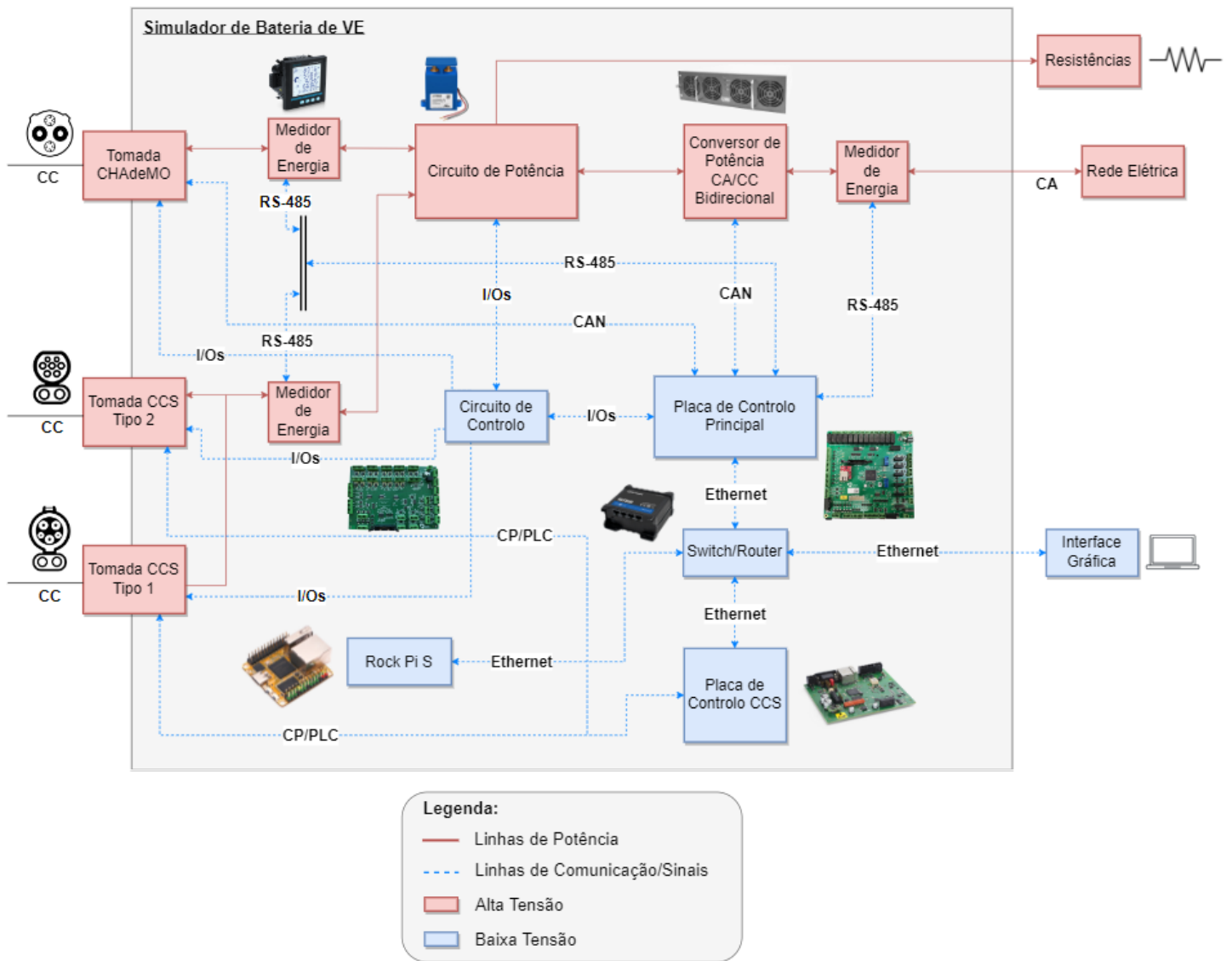


Fig. 14 - Arquitetura detalhada do simulador implementado

4.3 IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste subcapítulo é apresentado o projeto elétrico, bem como o desenvolvimento do *firmware* e *software*.

Em primeiro lugar, foi elaborado o projeto elétrico, envolvendo o desenho do esquema elétrico e a modelação 3D do protótipo do simulador.

Seguiu-se o desenvolvimento do *firmware* responsável pelo controlo de baixo nível de todos os componentes. O código foi implementado na Placa Principal de Controlo e escrito na linguagem de programação C.

Por último, foi desenvolvido o *software*, que consistiu numa camada de mais alto nível para a interação entre o utilizador e o simulador.

4.3.1 PROJETO ELÉTRICO

Primeiramente, procedeu-se ao desenho do esquema elétrico. Apesar do esquema apresentar várias páginas, apenas irá ser demonstrada parte do circuito de potência e a Placa Principal de Controlo.

O sistema apresenta dois principais circuitos: o circuito de potência e o circuito de controlo.

O circuito de potência corresponde ao circuito principal do sistema e é constituído pela tomada CHAdeMO, contactores, sensores de tensão e corrente, conversores CA/CC bidirecionais e medidor de energia CA. Este circuito, à semelhança do circuito de potência de um carregador, possui proteções, como um fusível por pólo, um disjuntor tetrapolar entre o lado CA do conversor e a rede elétrica e, ainda, um IMD para monitorização da resistência de isolamento do sistema. A Fig. 15 mostra parte do esquema elétrico do circuito de potência do simulador onde são evidenciados alguns dos componentes mencionados.

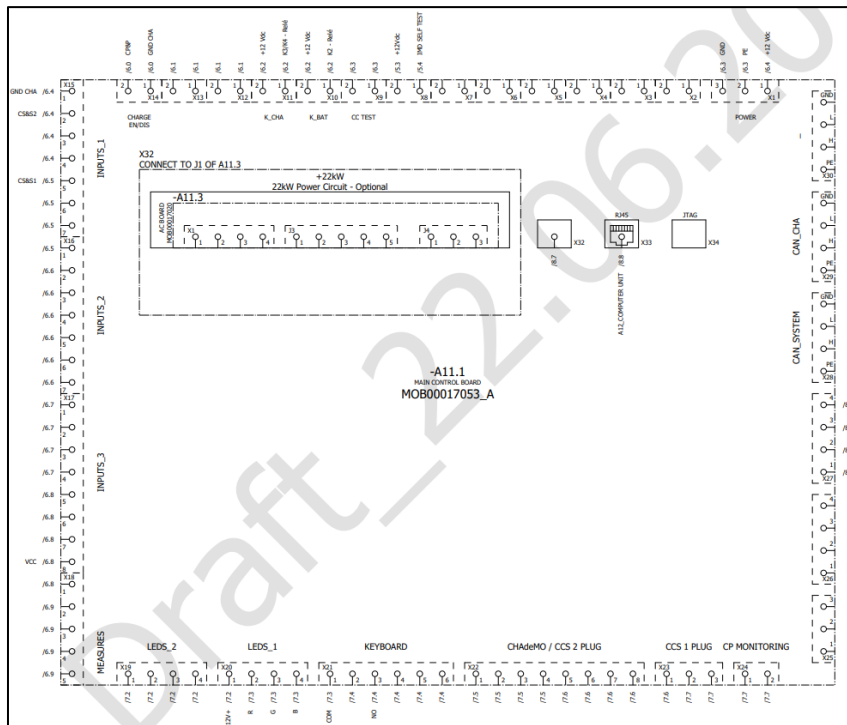


Fig. 16 - Esquema elétrico da Placa Principal de Controle

De notar que foram efetuadas várias revisões ao esquema elétrico antes de se obter a versão final. Nesta fase, foram ainda escolhidos todos os componentes do simulador e gerada a respetiva lista de materiais ou *Bill of Materials* (BoM).

De seguida, irá ser apresentada a topologia geralmente utilizada no desenvolvimento de conversores CA/CC bidirecionais.

Como referido anteriormente, o simulador de bateria do VE é baseado num conversor CA/CC bidirecional que permite a injeção de potência na rede, proveniente do carregador em teste. O conversor é constituído por duas etapas de conversão principais: a etapa CA/CC que está ligada à rede elétrica e a etapa CC/CC que está ligada ao carregador de VE, tal como se encontra esquematizado na Fig. 17.

Na Fig. 17, é possível identificar a etapa CA/CC, constituída por um inversor trifásico de dois níveis composto por semicondutores de potência (Q1 a Q6) e componentes passivos relacionados (L e C). O princípio de funcionamento desta etapa de conversão é a regulação da tensão aos terminais do condensador (C).

A segunda etapa de conversão, CC/CC, é baseada numa topologia *Dual Active Bridge*, com um circuito ressonante LLC. Esta topologia permite, desde logo, a introdução de isolamento galvânico, através de um transformador de alta frequência, entre a entrada do simulador e a rede elétrica, e controlo do trânsito de potência bidirecional, necessário para a aplicação em causa. No circuito apresentado, é possível identificar duas pontes completas: uma no primário (Q7 a Q10) e outra no secundário (Q11 a Q14). Através do controlo integrado e coordenado destes semicondutores, é possível regular a tensão de entrada (Carregador de VE), essencial para a simulação do perfil de uma bateria.

Os semicondutores utilizados neste tipo de montagem são transístores *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET) com tecnologia *Silicon Carbide* (SiC), que permitem a operação com frequências elevadas e com um nível de perdas baixo. Adicionalmente, a topologia em causa permite explorar técnicas de comutação suave na operação dos semicondutores, com impacto positivo no rendimento do conversor.

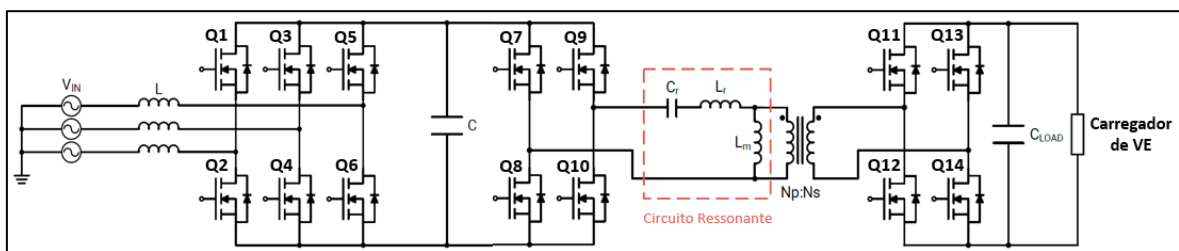


Fig. 17 - Circuito de um conversor CA/CC bidirecional

Concluído o desenho do esquema elétrico, modelou-se o protótipo do simulador em 3D através do SolidWorks [42]. O modelo apresenta a disposição dos componentes na platine e as furações. Como a solução é escalável, torna-se possível acrescentar conversores na parte traseira da platine, aumentando, assim, a potência disponibilizada pelo simulador. A Fig. 18 e Fig. 19 apresentam a vista frontal e lateral do modelo 3D, respetivamente.

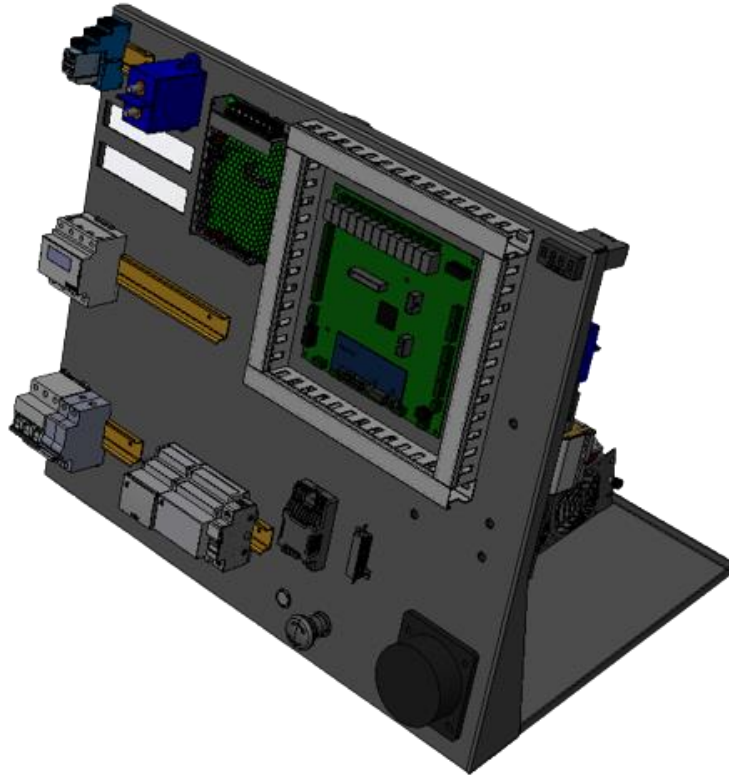


Fig. 18 - Vista frontal do modelo 3D do protótipo do simulador

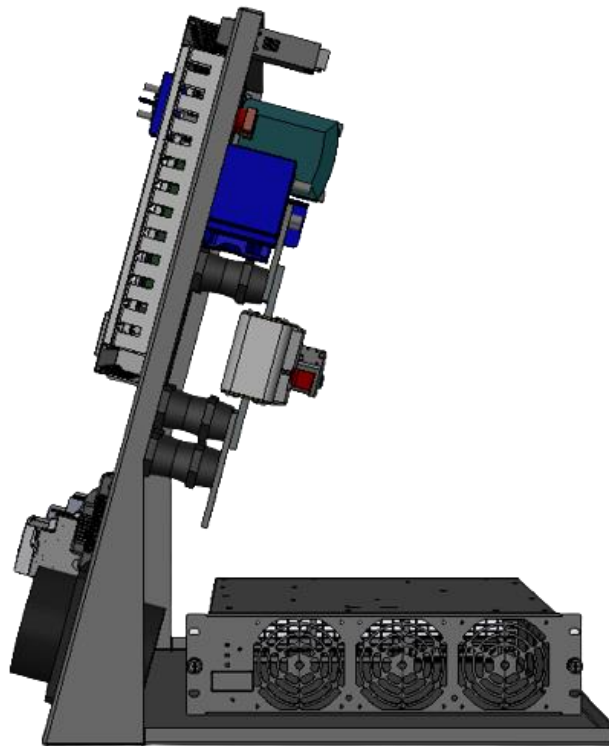


Fig. 19 - Vista lateral do modelo 3D do protótipo do simulador

A Tabela 10 mostra as especificações técnicas do simulador implementado.

Tabela 10 - Especificações técnicas do simulador implementado

Especificações Técnicas*	
Entrada CC	
Tensão	150 a 1000 V
Corrente	0 a 146,6 A
Potência Nominal	44 kW
Saída CA	
Fases/Linhas	3 Fases + Neutro + Terra
Tensão e Frequência	400 V; 50 Hz
Corrente e Potência Nominais	66,6 A; 44 kVA
Eficiência	≥ 96%
Especificações Gerais	
Tomadas	CHAdeMO
Temperatura de Funcionamento	-25 a +50°C
Dimensões (L x C x A)	580 mm x 670 mm x 920 mm
Botões	Botão de Paragem Normal e Botão de Emergência
Sinalização	LED de estado de carga
Comunicação	Ethernet
Medições	Medidor de Energia CA

* os valores podem variar consoante o número de conversores ligados ao simulador.

4.3.2 DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE

Numa fase inicial, foi essencial estudar e compreender o protocolo de comunicação do conversor CA/CC bidirecional e respetivo controlo. Tal estudo levou à implementação de funções para a transmissão e receção das mensagens contempladas no protocolo de comunicação. A Placa Principal de Controlo é responsável por enviar pedidos de

informação ao conversor e este responde com mensagens acerca do seu estado, medidas de tensão e corrente, entre outras. Dada a possibilidade de o sistema possuir mais que um conversor, foi implementada a comunicação com múltiplos conversores. Validada a robustez da comunicação com o conversor, passou-se para a implementação de funções para o seu controlo. Estas funções permitem definir o seu modo de funcionamento e controlar os valores de tensão e corrente.

Numa segunda fase, foi fundamental estudar a documentação técnica relativa ao protocolo de carregamento CHAdeMO (versões 0.9.1 e 1.2), com maior incidência nos sinais analógicos de controlo e respetiva sequência. Para isso, foram criadas funções para a transmissão e receção das mensagens. No início da comunicação entre ambas as partes, o carregador informa o simulador acerca da versão do protocolo suportada e vice-versa. Dependendo da versão suportada pelo carregador, o simulador decide qual utilizar na sessão de carga. A Fig. 20 apresenta parte da função de transmissão das mensagens associadas ao protocolo CHAdeMO.

```
static void simulator_chademo_v09_comms_process_tx(ChademoSM *simulator_chademo_sm)
{
    uint8_t *simulator_chademo_tx_buff = hal_can_get_chademo_tx_buff_ptr();

    memset(simulator_chademo_tx_buff, 0, CHA_DATA_LEN);

    if(g_system_state.simul_data.session_CHAdeMO_protocol == CHAdeMO_V09)
    {
        // Total Battery Capacity (0.1kWh/bit) -> Byte 6
        simulator_chademo_tx_buff[6] = simulator_chademo_sm->vehicle_data.total_bat_cap & 0xFF;
    }

    else if(g_system_state.simul_data.session_CHAdeMO_protocol == CHAdeMO_V12)
    {
        // Minimum Charge Current (1A/bit) -> Byte 0
        simulator_chademo_tx_buff[0] = simulator_chademo_sm->vehicle_data.minimum_charge_current;
        // Charged Rate Constant Value (1%/bit) -> Byte 6
        simulator_chademo_tx_buff[6] = simulator_chademo_sm->vehicle_data.charged_rate_const_val;
    }

    // Maximum Battery Voltage (1V/bit) -> Byte 4 & 5
    simulator_chademo_tx_buff[4] = simulator_chademo_sm->vehicle_data.max_bat_voltage & 0xFF;
    simulator_chademo_tx_buff[5] = simulator_chademo_sm->vehicle_data.max_bat_voltage >> 8;

    hal_can_chademo_tx(CHA_V2C_BATT_INFO, CHA_DATA_LEN);
}
```

Fig. 20 - Parte da função de transmissão das mensagens associadas ao protocolo CHAdeMO

De seguida, foi implementada a máquina de estados do CHAdeMO, do ponto de vista do simulador. Esta é constituída por vários estados que foram analisados e ponderados em função da sequência dos sinais analógicos de controlo mencionados na norma.

No início, todas as variáveis são colocadas com o seu valor por omissão, incluindo aquelas a serem enviadas do simulador para o carregador. Quando é recebida a ordem de início do carregamento (sinal analógico), é ativada a comunicação digital via CAN com o carregador.

Neste momento, há a troca de informação entre ambas as partes. O simulador notifica o carregador acerca do seu tempo máximo de carga e informações da bateria, e fica à espera de receber, por parte do carregador, a tensão e a corrente disponíveis à saída, bem como a versão do protocolo CHAdeMO em que comunica. Face a isto, o simulador determina a compatibilidade com o carregador. Caso sejam compatíveis, o simulador dá permissão ao carregador para iniciar o carregamento e este bloqueia a ficha.

Quando a ficha é bloqueada, o carregador sinaliza o simulador para este fechar os contactores de entrada. Após a medição da tensão da bateria, o carregador fornece o valor de corrente solicitado pelo simulador.

Dado isto, são solicitados continuamente valores de tensão e corrente ao carregador até o processo de carga estar concluído.

Quando é recebido um pedido de paragem do carregamento, o simulador monitoriza o barramento de saída até a corrente injetada pelo carregador ser igual ou inferior a 5 A. Caso esta condição se verifique, os contactores de entrada são abertos. Após isto, o simulador aguarda que o carregador desbloqueie a ficha.

A máquina de estados regressa ao início, assim que o utilizador retire a ficha da tomada do simulador. No entanto, também é possível transitar para o início por ordem do *software*. Para tal, foi colocado um relé na linha da tomada CHAdeMO responsável por sinalizar ao carregador o encaixe da ficha. Desativando e ativando este relé por *software*, é simulado o desencaixe e encaixe da ficha, necessitando o utilizador de apenas dar início a uma nova carga.

A Fig. 21 apresenta o fluxograma relativo ao protocolo CHAdeMO, do ponto de vista do simulador. No Anexo A pode-se observar a máquina de estados mais detalhada.

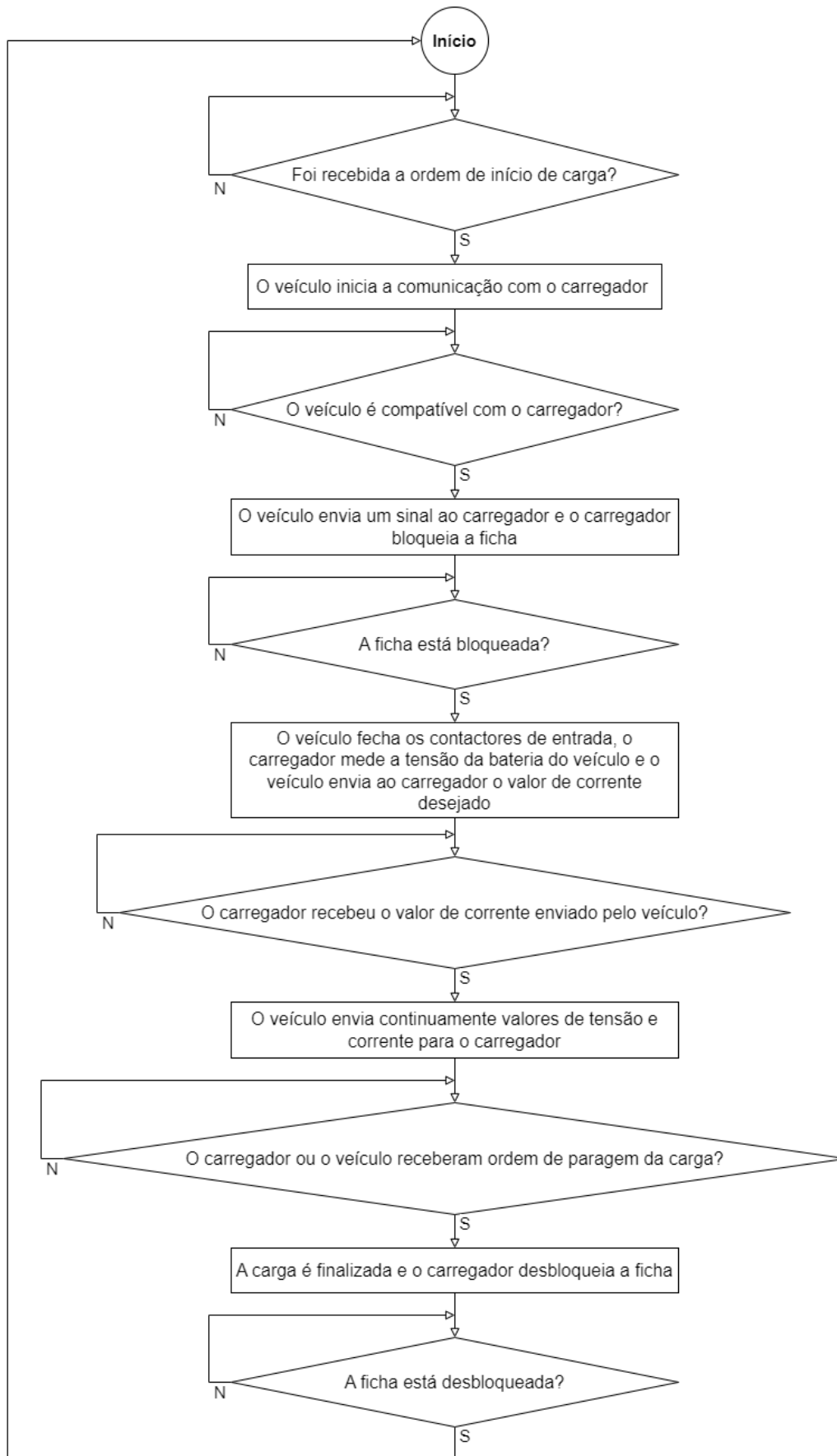


Fig. 21 - Fluxograma do protocolo CHAdeMO (simulador)

Numa terceira fase, com base na norma CHAdeMO, foi implementada a detecção de falhas e respetiva atuação, não só para proteção do simulador, mas também para a identificação de possíveis anomalias do carregador. Os erros considerados foram a falha de comunicações, sobretensões e diferenças nos valores de corrente e tensão entre o simulador e o carregador. Todos os erros são constantemente monitorizados durante o processo de carga e é gerado um *Diagnostic Trouble Code* (DTC) em função da falha detetada.

Numa quarta fase, foi implementada a máquina de estados do conversor e que é supervisionada pela máquina de estados do CHAdeMO, operando as duas máquinas em paralelo.

No início, o conversor encontra-se inativo. Quando é recebido um pedido para início de carga, é verificado o estado atual do conversor e são-lhe enviados os valores de tensão e corrente, podendo estes variar até ser recebida uma ordem de paragem. Caso o conversor se encontre em falha, o carregamento é abortado e os valores de tensão e corrente são colocados a zero, tal como numa paragem normal. Por fim, é gerado o respetivo DTC.

Os valores de tensão e corrente podem ser definidos manualmente ou de forma autónoma, simulando a curva de carga da bateria de um VE. O conversor regula a tensão aos seus terminais e injeta na rede a corrente disponibilizada pelo carregador, nunca ultrapassando o limite definido.

A Fig. 22 apresenta o fluxograma relativo ao funcionamento do conversor.

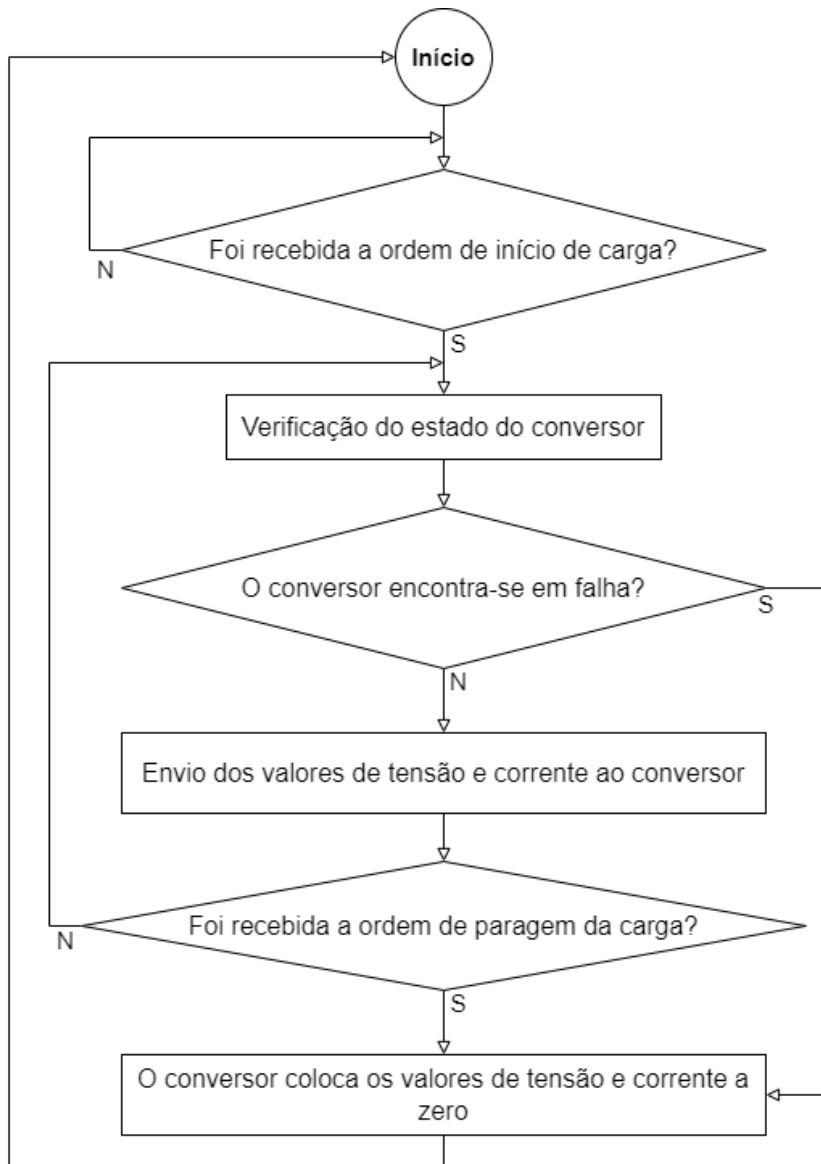


Fig. 22 - Fluxograma do funcionamento do conversor

Numa fase final, foi implementada a possibilidade de o simulador utilizar os conversores (Modo Bateria) ou cargas resistivas (Modo Resistência). Cabe ao utilizador optar pela utilização dos conversores ou das resistências. Por sua vez, o simulador automaticamente reconhece qual das opções está a ser utilizada e ajusta o seu modo de funcionamento. Na ausência de comunicações com os conversores, é selecionado o Modo Resistência. A comutação pode ser feita entre cargas, sem haver necessidade de se reiniciar o simulador.

4.3.3 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

Numa fase inicial, foi utilizado o protocolo Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) [43] para monitorização e controlo da Placa Principal de Controlo. Porém, este protocolo requer um intermediário que permita aos clientes comunicar entre si e que se denomina por MQTT *broker*. Mais concretamente, um *broker* é um servidor que recebe as mensagens publicadas pelos clientes, filtra-as por tópico e encaminha-as para os subscritores. Para tal, foi utilizado o *broker Mosquitto (open-source)* [44], tendo sido este instalado e configurado na Placa de Interface Gráfica. Após a implementação do protocolo MQTT, foi definida uma lista de tópicos a serem publicados pela Placa Principal de Controlo para o *broker*. Ligando o computador a esta rede, é possível subscrever aos tópicos publicados através da aplicação “MQTT Explorer” [45], funcionando esta como um cliente.

Os tópicos permitem ao utilizador obter informações acerca do modo de funcionamento do simulador (Modo Bateria ou Modo Resistência), estado atual da máquina de estados do conversor, versão do protocolo CHAdeMO (0.9.1 ou 1.2) utilizado na sessão de carregamento, valores enviados pelo simulador ao carregador (ex: tensão máxima do simulador, capacidade total do simulador, etc.), medidas de tensão e corrente e, caso tenha ocorrido uma falha, é possível visualizar o DTC gerado. Por outro lado, de forma ao utilizador poder controlar manualmente o simulador, foi definida uma lista de tópicos a serem publicados através do “MQTT Explorer” para o *broker* e, posteriormente, subscritos pela Placa Principal de Controlo. Estes tópicos incluem, por exemplo, alterar os valores de tensão e corrente, o SoC e parar a carga do lado do simulador.

A Fig. 23 apresenta a lista de tópicos publicada pela Placa Principal de Controlo no *broker*.

```

MQTT Explorer
Search...

192.168.0.63
▼ EV Simulator
state = {"battState":"IDLE","battRequestedstate":"DEFAULT","DTC":"DTC_RESET (1000)"}
vehicleMeasures = {"voltage_100mV":0,"current_100mA":0,"power_100W":0,"energy_Wh":0,"sessionTime":0}
▼ CHAdeMO
sessionProtocol = {"protocol":"v0.9"}
vehicleInfo = {"maxBatt_V":435,"totalBattCap":255,"maxChargingTime":46335,"protocol":2,"targetBatt_V":410,"currentRequest":0,"fault":0,"status":0}
inputs = {"opto_f(d1)":1,"opto_g(d2)":1,"opto_h(cc)":0}
chargingEnable = 0
logCAN = {"order":"NONE"}
config = {"mode":"BATTERY","maxVoltage":1000,"maxCurrent":146.6,"numModules":2}
topics = {"version":"1.1","date":"2022-09-27"}

```

Fig. 23 - Tópicos publicados pela Placa Principal de Controlo no *broker*

Numa segunda fase, foi desenvolvida uma aplicação na linguagem de programação Python para a simulação da curva de carga da bateria de um VE. A grande vantagem desta aplicação é que possibilita a importação de *logs* de dados registados num cenário real de carga de um VE. Um *log* é um ficheiro que regista todos os eventos que ocorreram num determinado sistema durante um certo período de tempo. Quer isto dizer que, um *log*, regista todas as mensagens trocadas entre o carregador e o veículo durante a carga. As tramas enviadas pelo veículo possuem informações como a tensão e corrente desejadas, SoC da bateria, entre outras. Além disso, a aplicação permite definir um SoC inicial e um SoC final para que seja simulada apenas parte da carga.

Por último, de forma a tornar mais prática e intuitiva a interação com o simulador, foi desenvolvida uma interface gráfica. Uma das grandes vantagens do simulador é o facto de qualquer utilizador se poder ligar a ele via Ethernet (futuramente via Wi-Fi) e aceder à interface gráfica sem ter de instalar qualquer ferramenta no seu dispositivo.

A interface gráfica possui os menus General, CHAdeMO, Signals, EV Simulation, Logger e Information, sendo toda a informação exibida em tempo real.

O menu General, Fig. 24, apresenta quatro grupos: Configuration, State, Measures e Commands. O grupo Configuration indica se o simulador se encontra no modo de funcionamento Bateria ou Resistência, os valores máximos de tensão e corrente suportados pelo sistema e, também, o número de módulos ativos. Os máximos são calculados dinamicamente, em função do número de módulos ativos. O grupo State apresenta informações acerca do estado do simulador e o DTC gerado no final de cada

carga. O grupo Measures apresenta, em tempo real, o valor da tensão (V), corrente (A), potência (kW) e energia (kWh), bem como os respectivos gráficos. Além disso, mostra o tempo da sessão de carga em horas, minutos e segundos. O grupo Commands permite interagir com o simulador através de botões para parar a carga ou iniciar uma nova sessão sem ser necessário retirar a ficha CHAdeMO.

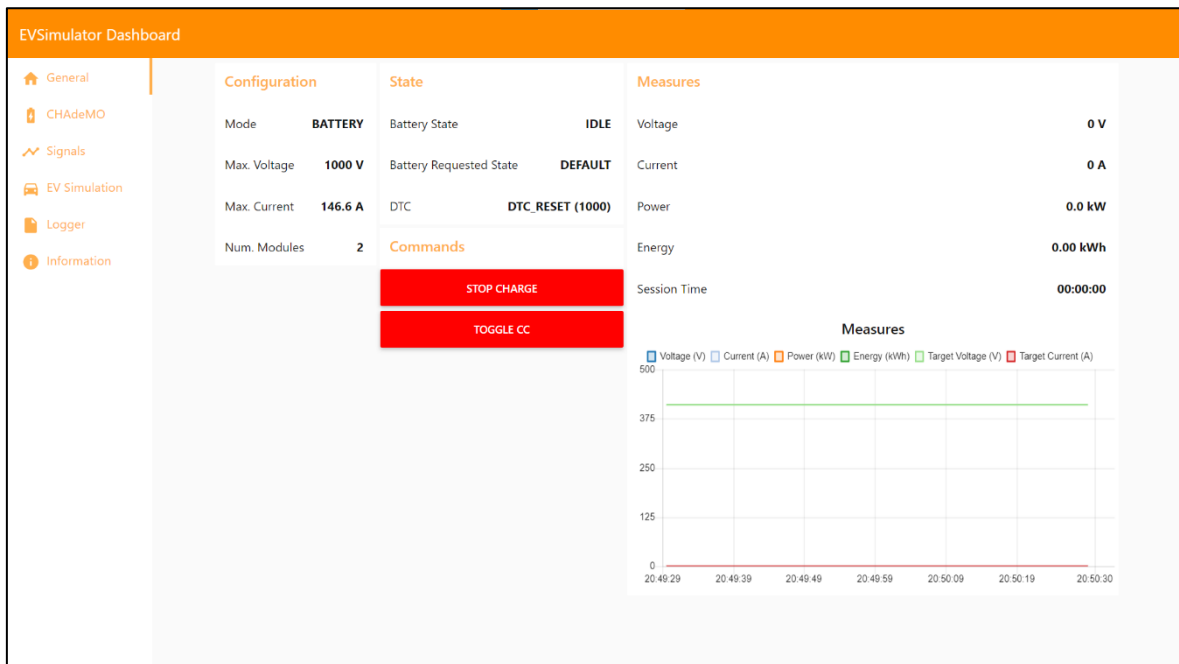


Fig. 24 - Menu General da interface gráfica

O menu CHAdeMO, Fig. 25, apresenta cinco grupos: Session Protocol, Targets, State of Charge, Additional Information e Commands. O grupo Session Protocol, como o próprio nome indica, especifica se a versão do protocolo CHAdeMO utilizada no carregamento é a 0.9.1 ou 1.2. O grupo Targets apresenta os valores de tensão e corrente enviados ao carregador. O grupo State of Charge permite visualizar a percentagem atual da bateria. O grupo Additional Information contém informações relativas ao simulador, segundo o protocolo CHAdeMO. Este grupo apresenta a tensão máxima da bateria, a capacidade total e restante da bateria e o valor das *flags* de estado e falha. O grupo Commands permite enviar valores de tensão, corrente e capacidade restante da bateria ao carregador. De notar que todos os campos possuem limites previamente estipulados.

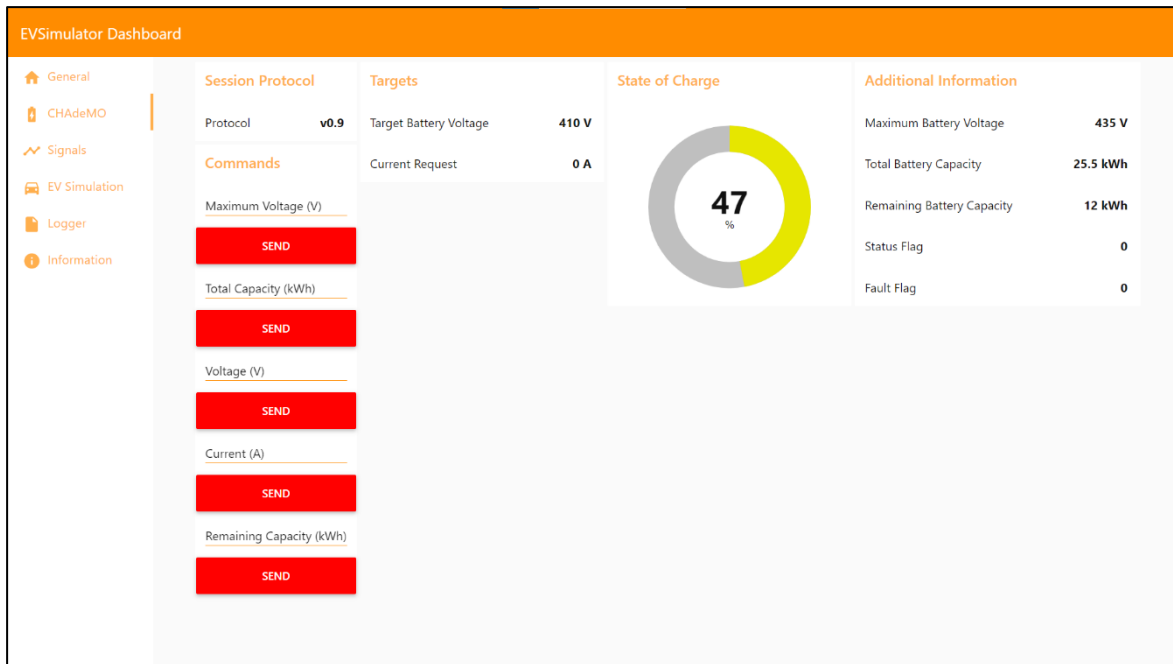


Fig. 25 - Menu CHAdeMO da interface gráfica

O menu Signals, Fig. 26, mostra o estado de todos os sinais analógicos do simulador envolvidos no protocolo CHAdeMO, isto é, os optoacopladores f, g, h e o *switch* k. Esta informação é útil para saber se os sinais foram ativados ou desativados nos devidos instantes.

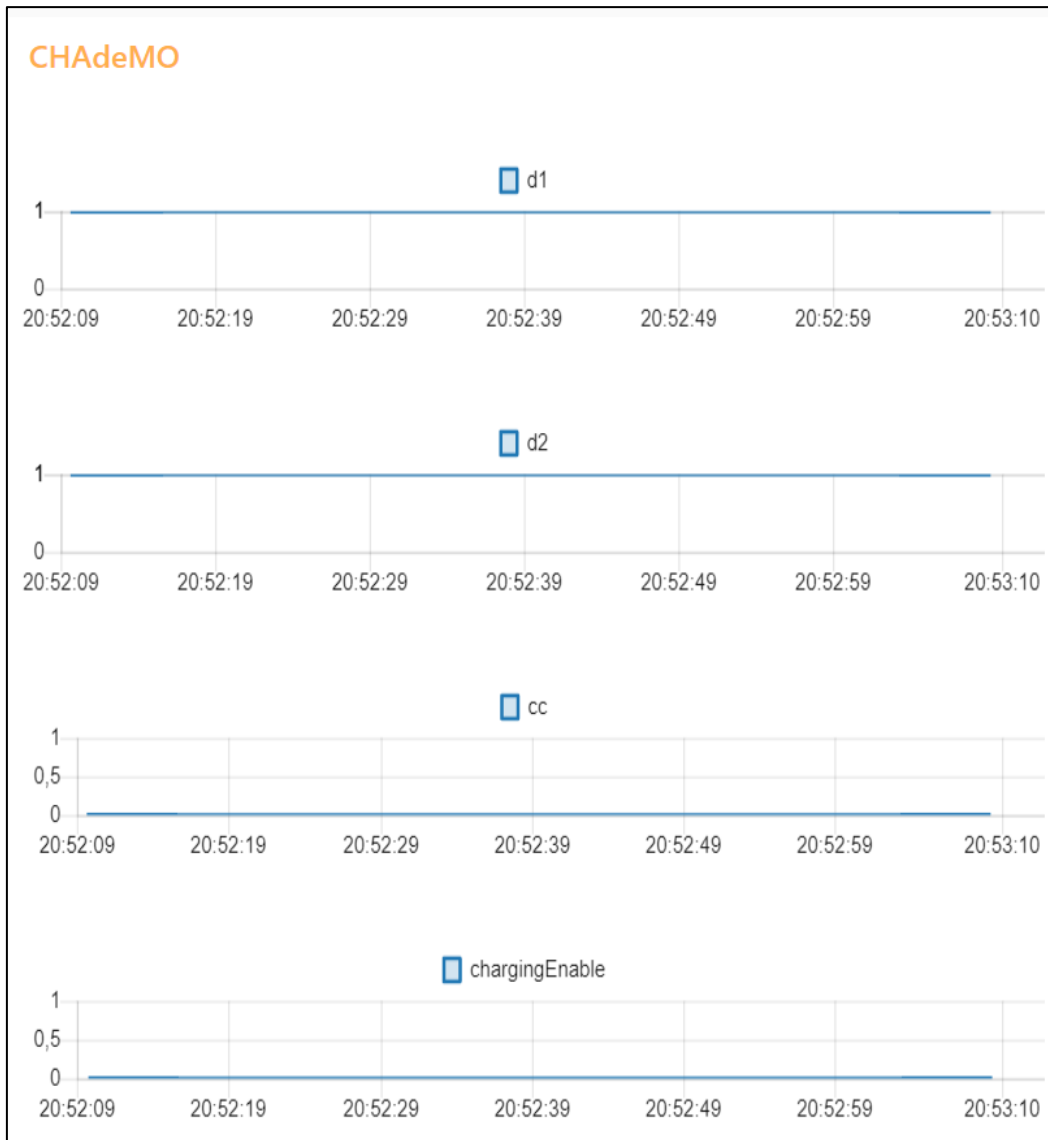


Fig. 26 - Menu Signals da interface gráfica

O menu EV Simulation, Fig. 27, apresenta dois grupos: Charging Curve e Parameters. O grupo Charging Curve permite ao utilizador seleccionar o perfil de bateria que pretende simular como, por exemplo, o perfil de um Nissan Leaf. O grupo Parameters possibilita seleccionar o SoC inicial e final da simulação, sendo que o primeiro deve ser sempre inferior ao segundo para que seja autorizada a carga.

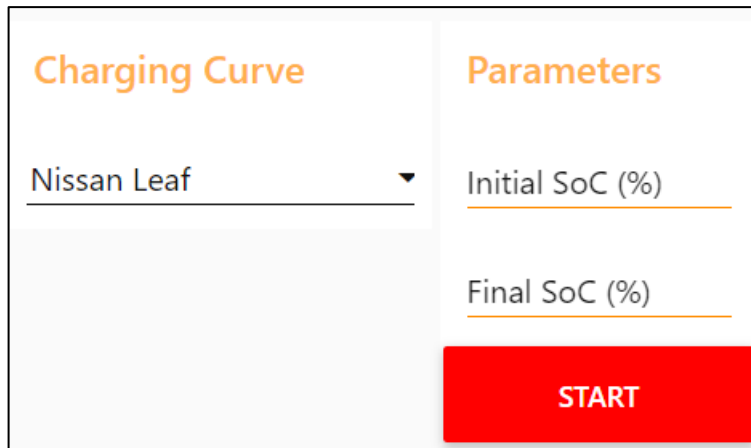


Fig. 27 - Menu EV Simulation da interface gráfica

O menu Logger, Fig. 28, apresenta, igualmente, dois grupos: Control e Status. O grupo Control permite ativar ou desativar o registo de *logs*, sendo estes guardados na Placa de Interface Gráfica. Os *logs* possuem toda a informação publicada no *broker* MQTT, juntamente com a respetiva hora. Por defeito, todos os tópicos são guardados no mesmo *log*. No entanto, ativando a opção “Log by Topic”, é possível separar os *logs* por tópico MQTT. Esta funcionalidade é útil no caso de se querer analisar mais facilmente a evolução de um determinado parâmetro do simulador. O botão “Reset” repõe as configurações iniciais. O grupo Status indica ao utilizador se o *logging* está ativo ou desativo.

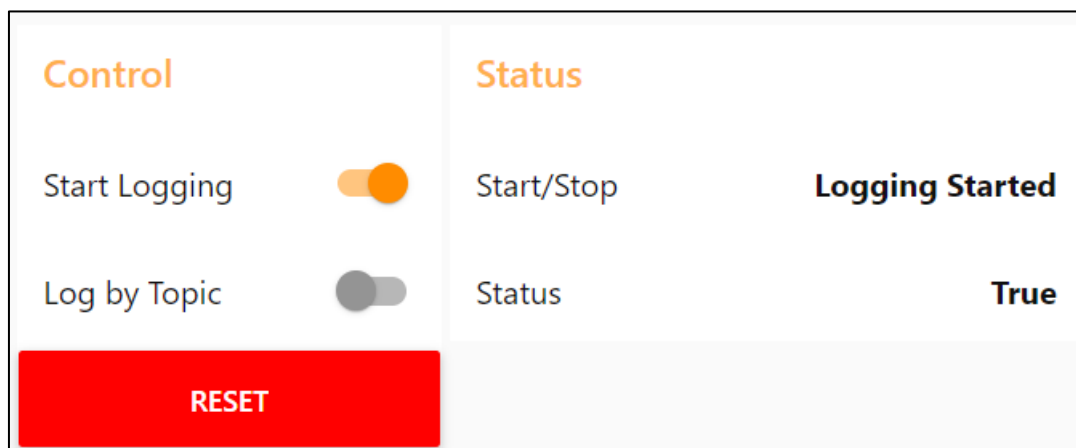


Fig. 28 - Menu Logger da interface gráfica

5. VALIDAÇÃO DO SISTEMA

Antes de se testar o simulador nos diferentes cenários de carga, foi necessário validar o correto funcionamento do sistema.

Num momento inicial, foram implementados comandos de teste para validação dos vários componentes do sistema. Como a Placa Principal de Controlo suporta uma *stack* TCP/IP, é possível aceder à mesma através do protocolo Telnet, onde surge uma consola que permite enviar comandos de leitura e escrita. Ao longo deste subcapítulo, são apresentados exemplos dos comandos implementados e respetiva descrição.

De forma a validar o funcionamento do conversor CA/CC bidirecional, foram implementados comandos para teste diagnóstico do mesmo. O primeiro comando serviu para validar o funcionamento do conversor no modo retificador. Este permite ao

utilizador definir a tensão que pretende obter na saída CC do conversor, dentro dos limites estipulados. O teste valida o correto funcionamento do conversor, verificando se o valor de tensão no barramento de saída corresponde àquele definido pelo utilizador ($\pm 5\%$). Durante o teste, são realizadas várias leituras através do sensor de tensão do sistema. Caso nenhuma das medidas coincida com o valor definido, é retornada falha. Como o teste é realizado em vazio, não é possível definir uma corrente de saída. A Fig. 29 apresenta um exemplo do comando para definir os valores de tensão e corrente à saída de um determinado conversor. A opção “-i” permite seleccionar o conversor que se pretende testar e as opções “-v” e “-c” permitem definir os valores de tensão (V) e corrente (A), respetivamente. Neste exemplo, foi testado o primeiro módulo a uma tensão de 410 V e 10 A.

```
Welcome to Telnet! your IP:Port --> [192.168.0.5:60019]
console>
#E1#
console>prodtest on
prodtest on
#E0#
prodtest>set_pmodule -i 1 -v 410 -c 10
set_pmodule -i 1 -v 410 -c 10
#E0#
```

Fig. 29 - Exemplo do comando para definir a tensão e a corrente à saída do(s) conversor(es)

O segundo comando serviu para validar o funcionamento do conversor no modo “bateria”. Neste caso, ligou-se um segundo conversor ao lado CC do primeiro. O comando permite ao utilizador definir a tensão à entrada do conversor e a corrente de descarga, sendo esta injetada na rede elétrica. O teste valida o correto funcionamento do conversor, verificando não só o valor de tensão no barramento de entrada, mas também o valor de corrente no barramento de saída. Além disso, foram implementados comandos para a leitura do estado do conversor.

O funcionamento dos contactores também foi validado através de comandos de teste. Um dos comandos serviu para validar a atuação dos mesmos, podendo o utilizador definir individualmente o seu estado (aberto ou fechado). Como os contactores utilizados possuem uma linha de *feedback*, foi implementado outro comando para leitura do seu estado atual. Este conjunto de comandos permite validar a integridade dos contactores, verificando se existe alguma diferença entre o comando e o *feedback*. A Fig. 30 apresenta um exemplo do comando para controlo dos contactores. A opção “on”, visível no exemplo, permite fechar os contactores.

```
Welcome to Telnet! your IP:Port --> [192.168.0.5:59481]
console>
#E1#
console>prodtest on
prodtest on
#E0#
prodtest>simul_set_k on
simul_set_k on
#E0#
```

Fig. 30 - Exemplo do comando para controlo dos contactores

A validação dos sinais da tomada CHAdeMO foi igualmente realizada através de comandos de teste. Nesse sentido, foram implementados comandos para a atuação do *Connection Check* (CC) e do *Charging enable/disable* (*switch k*). O comando relativo ao CC permite ao utilizador iniciar uma nova carga sem ter de retirar fisicamente a ficha CHAdeMO. O comando relativo ao *switch k* permite terminar a carga em qualquer momento. A Fig. 31 apresenta um exemplo do comando para controlo do CC. A opção “toggle” desativa e, de seguida, ativa autonomamente o relé responsável pelo sinal CC, simulando o desencaixe e encaixe da ficha CHAdeMO.

```
Welcome to Telnet! your IP:Port --> [192.168.0.5:59566]

console>

#E1#

console>prodtest on
prodtest on

#E0#

prodtest>simul_set_cc toggle
simul_set_cc toggle

#E0#
```

Fig. 31 - Exemplo do comando para controle do CC

Por último, foi implementado um comando de teste para o envio de valores de tensão e corrente. Este permitiu validar o funcionamento do sistema em diferentes níveis de potência. A Fig. 32 apresenta um exemplo do comando para definir os valores de tensão e corrente durante o carregamento. Neste exemplo, foi efetuado um carregamento a uma tensão de 410 V e uma corrente de 10 A, utilizando o protocolo CHAdEMO.

```
Welcome to Telnet! your IP:Port --> [192.168.0.5:59622]

console>

#E1#

console>prodtest on
prodtest on

#E0#

prodtest>simul_set_target -v 410 -c 10
simul_set_target -v 410 -c 10

#E0#
```

Fig. 32 - Exemplo do comando para definir a tensão e a corrente durante o carregamento

5.1 ENSAIOS

Após a validação da sua integridade, o sistema foi usado para ensaios de carga, ensaios de esforço e ensaios de falha. Os carregadores submetidos a estes tipos de ensaios foram um modelo de 45 kW e um modelo de 120 kW, visíveis na Fig. 33 e Fig. 34, respectivamente. O modelo de 45 kW corresponde a uma estação de carga rápida e suporta o carregamento CA e CC em simultâneo. Este apresenta uma potência máxima de 45 kW em CC e 43 kVA em CA. O modelo de 120 kW também é uma estação de carga rápida e, à semelhança do simulador, apresenta uma topologia modular, permitindo a alocação dos módulos de potência a cada uma das saídas. Este modelo suporta o carregamento CC simultâneo até 3 VEs. Ambos os carregadores podem apresentar múltiplas configurações, sendo compatíveis com VEs equipados com CHAdeMO, CCS e CA Tipo 2.



Fig. 33 - Carregador com uma potência de 45 kW utilizado nos ensaios [46]



Fig. 34 - Carregador com uma potência de 120 kW utilizado nos ensaios [47]

Os ensaios de carga foram realizados nos dois modos suportados pelo simulador, ou seja, Modo Resistência e Modo Bateria. No Modo Resistência, foi considerada uma corrente de 10 A. A tensão medida aos terminais da resistência depende do seu valor óhmico. No Modo Bateria, foi considerada uma tensão de 410 V e uma corrente de 73,3 A. Além disso, foi simulada a curva de carga da bateria de um Nissan Leaf e consideradas diferentes abordagens da mesma.

De modo a evitar o sobreaquecimento das cargas resistivas, foi considerado apenas o Modo Bateria para os ensaios de esforço. Estes ensaios abrangeram níveis de potência mais elevados durante longos períodos de tempo. A potência máxima testada correspondeu a 44 kW, tendo sido considerada uma corrente de 125 A (máximo suportado pelo protocolo de carregamento CHAdeMO 0.9.1). No entanto, o sistema encontra-se preparado para valores de potência mais elevados, sendo apenas necessário acrescentar módulos ao simulador.

Por último, os ensaios de falha abrangeram tanto o carregador como o simulador. Assim, foram testadas falhas de comunicação com os módulos, falhas de comunicação com o

carregador, sobretensões e diferenças nos valores de corrente e tensão entre o simulador e o carregador. A Fig. 35 e Fig. 36 apresentam a vista frontal e lateral da solução final implementada.



Fig. 35 - Vista frontal do simulador implementado



Fig. 36 - Vista lateral do simulador implementado

A Fig. 37 mostra um dos ensaios realizados. À esquerda pode-se observar o carregador de 120 kW em teste e à direita o simulador desenvolvido. Na imagem, a ficha CHAdeMO do carregador encontra-se ligada ao simulador.



Fig. 37 - Ensaio do carregador de 120 kW com o simulador implementado

5.2 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste subcapítulo são apresentados e analisados os resultados relativos aos ensaios experimentais.

5.2.1 ENSAIOS DE CARGA

Em primeiro lugar, foram efetuados os ensaios de carga.

A Fig. 38 mostra os resultados obtidos durante o ensaio de carga do carregador de 45 kW no Modo Resistência. Neste ensaio, foi considerada uma corrente de 10 A.

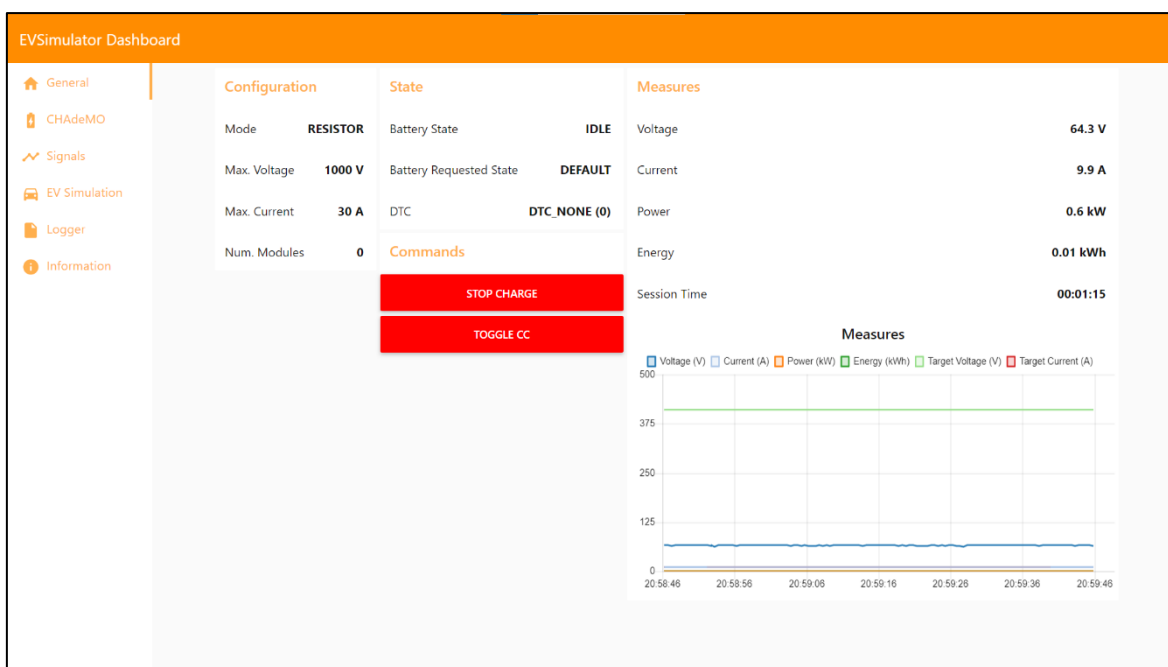


Fig. 38 - Resultados do ensaio de carga do carregador de 45 kW no Modo Resistência

Observando a Fig. 38, pode-se verificar que a medida da corrente é precisa, apresentando um valor igual a 9,9 A. Como a resistência utilizada possui um valor de 6,5 Ω , seria de esperar que a tensão medida aos seus terminais correspondesse a 65 V. Relativamente à medida da tensão, esta apresenta um valor igual a 64,3 V, aproximando-se do valor calculado. Analisando a Fig. 39, verifica-se que, tanto a tensão (linha azul-escuro) como a corrente (linha azul-clara) medidas, mantêm-se constantes ao longo do carregamento.

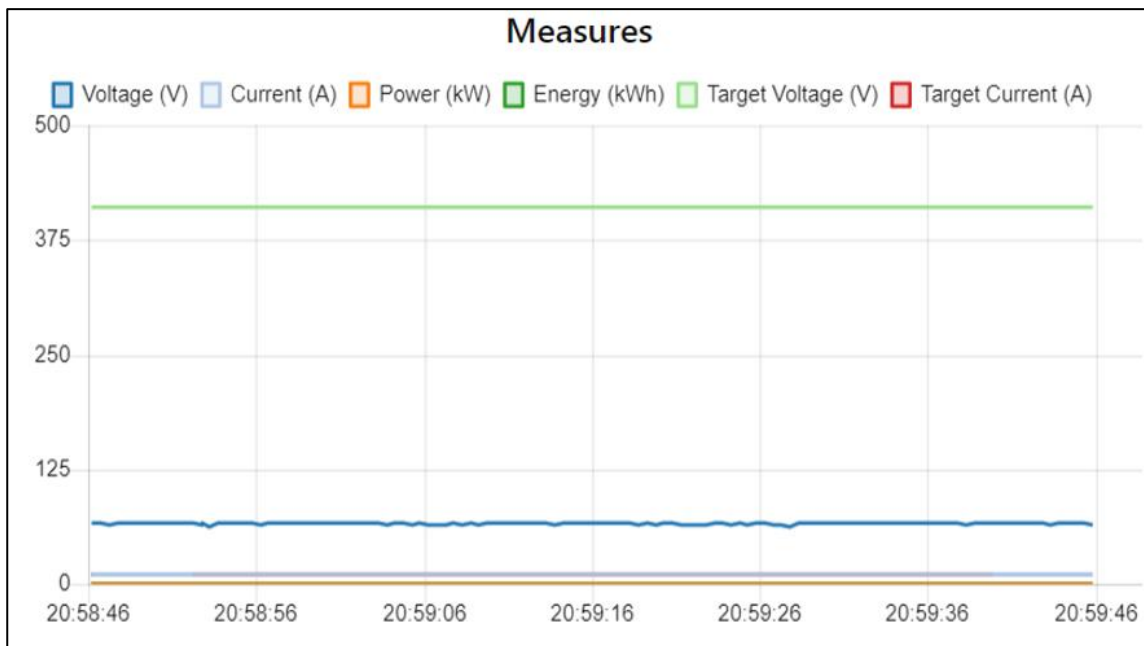


Fig. 39 - Medidas durante o ensaio de carga do carregador de 45 kW no Modo Resistência

A Fig. 40 permite visualizar o estado dos sinais analógicos do protocolo CHAdeMO durante o ensaio de carga do carregador de 45 kW no Modo Resistência.

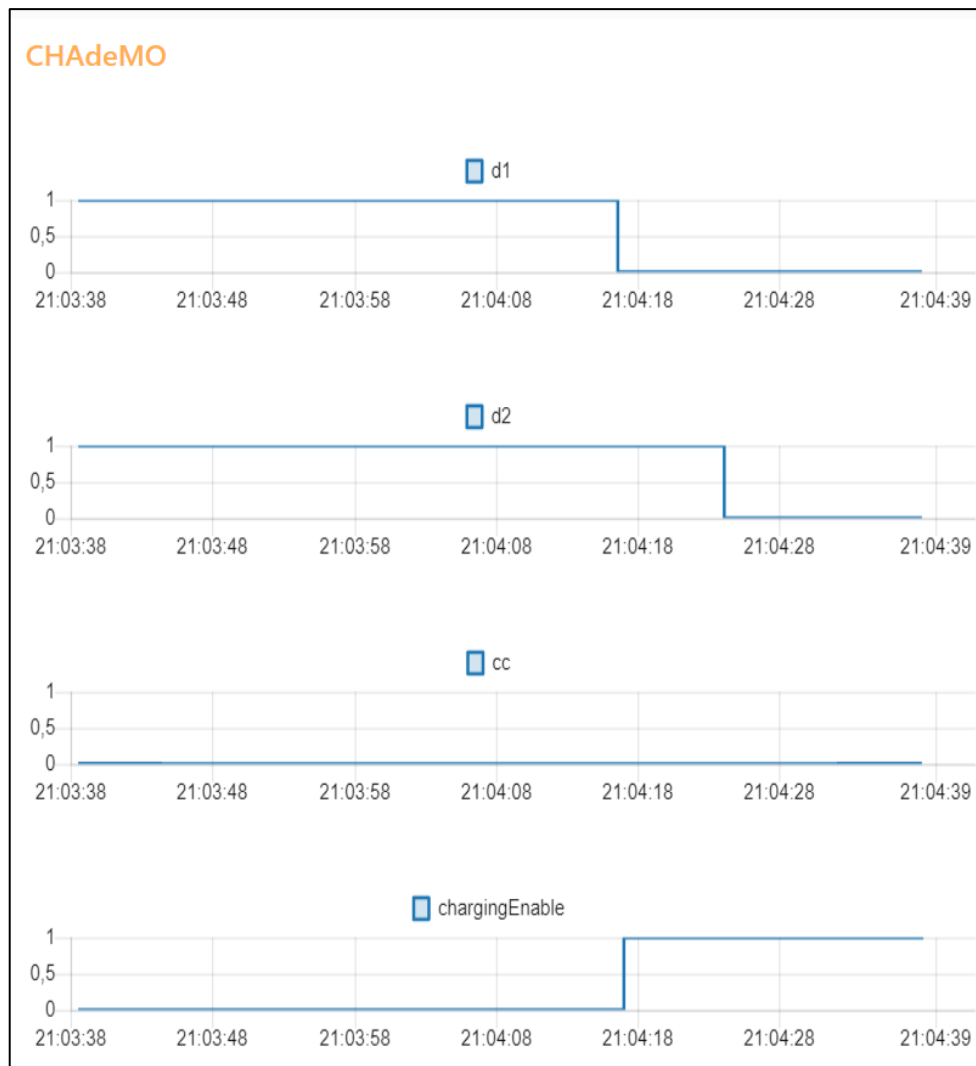


Fig. 40 - Estado dos sinais analógicos do protocolo CHAdeMO durante o ensaio de carga do carregador de 45 kW no Modo Resistência

Observando a Fig. 40, pode-se verificar a correta sequência dos sinais. Em primeiro lugar, o carregador ativa o “d1”, sendo este detetado pelo optoacoplador f. Quando este último é detetado, o simulador ativa o “chargingEnable”, ou seja, o *switch* k. Por último, o carregador ao receber a permissão do simulador para iniciar o processo de carga, ativa o “d2”, que é detetado pelo optoacoplador g. Relativamente ao “cc” ou optoacoplador h, este não transita de estado pelo facto da ficha ter sido encaixado antes da carga. De notar que as entradas do simulador possuem lógica inversa. Quer isto dizer que são ativadas a zero.

A Fig. 41 mostra os resultados obtidos durante o ensaio de carga do carregador de 45 kW no Modo Bateria. Neste ensaio, foi considerada uma tensão de 410 V e uma corrente de 73,3 A.

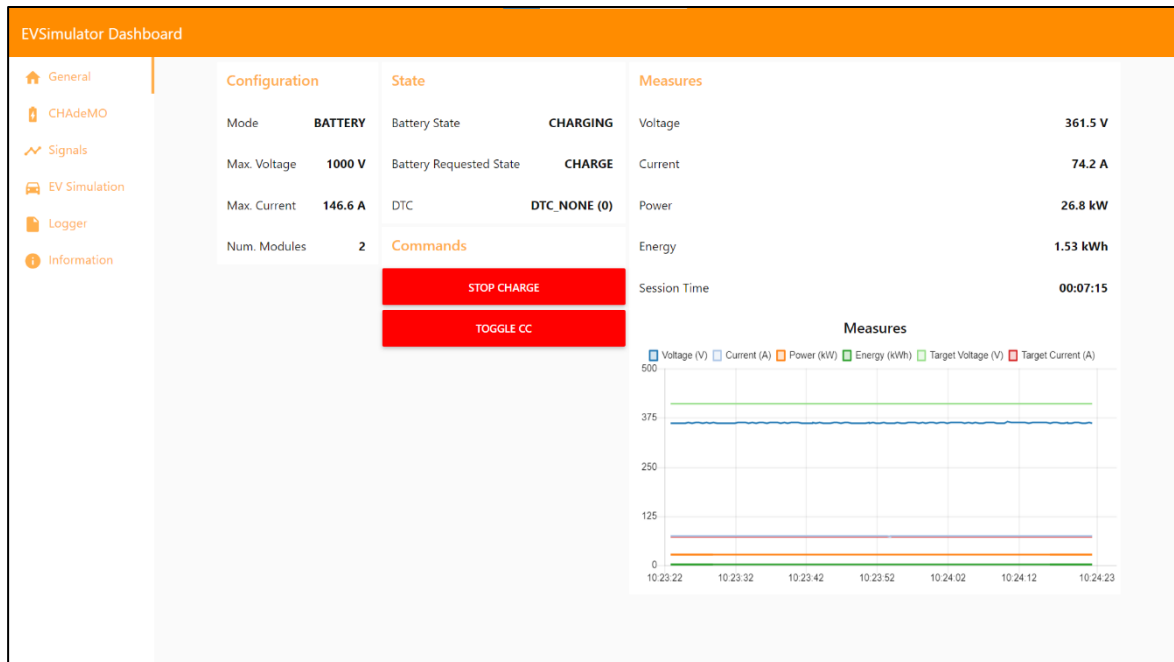


Fig. 41 - Resultados do ensaio de carga do carregador de 45 kW no Modo Bateria

Observando a Fig. 41, pode-se verificar, novamente, a precisão da medida da corrente, existindo uma diferença inferior a 1 A entre o *target* (valor esperado) e a própria medição. O desvio na medida da tensão explica-se pelo facto do valor enviado aos conversores corresponder a 90% do *target*. Isto, porque a corrente necessita de fluir do carregador para o simulador e, apesar de indicarmos ao carregador que o *target* de tensão corresponde a 410 V, é necessário enviar aos conversores um valor inferior a este. Para o valor de tensão considerado, os conversores devem gerar uma tensão igual a 369 V. No entanto, a medida da tensão apresenta um valor igual a 361,5 V, sendo a diferença inferior a 8 V. Analisando a Fig. 42, verifica-se que a tensão (linha azul-escura) e a corrente (linha azul-clara) medidas mantêm-se constantes ao longo do carregamento.

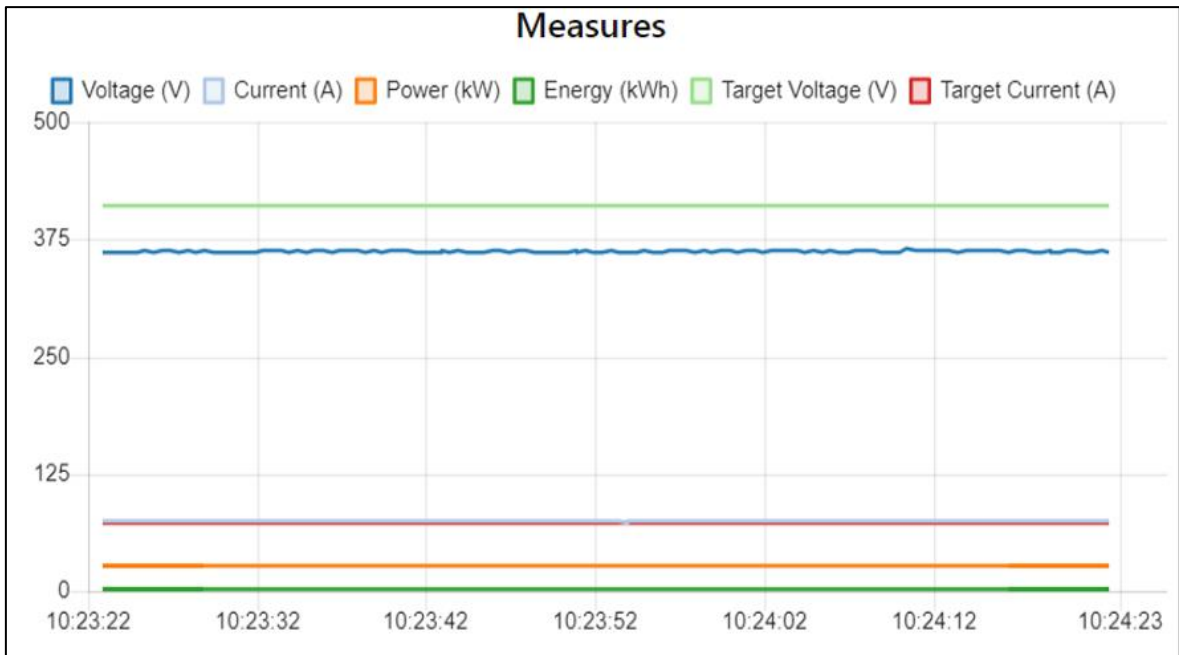


Fig. 42 - Medidas durante o ensaio de carga do carregador de 45 kW no Modo Bateria

A Fig. 43 mostra o resultado da simulação da curva de carga do Nissan Leaf com o carregador de 45 kW, tendo sido considerado um SoC inicial de 2% e um SoC final de 50%.

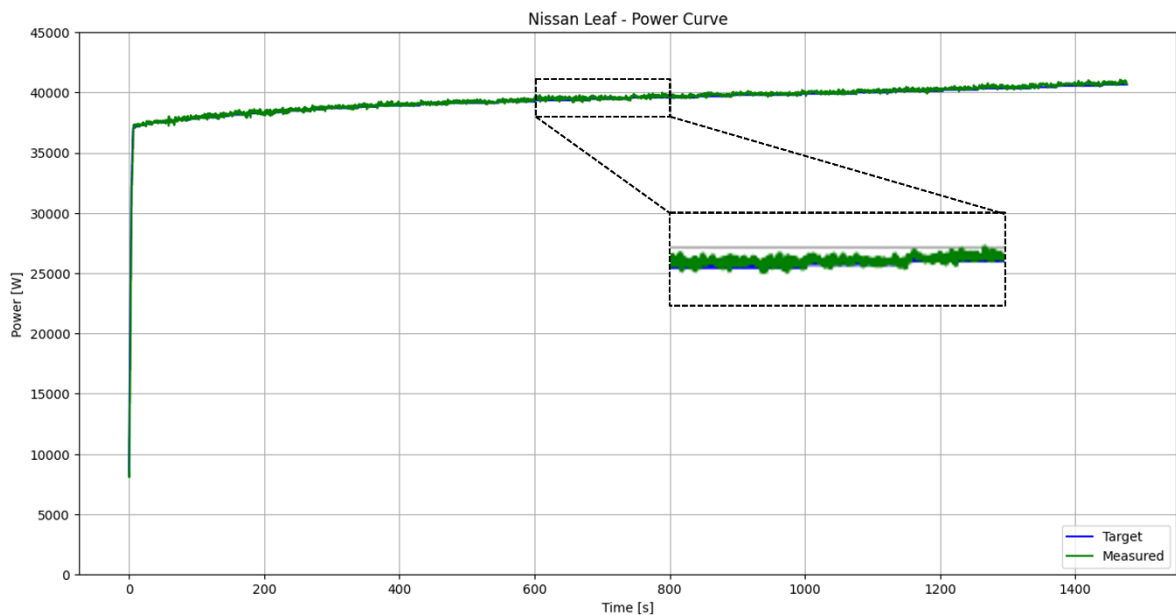


Fig. 43 - Simulação da curva de carga do Nissan Leaf entre os 2% e 50% de SoC

Observando a Fig. 43, pode-se verificar que não houve qualquer desvio entre a curva de carga medida (linha verde) e o *target* (linha azul-escura). Além disso, é notória a subida da potência debitada pelo carregador, atingindo um valor máximo de 41 kW. O simulador

demorou cerca de 25 minutos a atingir os 50% de SoC. Analisando o *log* da simulação, é possível concluir que foram consumidos 16,31 kWh de energia.

A Fig. 44 mostra os valores de tensão e corrente durante a simulação da curva de carga do Nissan Leaf com o carregador de 45 kW entre os 2% e os 50% de SoC.

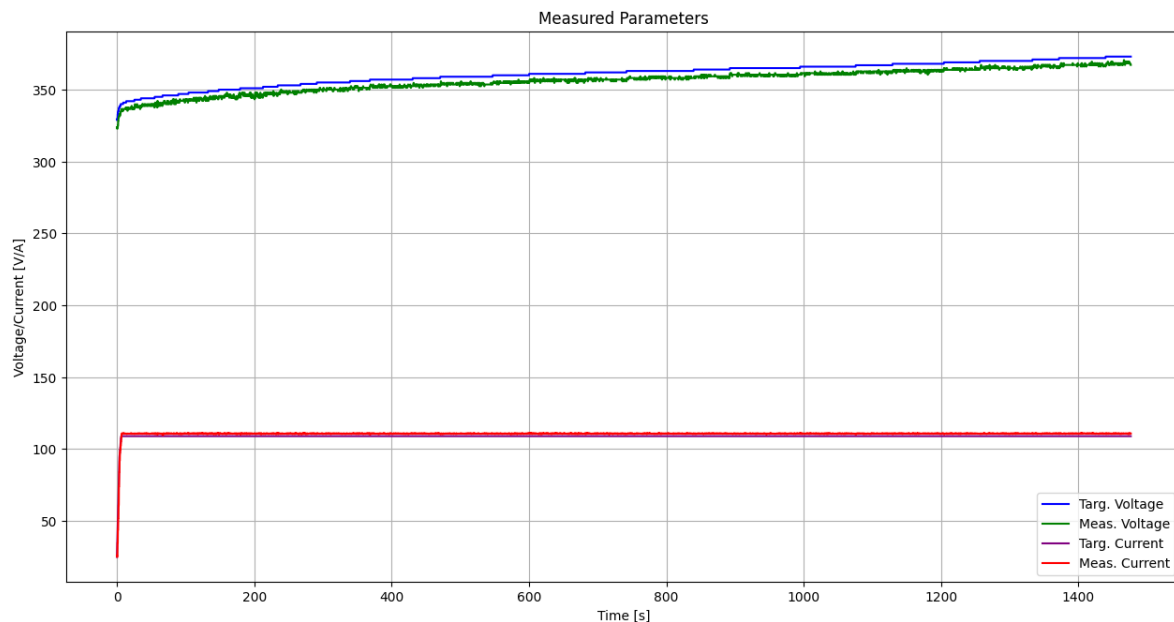


Fig. 44 - Valores de tensão e corrente durante a simulação da curva de carga do Nissan Leaf entre os 2% e 50% de SoC

Observando a Fig. 44, pode-se verificar que a medida da corrente (linha vermelha) coincide com o *target* (linha roxa). Em relação à medida da tensão, existe uma diferença inferior a 8 V entre o *target* (linha azul-escura) e a própria medição (linha verde), que se mantém constante durante todo o carregamento. Além disso, a medida da tensão apresenta algum ruído (visível através de pequenas oscilações). Durante a simulação, a tensão variou entre os 323 V e os 371 V, enquanto que a corrente se manteve a 110 A após a subida inicial.

A Fig. 45 apresenta um exemplo real de uma curva de carga de um Nissan Leaf e servirá como referência para a simulação seguinte. De notar que, mesmo para modelos iguais de VEs, a curva de carga pode diferir devido a fatores como a temperatura da bateria, o seu estado e o estilo de condução do utilizador.

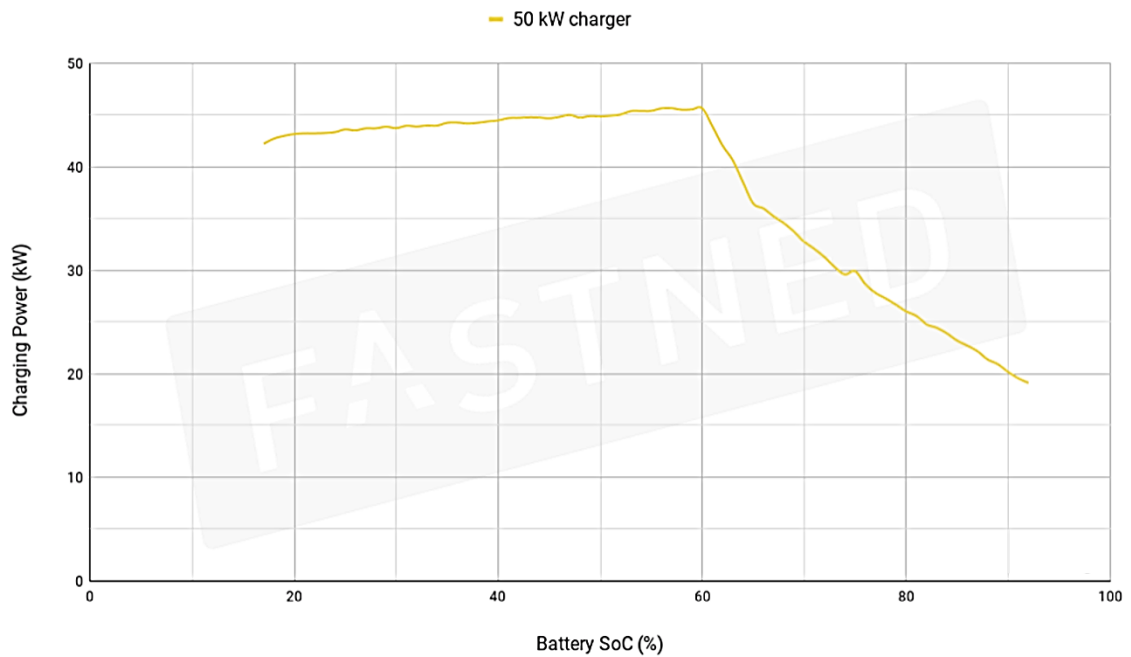


Fig. 45 - Exemplo de curva de carga do Nissan Leaf em função do SoC (nível da bateria em termos percentuais relativamente à sua capacidade máxima), de acordo com o fabricante [9]

A Fig. 46 mostra o resultado da simulação da curva de carga do Nissan Leaf com o carregador de 45 kW. Desta vez, foi considerado um SoC inicial de 2% e um SoC final de 90%.

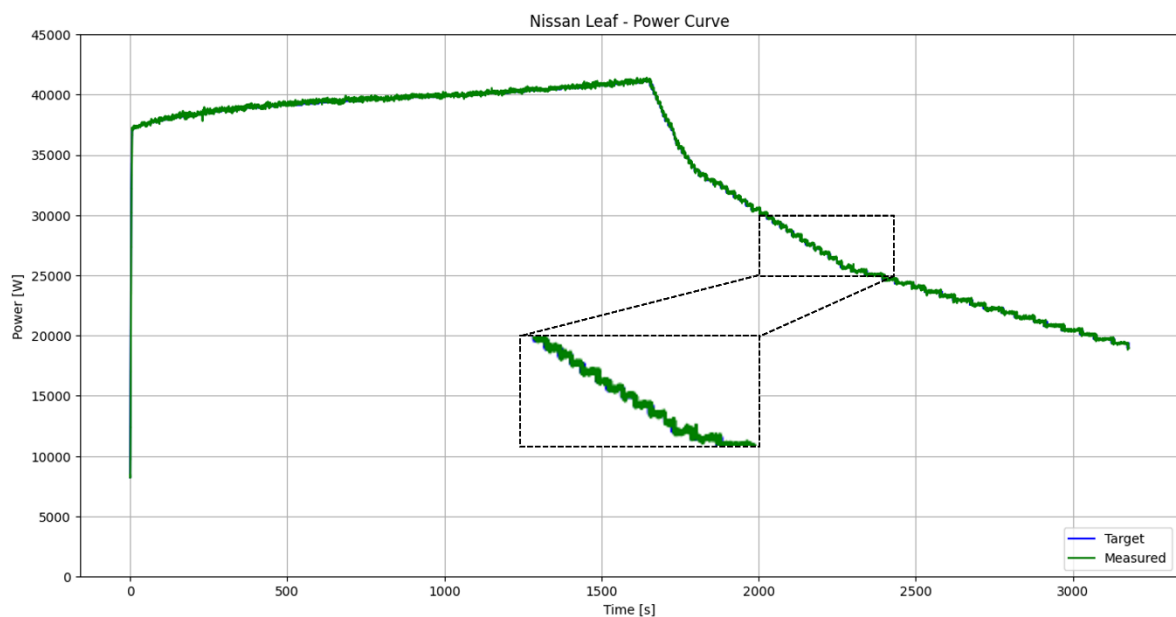


Fig. 46 - Simulação da curva de carga do Nissan Leaf entre os 2% e 90% de SoC

Observando a Fig. 46, pode-se verificar, mais uma vez, que não houve qualquer desvio entre a curva de carga medida (linha verde) e o *target* (linha azul-escuro). O carregador atingiu um pico de potência de 41,4 kW aos 56% de SoC e, a partir deste ponto, o seu valor começou a diminuir. O simulador demorou cerca de 28 minutos a atingir os 56% de SoC e cerca de 54 minutos a atingir os 90% de SoC. Analisando o *log* da simulação, é possível concluir que foram consumidos 29,48 kWh de energia.

A Fig. 47 mostra os valores de tensão e corrente durante a simulação da curva de carga do Nissan Leaf com o carregador de 45 kW entre os 2% e os 90% de SoC.

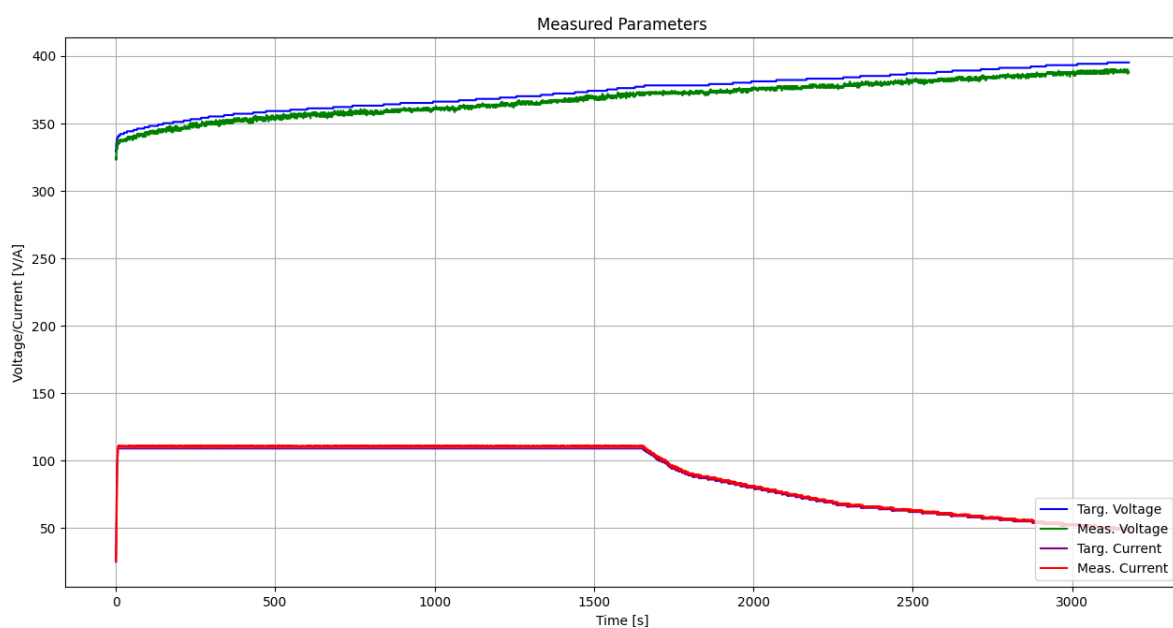


Fig. 47 - Valores de tensão e corrente durante a simulação da curva de carga do Nissan Leaf entre os 2% e 90% de SoC

Observando a Fig. 47, pode-se verificar que a medida da corrente (linha vermelha) coincide com o *target* (linha roxa) em todos os momentos do carregamento. Em relação à medida da tensão (linha verde), o resultado assemelha-se ao da simulação anterior, mantendo-se o desvio de 8 V relativamente ao *target* (linha azul-escuro). A tensão variou entre os 323 V e os 390 V, enquanto que a corrente se manteve a 110 A até aos 56% de SoC. A partir deste ponto, o seu valor começou a diminuir até atingir 50 A aos 90% de SoC.

A Fig. 48 mostra o resultado da simulação da curva do Nissan Leaf, estando o carregador de 45 kW limitado a uma potência de 20 kW. Para tal, foi considerado um SoC inicial de 50% e um SoC final de 90%.

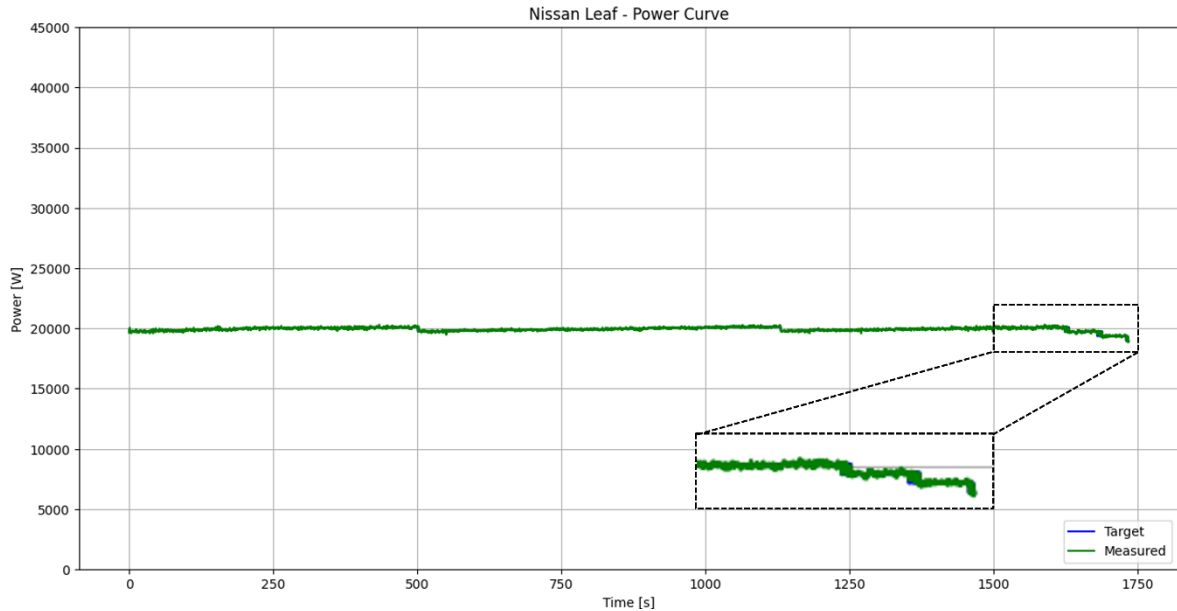


Fig. 48 - Simulação da curva de carga do Nissan Leaf entre os 50% e 90% de SoC com a potência do carregador limitada a 20 kW

Observando a Fig. 48, pode-se verificar que não houve qualquer discrepância entre a curva de carga medida (linha verde) e o *target* (linha azul-escura). O carregador manteve a potência máxima até aos 88% de SoC, altura em que a curva de carga original baixou da marca dos 20 kW.

A Fig. 49 mostra os valores de tensão e corrente durante a simulação da curva de carga do Nissan Leaf com o carregador de 45 kW entre os 50% e os 90% de SoC, estando este limitado a uma potência de 20 kW.

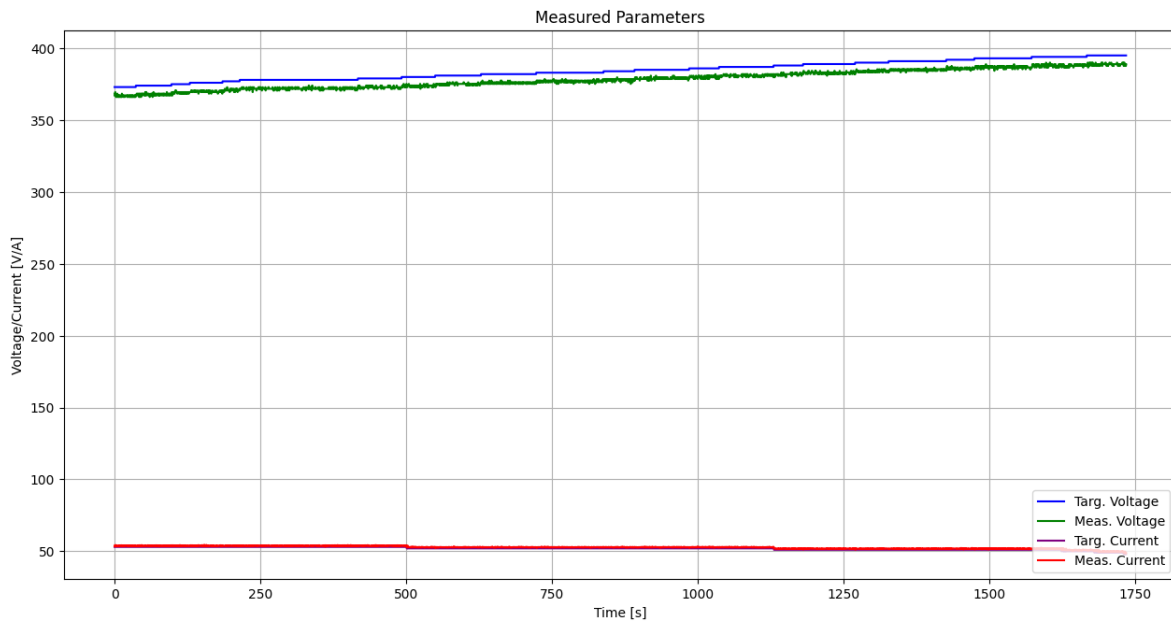


Fig. 49 - Valores de tensão e corrente durante a simulação da curva de carga do Nissan Leaf entre os 50% e 90% de SoC com a potência do carregador limitada a 20 kW

Observando a Fig. 49, pode-se verificar que a precisão das medidas segue o padrão dos resultados obtidos anteriormente. Neste caso, o carregador limitou a corrente em função da tensão do simulador, nunca ultrapassando a fronteira dos 20 kW. À medida que a tensão aumenta, a corrente reduz ligeiramente, para que seja mantida a potência máxima disponibilizada pelo carregador.

A Fig. 50 mostra o resultado da simulação da curva do Nissan Leaf com o carregador de 120 kW. Neste ensaio, foi considerada a comutação dinâmica da potência máxima disponibilizada pelo carregador.

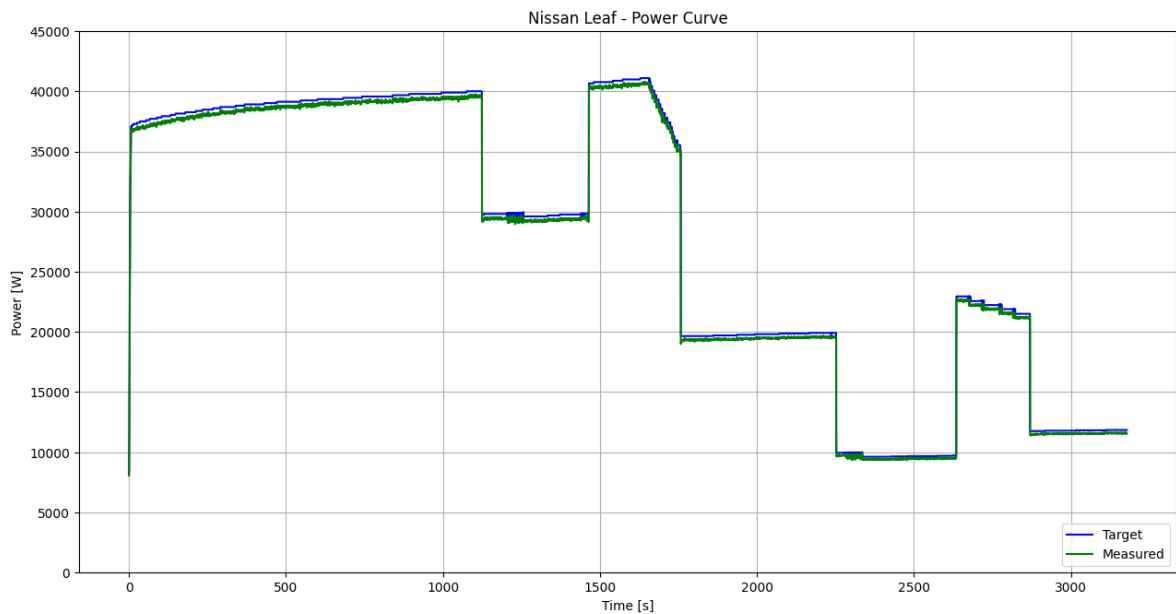


Fig. 50 - Simulação da curva de carga do Nissan Leaf entre os 2% e 90% de SoC com comutação dinâmica de potência

Observando a Fig. 50, pode-se verificar que o simulador seguiu durante toda a carga os diferentes limites de potência impostos pelo carregador. Entre os 38% e 50% de SoC, o carregador encontrava-se limitado a 30 kW. Entre os 60% e 73%, este limite reduziu para 20 kW. Entre os 73% e 81%, o limite baixou ainda mais para 10 kW. Finalmente, dos 85% até ao final da carga, o carregador impôs uma potência máxima de 12 kW.

A Fig. 51 mostra os valores de tensão e corrente durante a simulação da curva de carga do Nissan Leaf com o carregador de 120 kW, tendo em consideração os diferentes limites de potência impostos pelo carregador.

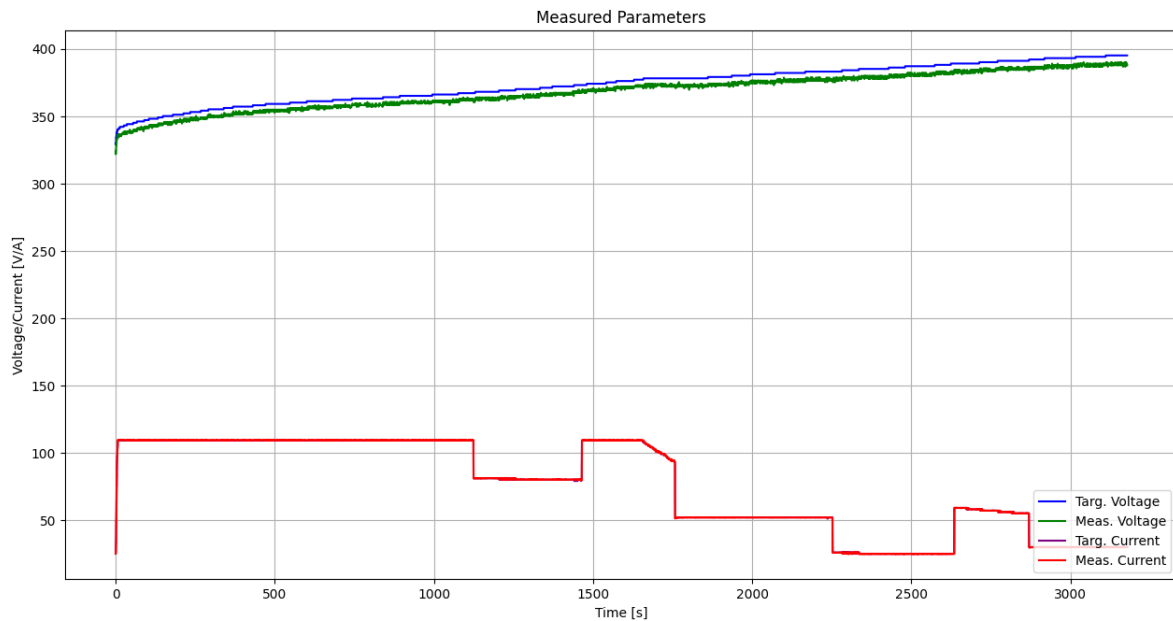


Fig. 51 - Valores de tensão e corrente durante a simulação da curva de carga do Nissan Leaf entre os 2% e 90% de SoC com comutação dinâmica de potência

Observando a Fig. 51, pode-se verificar que o carregador limita a corrente de saída em função da tensão do simulador, nunca ultrapassando o limite de potência estabelecido.

5.2.2 ENSAIOS DE ESFORÇO

De seguida, foram realizados os ensaios de esforço.

A Fig. 52 mostra os resultados obtidos durante o ensaio de esforço do carregador de 120 kW. Neste ensaio, foi considerada uma tensão de 350 V e a corrente máxima suportada pelo protocolo CHAdeMO, ou seja, 125 A. O ensaio teve uma duração superior a 1 hora, não tendo havido qualquer sobreaquecimento, disrupção elétrica nem quebra do isolamento. Isto permitiu concluir que o simulador implementado se encontra conforme com as normas harmonizadas.

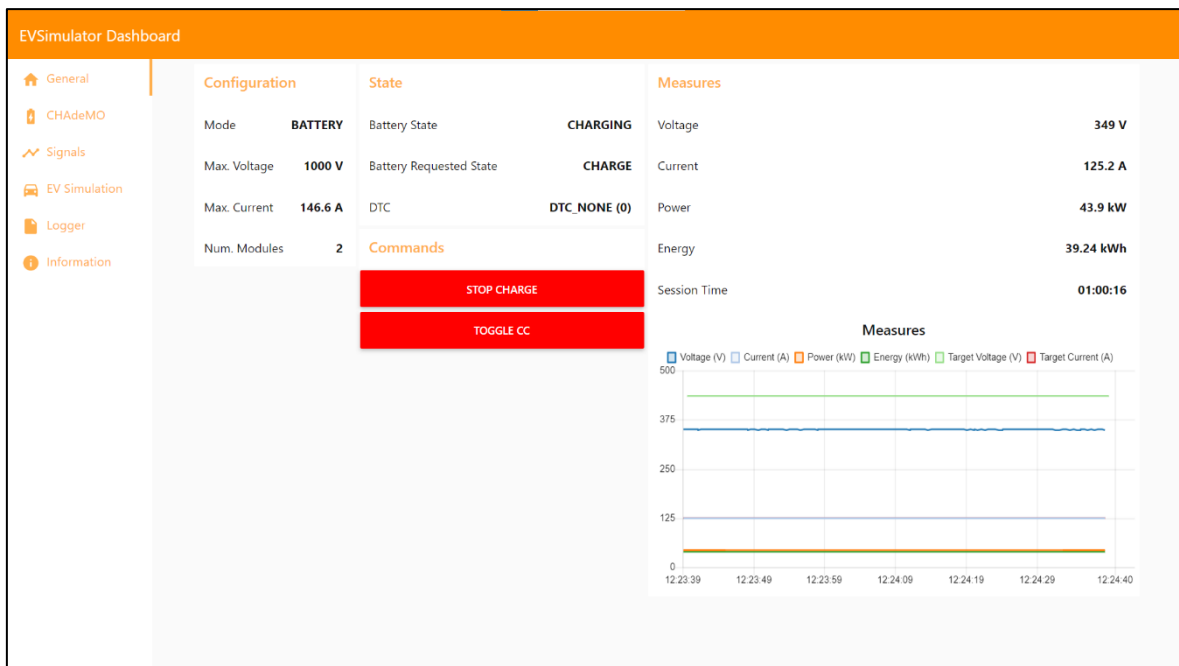


Fig. 52 - Resultados do ensaio de esforço do carregador de 120 kW

Observando a Fig. 52, pode-se verificar que a medida da corrente corresponde a 125 A. O valor da potência de ensaio foi de, aproximadamente, 44 kW, o que equivale a 88% da potência máxima que o carregador de 120 kW consegue debitar com CHAdeMO e 70% da potência máxima estipulada pelo protocolo. Analisando a Fig. 53, verifica-se que a tensão (linha azul-escuro) e a corrente (linha azul-clara) medidas mantêm-se constantes ao longo do carregamento.

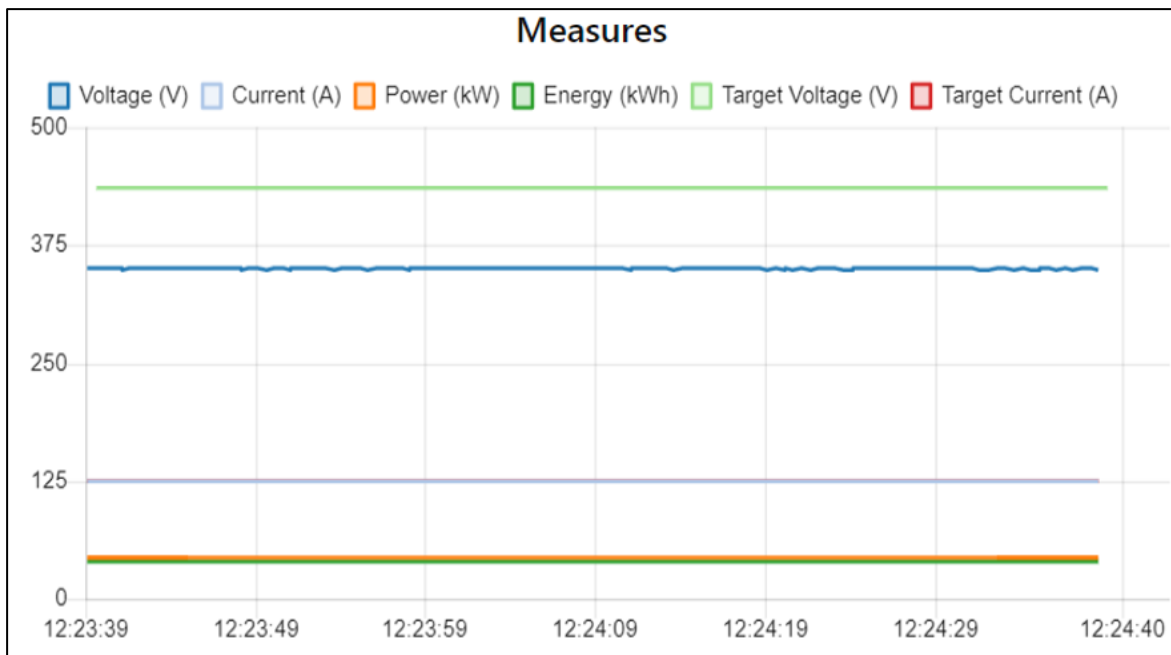


Fig. 53 - Medidas durante o ensaio de esforço do carregador de 120 kW

5.2.3 ENSAIOS DE FALHA

Por último, foram efetuados os ensaios de falha.

A Fig. 54 mostra os resultados obtidos após a falha de comunicação CAN entre a Placa Principal de Controlo do simulador e os conversores.

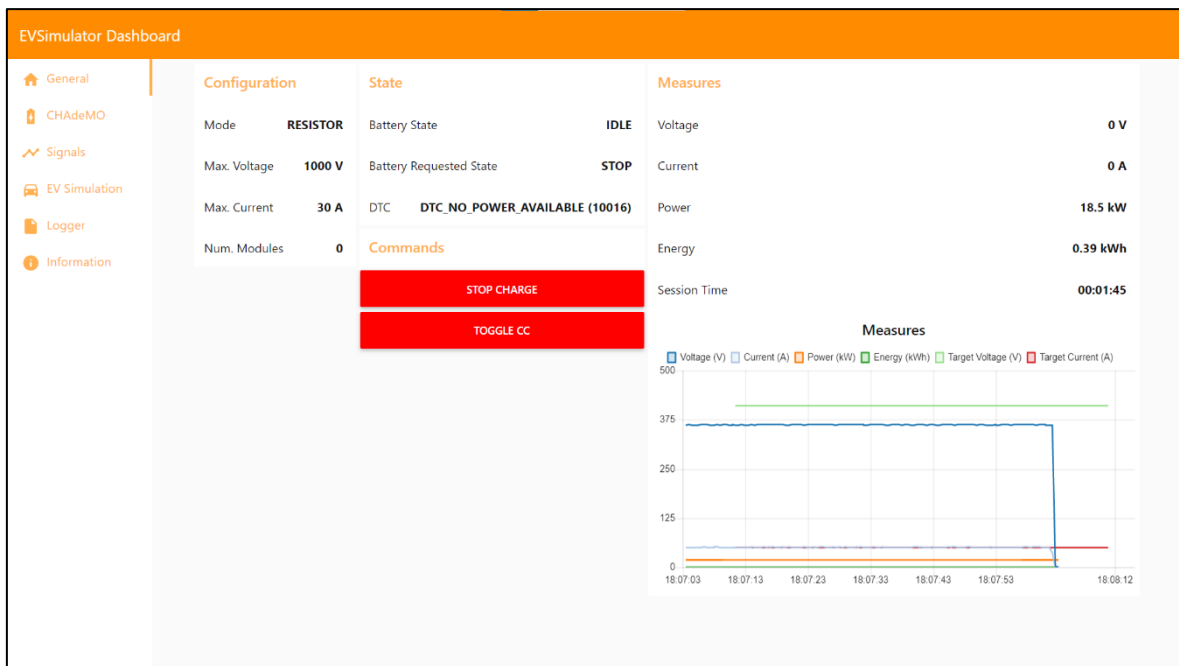


Fig. 54 - Resultados do ensaio de falha de comunicação entre a Placa Principal de Controlo do simulador e os conversores

Observando a Fig. 54, pode-se verificar que os valores da tensão e da corrente são colocados a zero quando é detetada a falha de comunicação CAN entre a Placa Principal de Controlo do simulador e os conversores, gerando o DTC_NO_POWER_AVAILABLE (10016).

A Fig. 55 mostra os resultados obtidos após a falha de comunicação CAN entre o carregador e o simulador.

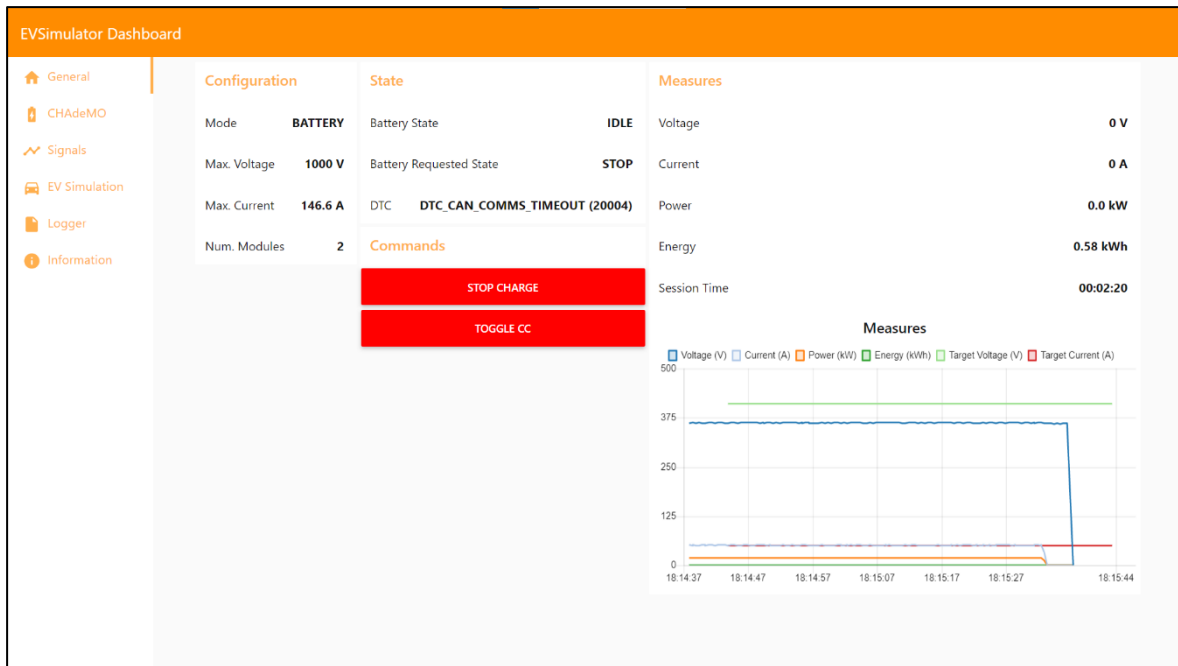


Fig. 55 - Resultados do ensaio de falha de comunicação CAN entre o carregador e o simulador

Observando a Fig. 55, pode-se verificar que, à semelhança do ensaio anterior, os valores da tensão e da corrente são colocados a zero quando é detetada a falha de comunicação CAN entre o carregador e o simulador, gerando o DTC_CAN_COMMS_TIMEOUT (20004).

A Fig. 56 mostra os resultados obtidos após uma paragem de emergência por parte do carregador. Neste ensaio, foi aberta a porta frontal a meio do carregamento.

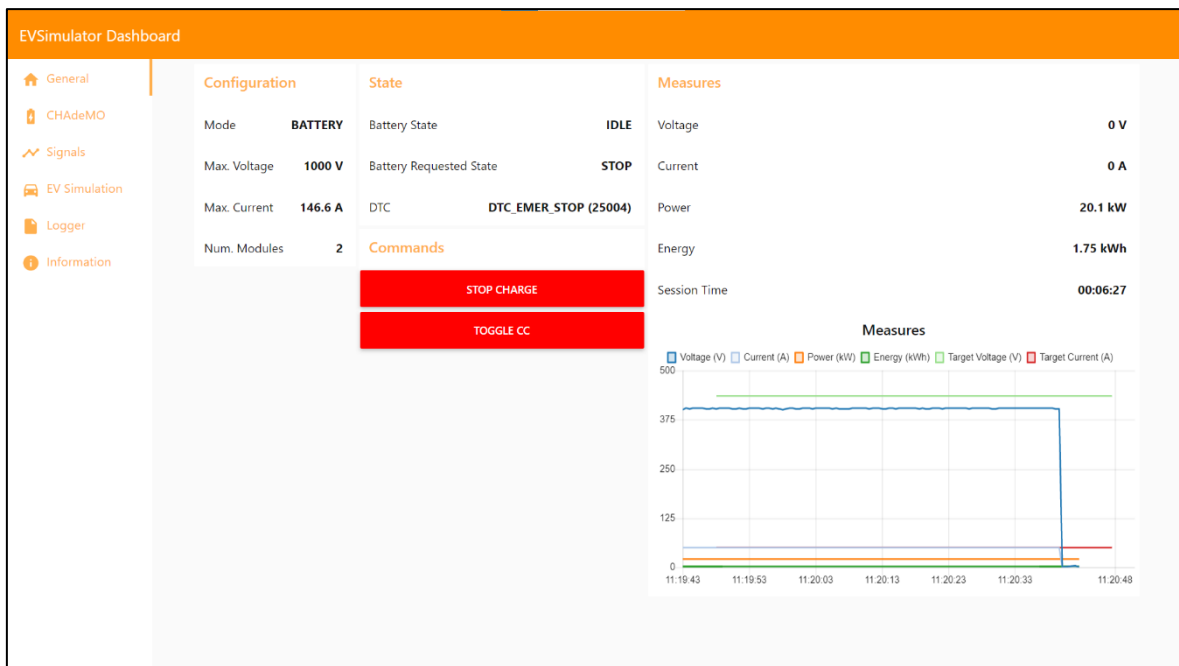


Fig. 56 - Resultados do ensaio de falha por paragem de emergência

Observando a Fig. 56, pode-se verificar que os valores da tensão e da corrente são instantaneamente colocados a zero quando é acionada uma paragem de emergência por parte do carregador, gerando o DTC_EMER_STOP (25004). Neste caso, o carregador força a abertura dos contactores de saída o mais rápido possível.

A Fig. 57 mostra a sinalização da paragem de emergência. Em primeiro lugar, o carregador ativa o “d2” e, passado 1 segundo, ativa o “d1”. Desta forma, o simulador toma conhecimento que a carga foi abortada devido a uma paragem de emergência do carregador.

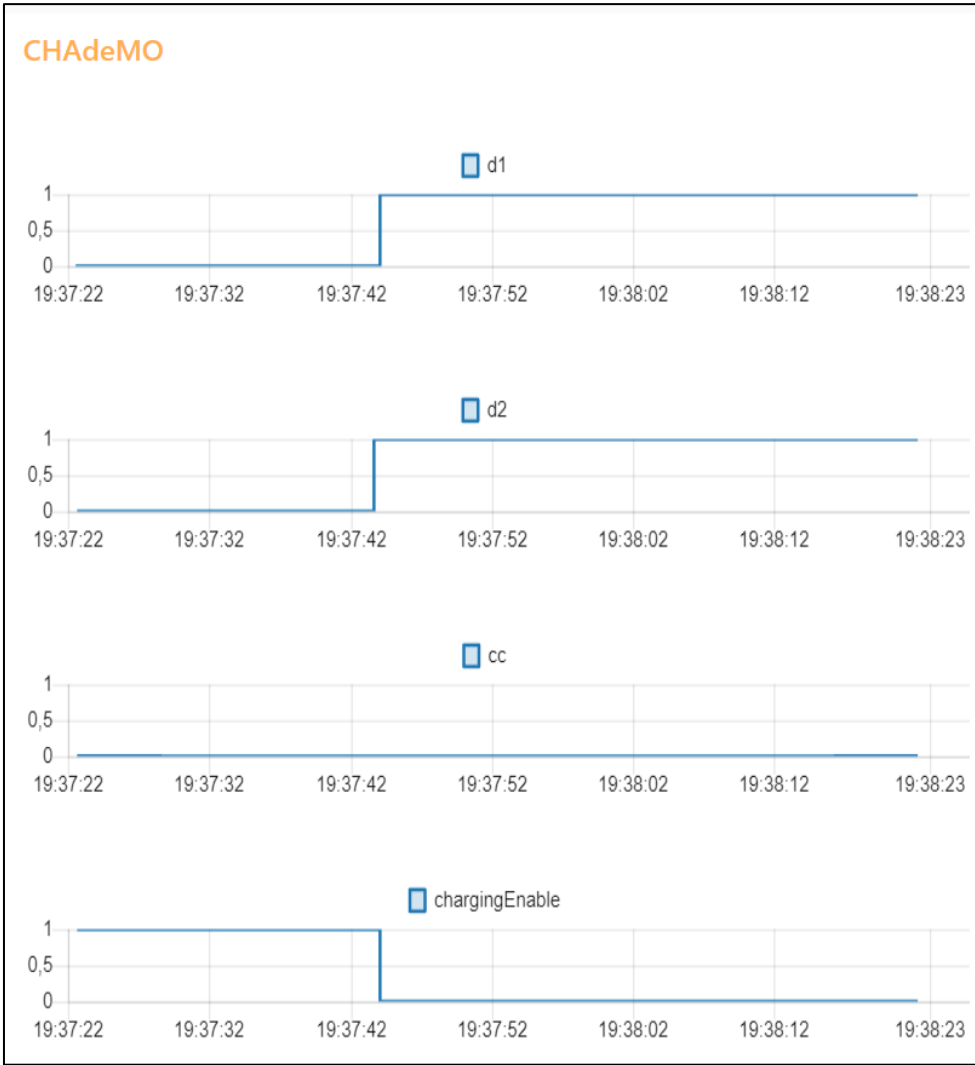


Fig. 57 - Estado dos sinais analógicos do protocolo CHAdeMO após paragem de emergência do carregador

6. CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um simulador de bateria e controlador de carga de um Veículo Elétrico (VE), de modo a permitir o teste laboratorial mais preciso de carregadores de VEs.

Inicialmente, foram identificados os requisitos do sistema e desenhada a respetiva arquitetura. Seguiu-se o estudo do projeto elétrico e dos protocolos de carregamento CHAdeMO e Combined Charging System (CCS). Finalizado o estudo, foi implementado o *hardware* e desenvolvido o *firmware* e o *software* relativo ao simulador. Por último, procedeu-se à validação do sistema e teste de diferentes cenários de carga.

Os ensaios dos carregadores comerciais de 45 kW e 120 kW comprovaram a precisão e rápida resposta do simulador. O sistema revelou-se flexível, adaptando-se aos diferentes níveis de potência impostos pelos carregadores. O simulador apresentou robustez,

suportando carregamentos a 44 kW por longos períodos. Além disso, a detecção de falhas permitiu compreender os pontos mais frágeis dos carregadores.

Em termos funcionais, foi desenvolvida uma interface gráfica amigável, possibilitando a qualquer utilizador explorar várias condições de operação e casos de teste como, por exemplo, a simulação de perfis de carga. Além disso, encontra-se disponível toda a informação acerca do estado atual do simulador.

O sistema, além de funcional, apresenta inúmeras vantagens face à solução previamente utilizada pela empresa (simulador portátil). Enquanto a solução anterior permitia uma corrente máxima de apenas 10 A, o simulador implementado permite uma corrente máxima de 146,6 A, igualando os valores de corrente solicitados pelos VEs. Além disso, o simulador possui uma interface gráfica para controlar todas as variáveis associadas ao carregamento. Ao contrário das cargas resistivas, os conversores de potência CA/CC bidirecionais permitem não só a simulação do comportamento de uma bateria de um VE, mas também a regeneração da energia consumida pelo carregador na rede elétrica. Outra vantagem é a caracterização mais precisa da comunicação com o carregador, permitindo a identificação de falhas tanto a nível de *hardware* como de *firmware*, algo que não era possível através da solução utilizada anteriormente. A futura implementação do carregamento simultâneo CHAdeMO e CCS também é uma melhoria face à solução anterior, visto que esta apenas permite utilizar apenas uma tomada por carregamento. Escalando a solução implementada, torna-se indubitável a redução do custo do consumo energético da empresa durante os ensaios de carga dos carregadores.

Em suma, o trabalho realizado cumpriu com os objetivos propostos, tendo sido um importante contributo para o aumento da produtividade da empresa, o que vai de encontro à qualidade exigida pelos clientes da Efacec. A valorização dada ao simulador, demonstra que este é um produto que, futuramente, poderá vir a ser comercializado. É de referir que existe o interesse em registar a patente do simulador e controlador de carga da bateria de um veículo elétrico, dado apresentar características mais evoluídas relativamente aos equipamentos oferecidos atualmente pelo mercado.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como a solução implementada se encontra em constante desenvolvimento, são várias as sugestões para trabalhos futuros, focando-se nos seguintes pontos:

- Implementação do protocolo de carregamento CCS, sendo este o mais comum no mercado europeu;
- Automatização de testes em ambiente de desenvolvimento;
- Implementação do protocolo CHAdeMO V2G;
- Implementação do carregamento simultâneo CHAdeMO e CCS;
- Adição de medidores de energia à entrada e à saída do circuito;
- Além do valor de temperatura interna dos conversores de potência, usar sensores de temperatura externos;
- Adição de novos perfis de carga;
- Implementação de ensaios normativos de segurança.

Referências Documentais

- [1] G. Ala *et al.*, "Electric Mobility in Portugal: Current Situation and Forecasts for Fuel Cell Vehicles," *Energies*, vol. 14, no. 23, 2021, doi: 10.3390/en14237945.
- [2] J. Van Mierlo *et al.*, "Beyond the State of the Art of Electric Vehicles: A Fact-Based Paper of the Current and Prospective Electric Vehicle Technologies," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 12, no. 1, 2021, doi: 10.3390/wevj12010020.
- [3] S. Sachan, S. Deb, and S. N. Singh, "Different charging infrastructures along with smart charging strategies for electric vehicles," *Sustainable Cities and Society*, vol. 60, 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102238.
- [4] Site da Efacec. "Quem Somos." <https://www.efacec.pt/quem-somos/> (consultado em 6 de setembro, 2022).
- [5] Site da BloombergNEF. "Electric Vehicle Outlook 2022." <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/> (consultado em 11 de maio, 2022).
- [6] D. B. Richardson, "Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, Impacts, and renewable energy integration," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 247-254, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.11.042.
- [7] A. Albatayneh, M. N. Assaf, D. Alterman, and M. Jaradat, "Comparison of the Overall Energy Efficiency for Internal Combustion Engine Vehicles and Electric Vehicles," *Environmental and Climate Technologies*, vol. 24, no. 1, pp. 669-680, 2020, doi: 10.2478/rtuect-2020-0041.
- [8] P. Marmé. "Conheça os municípios onde o estacionamento dos elétricos é grátis." <https://welectric.pt/2018/08/04/estacionamento-eletricos-gratuito-municipios/> (consultado em 6 de setembro, 2022).
- [9] E. V. Database. "Nissan Leaf." <https://ev-database.org/car/1656/Nissan-Leaf> (consultado em 11 de maio, 2022).

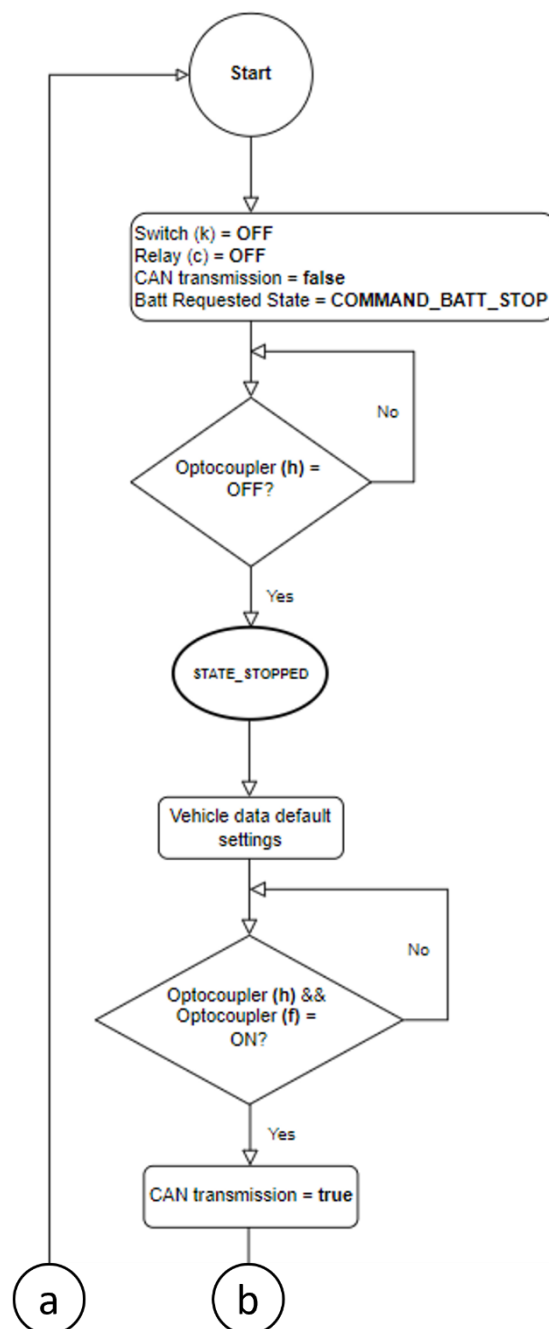
- [10] E. V. Database. "Tesla Model S Plaid." <https://ev-database.org/car/1405/Tesla-Model-S-Plaid> (consultado em 11 de maio, 2022).
- [11] Site da Tesla. "Supercharger." https://www.tesla.com/pt_PT/supercharger (consultado em 11 de maio, 2022).
- [12] F. M. Electric. "Tesla Battery Replacement Cost Explained." <https://www.findmyelectric.com/blog/tesla-battery-replacement-cost-explained/> (consultado em 11 de maio, 2022).
- [13] D. Berjoza and I. Jurgena, "Effects of change in the weight of electric vehicles on their performance characteristics," *Agronomy Research*, vol. 15, no. Special Issue, pp. 952-963, 2017. [Online]. Available: https://agronomy.emu.ee/wp-content/uploads/2017/04/Vol15SP1_Berjoza.pdf.
- [14] J. A. Sanguesa, V. Torres-Sanz, P. Garrido, F. J. Martinez, and J. M. Marquez-Barja, "A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges," *Smart Cities*, vol. 4, no. 1, pp. 372-404, 2021, doi: 10.3390/smartcities4010022.
- [15] E. V. Database. "Nissan Leaf e+." <https://ev-database.org/car/1657/Nissan-Leaf-eplus> (consultado em 11 de maio, 2022).
- [16] M. Motors. "2022 Outlander PHEV Specs." <https://www.mitsubishicars.com/cars-and-suvs/outlander-phev/specs> (consultado em 11 de maio, 2022).
- [17] D. Duquet. "2014 Toyota Prius PHV: To plug in or not to plug in?" <https://www.guideautoweb.com/en/articles/21152/2014-toyota-prius-phv-to-plug-in-or-not-to-plug-in/> (consultado em 11 de maio, 2022).
- [18] Site da Hyundai. "All-New Hyundai NEXO – Driving performance." <https://www.hyundai.news/eu/models/electrified/nexo/press-kit/all-new-hyundai-nexo-driving-performance.html> (consultado em 11 de maio, 2022).
- [19] Site da UltimateSPECS. "BMW i3 Ficha Técnica." <https://www.ultimatespecs.com/pt/car-specs/BMW/M10167/i3> (consultado em 6 de setembro, 2022).
- [20] A. F. D. Center. "How Do All-Electric Cars Work?" <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work> (consultado em 11 de maio, 2022).
- [21] F. Un-Noor, S. Padmanaban, L. Mihet-Popa, M. Mollah, and E. Hossain, "A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development," *Energies*, vol. 10, no. 8, 2017, doi: 10.3390/en10081217.
- [22] EV Specifications. "2020 KIA Soul EV 64 kWh - Specifications and price." <https://www.evspecifications.com/en/model/e94fa0> (consultado em 14 de maio, 2022).

- [23] H. Wu, "A Survey of Battery Swapping Stations for Electric Vehicles: Operation Modes and Decision Scenarios," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 8, pp. 10163-10185, 2022, doi: 10.1109/tits.2021.3125861.
- [24] C. Honsberg and S. Bowden. "Lead Acid Batteries." <https://www.pveducation.org/pvcdrom/batteries/lead-acid-batteries> (consultado em 14 de maio, 2022).
- [25] X. Chen, W. Shen, T. T. Vo, Z. Cao, and A. Kapoor, "An overview of lithium-ion batteries for electric vehicles," *2012 10th International Power & Energy Conference (IPEC)*, 2012, doi: 10.1109/ASSCC.2012.6523269.
- [26] *SAE Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler*, S. International, 2017. [Online]. Available: https://www.sae.org/standards/content/j1772_201710/
- [27] *Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 1: General requirements*, I. E. Commission, 2014. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/6582>
- [28] Mliu92. "CHAdeMO connector (viewed facing the plug that interfaces with the vehicle)." https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CHAdeMO_connector.svg (consultado em 26 de junho, 2022).
- [29] Site da CHAdeMO. "Protocol Development." <https://www.chademo.com/technology/protocol-development> (consultado em 26 de junho, 2022).
- [30] Mliu92. "Drawing of J1772 (CCS1 Combo) connector, with labeled pinouts. This is a view facing the end of the plug." [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:J1772_\(CCS1\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:J1772_(CCS1).svg) (consultado em 26 de junho, 2022).
- [31] Mliu92. "Male plug for CCS Combo 2, based on IEC 62196-2 Type 2 extended with high voltage DC connectors." [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IEC_62196_Type_2_\(M,_DC,_CCS_Combo_2\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IEC_62196_Type_2_(M,_DC,_CCS_Combo_2).svg) (consultado em 26 de junho, 2022).
- [32] Site da CharIN. "CCS charging points around the world." <https://www.charin.global/technology/dashboard/> (consultado em 26 de junho, 2022).
- [33] S. Schneider. "Combined Charging System 1.0 Specification - CCS 1.0." https://tesla.o.auroraobjects.eu/Combined_Charging_System_1_0_Specification_V1_2_1.pdf (consultado em 7 de junho, 2022).
- [34] Site da Comemso. "Take a closer look and find out even more about our company." <https://www.comemso.com/company> (consultado em 26 de junho, 2022).

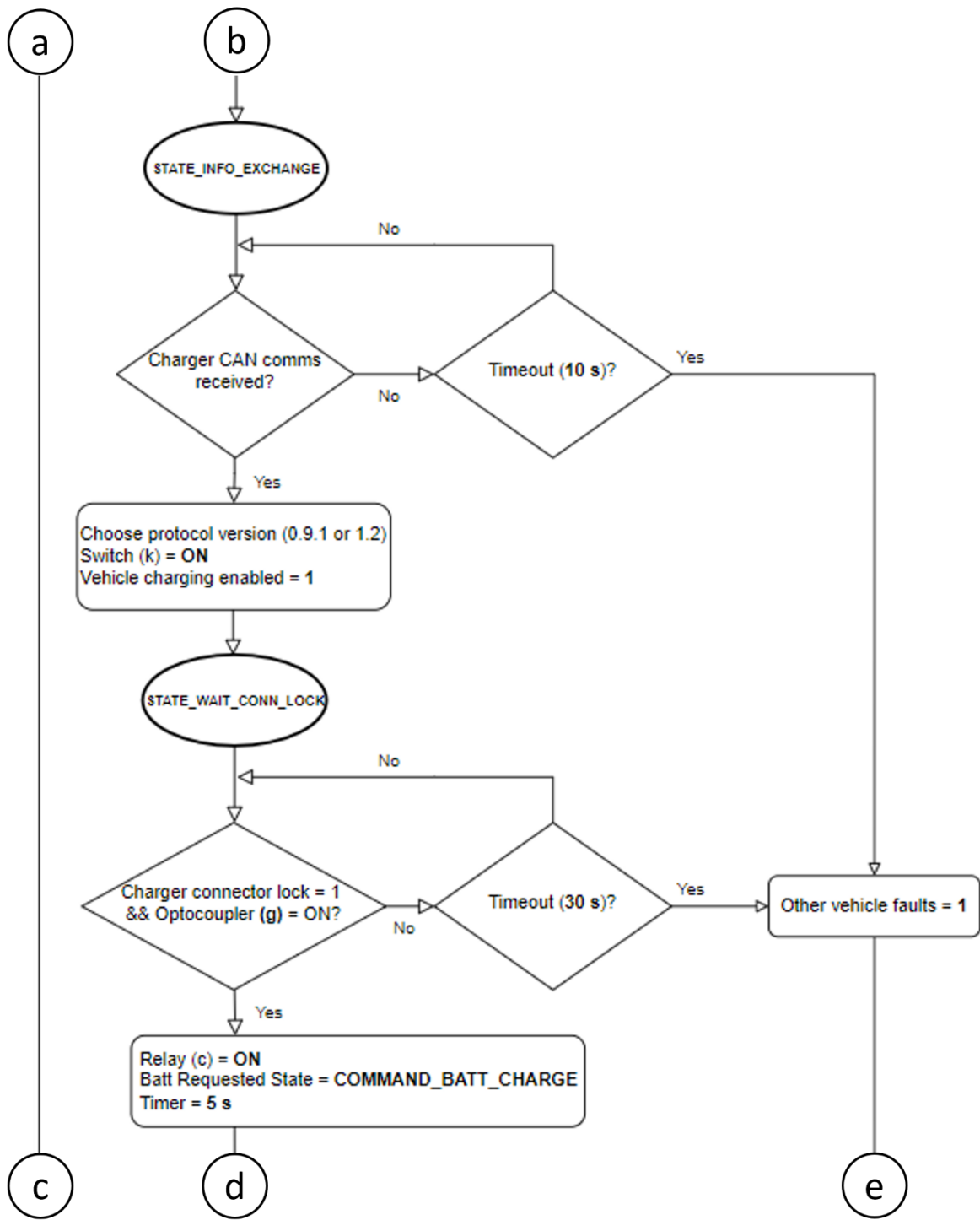
- [35] Site da Comemso. "EVCA CHAdeMO." <https://www.comemso.com/charging-analysis> (consultado em 26 de junho, 2022).
- [36] Site da CHAdeMO. "Model name: CHAdeMO-Analyzer / Simulator." <https://www.chademo.com/products/other/comemso> (consultado em 26 de junho, 2022).
- [37] Site da Comemso. "EV Charging Analyzer / Simulator (AC/DC-CCS)." <https://www.comemso.com/charging-analysis-test-evca-ac-dc-ccs-details> (consultado em 26 de junho, 2022).
- [38] Site da Comemso. "EVCA AC + DC-CCS." <https://www.comemso.com/charging-analysis> (consultado em 26 de junho, 2022).
- [39] Site da Comemso. "Simplify your EVSE tests / charger tests at EVSE maintenance and service in the field or at EVSE end-of-line test." <https://www.comemso.com/mini-charger-tester> (consultado em 26 de junho, 2022).
- [40] Site da Comemso. "Combined Mini-Charger-Tester for field." <https://www.comemso.com/mini-charger-tester> (consultado em 26 de junho, 2022).
- [41] Site da Radxa. "Rock Pi S." <https://rockpi.org/> (consultado em 1 de setembro, 2022).
- [42] D. S. S.A. "SolidWorks." <https://www.solidworks.com/> (consultado em 7 de agosto, 2022).
- [43] MQTT. "MQTT." <https://mqtt.org/> (consultado em 1 de setembro, 2022).
- [44] E. Foundation. "Eclipse Mosquitto." <https://mosquitto.org/> (consultado em 1 de setembro, 2022).
- [45] T. Nordquist. "MQTT Explorer." <http://mqtt-explorer.com/> (consultado em 1 de setembro, 2022).
- [46] Site da Efacec. "QC45 Quick Charging Station." <https://electricmobility.efacec.com/ev-qc45-quick-charger/> (consultado em 13 de outubro, 2022).
- [47] Site da Efacec. "Meet the new generation of Quick Chargers QC 60/90/120." <https://electricmobility.efacec.com/quick-charging-stations-60-90-120-kw/> (consultado em 13 de outubro, 2022).

Anexo A. Máquina de estados detalhada do protocolo CHAdEMO (simulador)

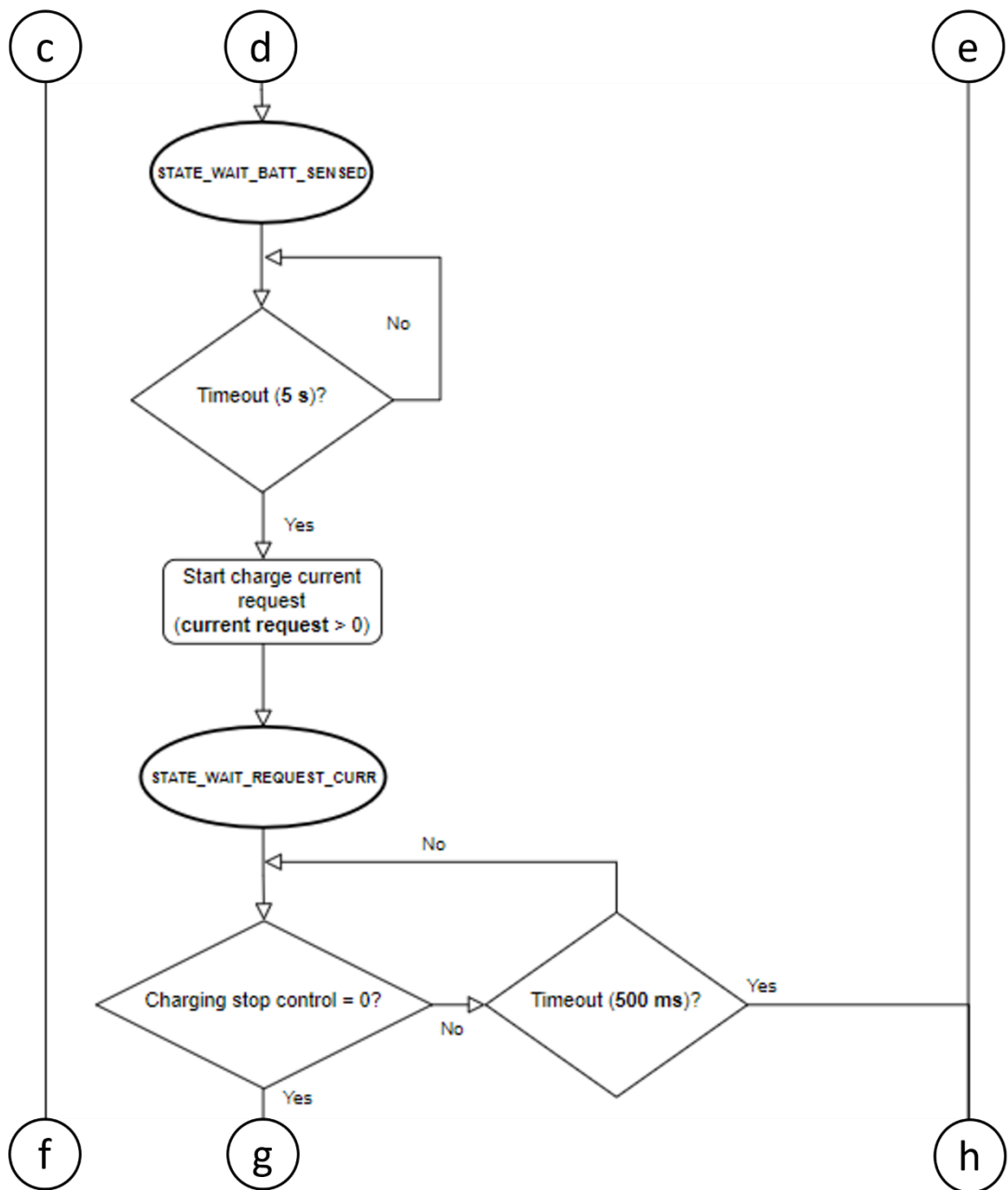
Neste anexo são apresentadas todas as ações, condições e respectivas transições da máquina de estados relativa ao protocolo CHAdEMO, do ponto de vista do simulador. A Fig. 58 apresenta, detalhadamente, a máquina de estados mencionada.



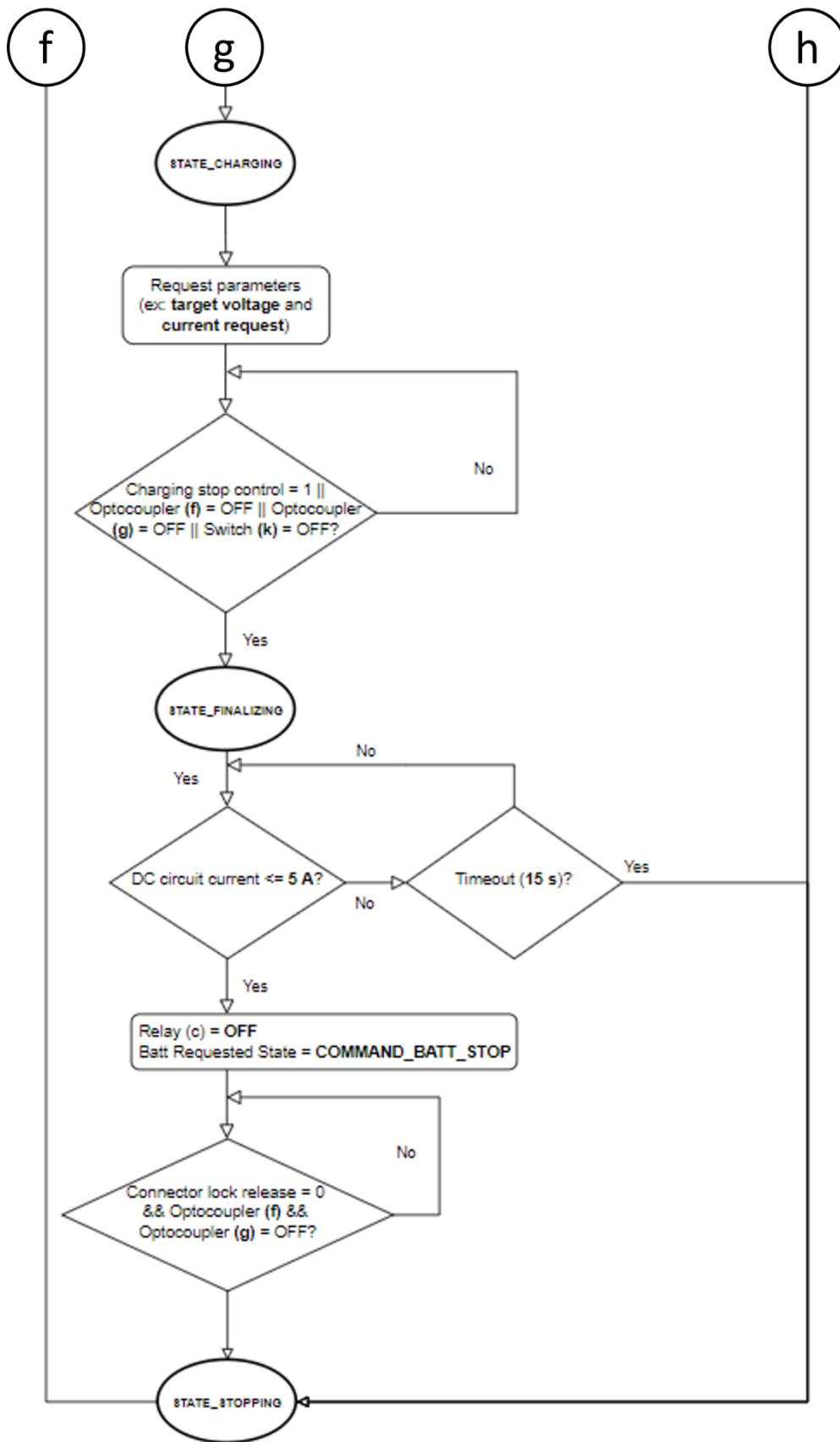
(a) Máquina de estados detalhada do protocolo CHAdEMO (simulador)



(b) Continuação da máquina de estados detalhada do protocolo CHAdeMO (simulador)



(c) Continuação da máquina de estados detalhada do protocolo CHAdeMO (simulador)



(d) Continuação da máquina de estados detalhada do protocolo CHAdeMO (simulador)

Fig. 58 - Máquina de estados detalhada do protocolo CHAdeMO (simulador)