



Estações de Carregamento para Veículos Eléctricos com V2G (DC)

DANIEL FIGUEIREDO DIOGO

junho de 2023

Estações de Carregamento para Veículos Elétricos com V2G (DC)

Daniel Figueiredo Diogo



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2023

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de
TEDSEE – Dissertação/Estágio do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas
Elétricos de Energia

Candidato: Daniel Figueiredo Diogo, Nº 1151029, 1151029@isep.ipp.pt

Orientação científica: Prof. Doutor Rui Filipe Marques Chibante

Empresa: Efacec

Supervisão: Eng.º Nuno Costa, nfc@efacec.com



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2023

Agradecimentos

O alcançar desta etapa foi sempre acompanhado do auxílio, carinho e dedicação por parte de várias pessoas ao longo de todo o percurso da minha formação. Por esta razão, não quero deixar passar esta oportunidade para agradecer a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para o meu sucesso e o culminar de mais uma etapa académica.

Agradeço a todos os professores que tanto me ensinaram no decorrer da minha Licenciatura e Mestrado. Ao meu orientador, Doutor Rui Filipe Marques Chibante, e ao meu supervisor, Engenheiro Nuno Costa, o meu agradecimento pelo apoio e disponibilidade prestados ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço aos meus pais que sempre me apoiaram e nunca permitiram que desistisse dos meus sonhos, nem nos momentos mais difíceis. Agradeço ao meu irmão e à Ana por todo o conhecimento e experiência que comigo trocaram. Por fim, à minha tia e aos meus primos o meu agradecimento.

A todos, um grande bem-haja.

Resumo

A mobilidade elétrica tem ao longo dos últimos anos demonstrado um crescimento exponencial, tanto na sua utilização, quanto na velocidade do desenvolvimento tecnológico.

A adesão em massa desta tecnologia exige um aumento do número de postos de carregamento, bem como da potência de carregamento dos mesmos, de modo a permitir a diminuição do tempo de espera do utilizador. Contudo, isto acarreta uma série de problemas ao nível da rede elétrica dado o perfil estocástico deste tipo de cargas, de difícil previsão.

Assim, de forma a possibilitar a integração de carregadores na rede elétrica surgem carregadores com capacidade de carregamento bidirecional, V2G (*Vehicle-to-Grid*), que permitem a injeção de energia na rede elétrica, funcionando como filtros ativos de suporte à rede, aumentando assim a estabilidade da mesma.

Esta dissertação visa a análise e implementação de um conversor AC-DC, que permita a operação em modo bidirecional (carga/descarga do veículo), funcionando também como STATCOM (*static synchronous compensator*) com objetivo de dar suporte à rede.

Palavras-Chave: Conversor bidirecional, Mobilidade Elétrica, Qualidade da Energia Elétrica, *Smart Charging*, Static Synchronous Compensator, *Vehicle-to-Grid*, Veículo Elétrico.

Abstract

Electric mobility has over the past few years shown an exponential growth, both in its adoption and in the speed of technological development. The mass adoption of this technology requires an increase in the number of charging stations, as well as their charging power, to allow a decrease in the user's waiting time. However, this leads to a series of problems at the grid level, given the stochastic profile of this type of loads, which is difficult to predict.

Thus, to enable the integration of chargers in the electrical grid, chargers with bidirectional charging capability, V2G (Vehicle-to-Grid), have emerged, which allow the injection of energy in the electrical grid, acting as active filters to support the grid, thus increasing its stability.

This dissertation aims to analyze and develop an AC-DC converter, which allows operating in bidirectional mode (vehicle charging/discharging), also working as a STATCOM (static synchronous compensator) to support the grid.

Keywords: Bidirectional Converter, Electric Mobility, Electric Vehicle, Power Quality, *Smart Charging*, Static Synchronous Compensator, Vehicle-to-Grid.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABELAS	XV
ACRÓNIMOS	XVII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 EFACEC – A EMPRESA	1
1.3 OBJETIVOS.....	2
1.4 CALENDARIZAÇÃO	2
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2 . REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 MOBILIDADE ELÉTRICA	4
2.1.1 Tipos de EV.....	5
2.1.2 Tecnologias de armazenamento de energia.....	6
2.2 NÍVEIS DE POTÊNCIA DE CARREGAMENTO E ARQUITETURA DA REDE DE CARREGAMENTO.....	7
2.2.1 Carregamento lento e normal.....	7
2.2.2 Carregamento rápido	8
2.2.3 Carregamento ultrarrápido	8
2.2.4 Princípio de funcionamento de um carregador DC	9
2.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS EV	11
2.4 A REDE ELÉTRICA E O CARREGAMENTO EM MASSA.....	13
2.4.1 O crescimento exponencial de EVs.....	13
2.4.2 Fontes de Energia Renováveis e Carregamento Ultrarrápido.....	14
2.4.3 Problema da gestão da rede.....	14
2.5 MODOS DE INTEGRAÇÃO DO VEÍCULO ELÉTRICO COM AS <i>SMART GRIDS</i>	16
2.5.1 Smart Charging	17
2.5.2 Vehicle-to-Grid (V2G).....	18
2.5.3 Vehicle-to-Home (V2H).....	18
2.5.4 A solução da tecnologia V2G	19
2.6 CARREGADORES V2G NO MERCADO.....	20
2.7 CENTRAIS ELÉTRICAS VIRTUAIS.....	21
2.7.1 Carregador de EV como VPP.....	22
2.8 COMUNICAÇÃO ENTRE CARREGADORES (OCPP)	23
2.9 CONVERSORES DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA.....	24
2.9.1 Conversor DC-DC Buck-Boost (Half-Bridge).....	24

2.9.2	<i>Conversor DC-DC Full-Bridge Isolado</i>	25
2.9.3	<i>Conversor DC-AC trifásico de 2 níveis</i>	26
2.9.4	<i>Conversor DC-AC trifásico Neutral-Point-Clamped</i>	26
2.9.5	<i>Funções dos inversores conectados à rede</i>	27
2.9.6	<i>Teoria P-Q</i>	29
2.9.7	<i>STATCOM</i>	31
2.10	TÉCNICAS DE MODULAÇÃO	31
2.10.1	<i>Modulação PWM sinusoidal</i>	32
2.10.2	<i>Modulação Space Vector PWM</i>	33
2.10.3	<i>Modulação Phase Shift PWM</i>	34
2.11	TÉCNICAS DE CONTROLO.....	35
2.11.1	<i>Controlo PID</i>	35
2.11.2	<i>Controlo preditivo baseado em modelo</i>	39
3	. SIMULAÇÃO DO CONVERSOR AC/DC BIDIRECIONAL	40
3.1	INTRODUÇÃO.....	40
3.2	MODELO DE SIMULAÇÃO DO CONVERSOR AC/DC BIDIRECIONAL.....	40
3.3	SIMULAÇÃO DA REDE	42
3.4	SISTEMA DE SINCRONIZAÇÃO COM A REDE ELÉTRICA	43
3.5	FILTRAGEM DE HARMÔNICOS	45
3.6	DIMENSIONAMENTO DO BARRAMENTO DC.....	47
3.7	CONVERSOR DC/DC	49
3.8	CONTROLO DO CONVERSOR AC/DC.....	52
3.8.1	<i>Controlo de tensão do barramento DC</i>	52
3.8.2	<i>Controlo do fator potência e corrente</i>	53
3.9	CONTROLO DO CONVERSOR DC/DC	56
3.10	TESTE DE FUNCIONAMENTO	58
4	. SIMULAÇÃO HIL DO CONVERSOR AC/DC	61
4.1	RT BOX.....	61
4.2	DSP TMS320F28379D.....	61
4.3	CONVERSOR SIMULADO.....	62
4.4	PROGRAMAÇÃO DA PLANTA NA RTBOX	64
4.4.1	<i>Fatores de escala</i>	65
4.5	SIMULAÇÃO DA REDE	67
4.6	CORRENTES NA REDE	67
4.7	MODOS DE OPERAÇÃO.....	68
5	. CARREGADOR V2G.....	70
5.1	REQUISITOS DO CARREGADOR	70
5.1.1	<i>Regulação de frequência</i>	71
5.1.2	<i>Correção do fator potência</i>	72
5.2	PROTOCOLO CHADEMO.....	73
5.3	MÓDULOS DE POTÊNCIA	78

5.3.1	<i>Comunicação CANBUS</i>	78
5.3.2	<i>Testes executados aos módulos</i>	80
5.3.3	<i>Arquitetura do carregador</i>	84
5.3.4	<i>Carta de Controlo de baixo nível</i>	85
5.3.5	<i>Carta de gestão da estação (broker MQTT)</i>	86
5.4	ALGORITMO SMART CHARGING	87
5.4.1	<i>Máquina de estados Charge/Discharge</i>	89
5.4.2	<i>Função de controlo da SoC</i>	90
5.4.3	<i>Função de regulação de frequência</i>	91
5.4.4	<i>Dynamic idle</i>	92
5.4.5	<i>Despacho por OCPP</i>	93
5.5	TESTES EXECUTADOS	94
5.5.1	<i>Carga unidirecional</i>	94
5.5.2	<i>Resultados</i>	94
5.5.3	<i>Carga bidirecional</i>	95
5.5.4	<i>Sessão de carga com dynamic idle ativo</i>	96
5.5.5	<i>Teste de sobrefrequência</i>	97
5.5.6	<i>Teste de subfrequência</i>	97
5.5.7	<i>Teste da banda morta (regulação de frequência)</i>	98
5.6	PRODUTO FINAL.....	99
5.6.1	<i>Análise do barramento DC</i>	99
5.6.2	<i>Osciloscópio lado AC</i>	100
6	. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO.....	103
6.1	CONCLUSÕES.....	103
6.2	SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO.....	104

Índice de Figuras

Figura 1 EV da Henry Morrison [47].	4
Figura 2 Veículo movido a combustível (Toyota Mirai) [48].	5
Figura 3 Veículo híbrido (BMW i8) [49].	5
Figura 4 EV (Nio ET5) [50].	6
Figura 5 Modo 1 de carregamento [2].	7
Figura 6 Modo 2 de carregamento [2].	8
Figura 7 Modo 3 de carregamento [2].	8
Figura 8 Modo 4 de carregamento [2].	9
Figura 9 Diagrama de funcionamento de um carregador elétrico.	9
Figura 10 Curva de carga de um VE (Nissan Leaf) [51].	10
Figura 11 Motor de combustão interna [52].	11
Figura 12 Eixo traseiro de um tesla model S [53].	12
Figura 13 Mapa de postos de carregamento zona do grande Porto.	12
Figura 14 Previsão do mercado de VEs [14].	14
Figura 15 Esquema do <i>Smart charging</i> [54].	17
Figura 16 Esquema exemplificativo do V2G [55].	18
Figura 17 Esquema de funcionamento do V2H [56].	18
Figura 18 Quatro quadrantes de operação: (a) Carregamento unidirecional; (b) Carregamento bidirecional.	20
Figura 19 Carregador V2G da Wallbox (Quasar)[57].	20
Figura 20 <i>Virtual power plant</i>	21
Figura 21 Conversor DC-DC <i>buck-boost</i> não isolado.	24
Figura 22 Conversor Dual Active Bridge.	25
Figura 23 Conversor DC-AC trifásico de ponte completa.	26
Figura 24 Conversor NPC de 3 níveis.	27
Figura 25 Potências da teoria p-q em fluxo num sistema trifásico.	30
Figura 26 Princípio de operação da técnica de modulação SPWM.	32
Figura 27 Mapa vetorial de um inversor trifásico.	34
Figura 28 Exemplo de modulação <i>Phase Shift</i> pwm.	34
Figura 29 Diagrama de blocos controlo PID [58].	35
Figura 30 Ganho proporcional [59].	36
Figura 31 Ganho integral [59].	37
Figura 32 Ganho derivativo [46], [59].	37
Figura 33 Controlador PID com <i>feedforward</i> .	38
Figura 34 PLECS logotipo.	40
Figura 35 Esquema completo do conversor.	41
Figura 36 Lado da rede.	42

Figura 37 Ciclo de rede gerado.	43
Figura 38 Circuito integrante da PLL.	43
Figura 39 Circuito integrante do detetor de fase.	44
Figura 40 Saída theta da PLL.....	44
Figura 41 Formas de onda antes do filtro LCL.	45
Figura 42 Correntes e tensões na entrada do conversor com potência de 31kW 46	46
Figura 43 Tensão do condensador do barramento DC em <i>steady state</i> 48	48
Figura 44 Subida da tensão no barramento DC..... 48	48
Figura 45 Formas de onda na saída do conversor DC/DC 50	50
Figura 46 Início de carga..... 50	50
Figura 47 Ciclo carga/descarga..... 51	51
Figura 48 Esquema de blocos do controlo 52	52
Figura 49 Bloco de controlo de tensão do barramento DC 53	53
Figura 50 Controlo corrente dq 54	54
Figura 51 Conversor com comportamento capacitivo 54	54
Figura 52 Tensão d e q..... 55	55
Figura 53 Sinusoides a modular 56	56
Figura 54 Desfasamento a aplicar 57	57
Figura 55 Controlo phase-shift pwm..... 57	57
Figura 56 PWM a aplicar ao primário e secundário..... 58	58
Figura 57 Perfil de frequência e resposta da malha de controlo..... 59	59
Figura 58 Tensão e corrente na bateria durante o teste 59	59
Figura 59 Inversão de corrente do lado da rede 60	60
Figura 60 RTBOX 1..... 61	61
Figura 61 DSP TMS320F28379D..... 62	62
Figura 62 Planta simulada na RTBOX..... 62	62
Figura 63 Docking Station 63	63
Figura 64 Interligação RTBOX-DSP 64	64
Figura 65 Tensões da rede no ADC 65	65
Figura 66 Tensões da rede após fator de escala reverso..... 66	66
Figura 67 Rede simulada RTBOX 67	67
Figura 68 Correntes na saída do conversor 68	68
Figura 69 Funcionamento retificador..... 68	68
Figura 70 Funcionamento inversor 69	69
Figura 71 Máquina de estados envio de potência..... 71	71
Figura 72 Tipos de regulação de frequência 71	71
Figura 73 Conversor PFC boost..... 72	72
Figura 74 Tomada CHAdeMO..... 73	73
Figura 75 Interface CHAdeMO..... 74	74

Figura 76 Trama CAN padrão.....	78
Figura 77 Trama CAN estendida.....	78
Figura 78 Base de dados BMPU no Busmaster.....	79
Figura 79 Grupo de mensagens cíclicas de operação do módulo BMPU	80
Figura 80 Teste de curto-circuito	81
Figura 81 Teste de atraso de comunicação.....	81
Figura 82 Teste de <i>load dump</i>	82
Figura 83 Teste de <i>load dump</i> ao modulo de potência bidireccional	83
Figura 84 Janela de mensagens Busmaster durante teste de simulação V2G.....	83
Figura 85 Pinça de corrente durante simulação V2G.....	84
Figura 86 Diagrama simplificado do carregador.....	84
Figura 87 Setup de testes.....	85
Figura 88 Máquina de estados geral.....	87
Figura 89 Fluxograma de decisão de potência	88
Figura 90 Máquina de estados <i>charge/discharge</i>	89
Figura 91 fluxograma da função de controlo da SOC.....	90
Figura 92 Função de regulação de frequência.....	91
Figura 93 Dynamic idle.....	92
Figura 94 Fluxograma referente à decisão de potência.....	93
Figura 95 Curva de carga Nissan leaf no carregador v2g	94
Figura 96 Sessão de teste do setpoint de potência.....	95
Figura 97 Sessão de carga com dynamic idle ativo.....	96
Figura 98 Teste de sobrefrequência.....	97
Figura 99 Teste de subfrequência.....	98
Figura 100 Teste de varrimento de frequência	99
Figura 101 Passagem de carga para descarga barramento DC.....	100
Figura 102 Absorção da rede.....	100
Figura 103 Injeção na rede.....	101
Figura 104 Transição Carga/Descarga do veículo.....	101
Figura 105 Standby	102

Índice de Tabelas

Tabela 1: Calendarização	2
Tabela 2 Características do conversor AC/DC.....	41
Tabela 3 Características do conversor DC/DC.....	42
Tabela 4 Interligação RTBOX-DSP.....	63
Tabela 5 CHAdeMO pin layout	73
Tabela 6 Mensagens RX (EV para Carregador).....	75
Tabela 7 Mensagens TX (Carregador para EV).....	76

Acrónimos

AC	–	Alternating Current
CCS	–	Combined Charging Station
CHAdeMO	–	CHArge de Move
DC	–	Direct Current
EV	–	Electric Vehicle
FAP	–	Filtro Ativo Paralelo
G2V	–	Grid to Vehicle
HV	–	High Voltage
HIL	–	Hardware in Loop
IGBT	–	Insulated Gate Bipolar Transistor
ISEP	–	Instituto Superior de Engenharia do Porto
PLL	–	Phase Locked Loop
SoC	–	State of Charge
STATCOM	–	Static Synchronous Compensator
VSC	–	Voltage Source Converter
V2H	–	Vehicle to Home
V2G	–	Vehicle to Grid

1. Introdução

1.1 Contextualização

Devido ao aumento exponencial da utilização de veículos elétricos (VE), existe simultaneamente um aumento da necessidade de proceder ao carregamento dos mesmos. De maneira que seja possível a conversão completa, da mobilidade tradicional para mobilidade elétrica é necessário o aumento do número de postos de carregamento, bem como da potência de carregamento dos mesmos. Contudo, isto acarreta consequências para a rede elétrica devido ao perfil estocástico dos carregamentos provocando fenómenos de *overload* na rede. A tecnologia V2G (*Vehicle-to-Grid*) permite que veículos conectados aos carregadores possam descarregar as suas baterias, contribuindo ativamente como suporte à rede elétrica.

O projeto surge do interesse da empresa Efacec *Electric Mobility* em desenvolver um carregador com estas capacidades, tendo em vista a atualização do seu portfólio de produtos, e melhorar o seu posicionamento no mercado de carregadores.

Este relatório de estágio surge no âmbito da Unidade Curricular de Dissertação/Estágio . A mesma faz parte do plano de estudos do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia.

O trabalho foi realizado sob a forma de estágio na unidade de Mobilidade Elétrica da empresa Efacec com a duração de aproximadamente 9 meses (de Janeiro de 2023 a Setembro de 2023). A opção por realizar estágio nesta empresa deve-se ao elevado interesse e curiosidade pela área da mobilidade elétrica, bem como, o facto de o carregador de VE ser um ponto crucial no que toca à mobilidade elétrica e sua utilidade no mundo real.

1.2 Efacec – A Empresa

A Efacec é a maior corporação portuguesa no ramo da energia, mobilidade e engenharia. Atualmente conta com várias subsidiárias espalhadas por todo o mundo e é líder no campo do carregamento ultrarrápido de VE. Em Portugal, a Efacec conta com 3 polos: dois no Norte e um no Sul do país. Relativamente aos primeiros, estes são o Pólo da Arroiteia em Matosinhos, que é responsável pelo *service*, aparelhagem e direção comercial de produtos, bem como, transformadores, e o Pólo da Maia, que é responsável pela área de transportes, ambiente, energias e mobilidade elétrica. No Sul, situa-se o Pólo de Carnaxide que é responsável pelas áreas dos transportes, ambiente, automação e energias.

A Efacec *Electric Mobility*, é a empresa do Grupo direcionada para o negócio da Mobilidade Elétrica dispondo no seu portfolio de produtos e soluções para a carga lenta, rápida e ultra-rápida de veículos elétricos e gestão da infraestrutura de carregamento.

1.3 Objetivos

O estágio teve como objetivo proceder ao desenvolvimento de um carregador de VE com capacidade V2G, desde a implementação do seu esquema elétrico até ao desenvolvimento do *firmware* de controlo do mesmo. Para além disso, havia o interesse na realização dum estudo/simulação e HIL (Hardware-in-Loop) de um conversor AC-DC bidirecional com possibilidade de futuramente substituir o módulo bidirecional utilizado no carregador.

1.4 Calendarização

A Tabela 1 demonstra o desenvolvimento temporal efetuado durante o estágio.

Tabela 1: Calendarização

Tarefa	Jan/23		Fev/23				Mar/23				Abr/23				Mai/23				Jun/23		
	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	
Funcionamento de um carregador	█																				
Compreensão dos circuitos		█	█	█	█																
Funcionamento da tecnologia V2G				█	█	█	█														
Testes com protótipo								█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█		
Realização do relatório												█	█	█	█	█	█	█	█	█	█

1.5 Estrutura da Dissertação

O presente documento está estruturado em seis capítulos, cada um abordando aspetos específicos relacionados ao tema em estudo

Capítulo 1: Introdução. Neste capítulo inicial, são apresentadas informações contextualizadas sobre a importância do tema, juntamente com uma visão geral da empresa EFACEC. Os objetivos do estudo são estabelecidos, assim como a sua calendarização. Além disso, é fornecida uma descrição da estrutura da dissertação, dando uma visão geral do conteúdo abordado nos capítulos subsequentes.

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica. Este capítulo realiza uma revisão abrangente da literatura relacionada à mobilidade elétrica. São apresentados conceitos sobre os diferentes tipos de veículos elétricos (EVs) e as tecnologias de armazenamento de energia utilizadas. Também são discutidos os níveis de potência de carregamento, a arquitetura da rede de carregamento, as vantagens e desvantagens dos EVs, o crescimento exponencial desses veículos e os desafios de gestão da rede elétrica. Além disso, são abordados os modos de integração do veículo elétrico com as smart grids, como o Smart Charging, Vehicle-to-Grid (V2G) e Vehicle-to-Home (V2H), bem como a comunicação entre carregadores e as tecnologias de conversores de eletrônica de potência.

Capítulo 3: Simulação Conversor AC/DC Bidirecional. Neste capítulo, é apresentada uma simulação do conversor AC/DC bidirecional. São discutidos o modelo de simulação do conversor,

a simulação da rede elétrica, a sincronização com a rede, a filtragem de harmônicos, o dimensionamento do barramento DC e do condensador, o estágio DC/DC e o controle do conversor AC/DC. Também são realizados testes de funcionamento para avaliar o desempenho do sistema.

Capítulo 4: Simulação HIL AC/DC Neste capítulo, são apresentados os detalhes da simulação Hardware-in-the-Loop (HIL) do conversor AC/DC. Também é explicado como o conversor foi simulado e como a planta foi programada na RTBOX. Além disso, são discutidos os modos de operação e são apresentadas as correntes na rede obtidas durante a simulação.

Capítulo 5: Carregador V2G Este capítulo é dedicado ao desenvolvimento de um carregador V2G. São definidos os requisitos do carregador, como a regulação de frequência e a correção do fator de potência. Também são apresentados detalhes sobre o protocolo CHADEMO, os módulos de potência, a comunicação CANBUS e os testes executados nos módulos. O algoritmo de *Smart Charging* é apresentado, e são realizados testes para avaliar o desempenho do carregador em diferentes cenários.

Capítulo 6: Conclusões e Sugestões de Trabalho Futuro No último capítulo, são apresentadas as conclusões do estudo, resumindo os principais resultados alcançados. Também são fornecidas sugestões para trabalhos futuros, indicando possíveis direções de pesquisa e desenvolvimento relacionadas ao tema abordado.

2. Revisão bibliográfica

2.1 Mobilidade elétrica

Apesar de ultimamente existir uma grande preocupação em relação ao ambiente e do tema da mobilidade elétrica ser considerado um tema da atualidade, a verdade é que, os primeiros veículos construídos eram EV, devido à simplicidade do motor elétrico comparativamente ao motor de combustão interna. No entanto, a reduzida autonomia e a falta de conhecimento na área fizeram com que o conceito de mobilidade elétrica desvanecesse. A Morrison foi a primeira marca a tornar comercializável um EV. O modelo foi produzido no *Iowa*, em *Des Moines*, sendo os motores alimentados por 24 baterias que perfaziam 112 A de corrente máxima de saída. Precisava de 10 horas para recarregar completamente as baterias e tinha 160 km de autonomia. Na Figura 1 observa-se o modelo produzido pela Morrison.



Figura 1 EV da Henry Morrison [47].

Na atualidade existe um vasto leque de opções no que toca a EV, bem como, uma variada gama de especificações e autonomias. A Tesla, foi e continua a ser um exemplo disso mesmo, sendo uma empresa pioneira na produção, criação e aperfeiçoamento de todas as tecnologias presentes em veículos elétricos, tornando cada vez mais possível a substituição dos veículos de combustão interna.

2.1.1 Tipos de EV

Existem vários tipos de EV, entre os quais podem-se destacar os veículos híbridos, que contam com um motor convencional de combustão interna auxiliado por um motor elétrico, os veículos totalmente elétricos, que contam apenas com motores elétricos alimentados por baterias e, os veículos movidos por célula de combustível, que apesar de contarem com uma pequena bateria que apenas é utilizada para situações em que é necessário um pico de potência elevado, não necessitam de armazenar energia elétrica, pois são capazes de a produzir, bastando para isso encher o seu depósito com hidrogénio. As células de combustível produzem energia elétrica ao juntar o H₂ (hidrogénio) que existe no tanque ao oxigénio (O₂) retirado do ar exterior, gerando no processo água e eletricidade. Observa-se na Figura 2 um exemplo de um veículo movido a célula de combustível, enquanto um veículo híbrido e um veículo totalmente elétrico são representados na Figura 3 e Figura 4, respetivamente [1].



Figura 2 Veículo movido a combustível (Toyota Mirai) [48].



Figura 3 Veículo híbrido (BMW i8) [49].



Figura 4 EV (Nio ET5) [50].

2.1.2 Tecnologias de armazenamento de energia

Uma bateria de tração é o componente principal e central de todos os EV. A energia química nelas armazenada é convertida em energia elétrica, e esta atua como uma fonte de energia para impulsionar o veículo (energia mecânica). As baterias podem ser recarregadas convertendo a energia elétrica externa em energia química (carga), que pode ser armazenada nelas durante um período definido. Atuam como um todo ou fonte de energia combinada (bateria + motor de combustão interna) para PHEVs (Plug-In Hybrid Electric Vehicle) e completa para BEVs (Battery Electric Vehicle).

Uma bateria é caracterizada pela sua densidade energética, densidade de potência, eficiência e tempo de vida útil. O ciclo de vida de uma bateria é determinado pelo número de ciclos de carga e descarga completados, antes de perder a capacidade de manter uma carga útil, isto é tipicamente quando a sua capacidade de produção cai abaixo de 80% da sua capacidade inicial. Multiplicando o ciclo de vida e o conteúdo energético, é possível encontrar a vida útil de uma bateria, dando uma estimativa de quantas vezes deve ser substituída durante a vida útil de um veículo.

Ao carregar e descarregar a bateria, haverá perdas que influenciarão a produção total, ou seja, poderá não fornecer toda a energia que é armazenada na mesma. Isto está relacionado com a eficiência da bateria.

A densidade de energia ou energia específica de uma bateria é a quantidade de energia, com base no volume, que pode ser retirada de uma fonte de energia; isto determina o alcance do veículo e é medida em kWh/litro.

A densidade de potência ou a potência específica é a taxa de energia, com base no volume que pode ser retirada de uma fonte de energia; isto determina o desempenho veicular e é medido em Watts (W). A bateria ideal para um EV deve ter uma alta densidade de potência e densidade de energia. As baterias podem ser otimizadas com base na modificação da densidade de energia ou densidade de potência. Um parâmetro muito importante da bateria de um EV é o estado de carga (SoC), que descreve a quantidade de energia elétrica remanescente na bateria, sendo expressa em porcentagem da carga total da bateria. Em todas as aplicações de EV, a SoC de uma bateria é utilizada para determinar a autonomia do veículo. Os EV podem ter uma configuração de bateria

em série, uma configuração de bateria paralela, ou uma combinação de ambas, em função do tamanho e do tipo de veículo [1].

2.2 Níveis de potência de carregamento e arquitetura da rede de carregamento

A energia elétrica extraída por um EV da rede pode ser obtida integrando a energia imediata necessária nas rodas para impulsionar o veículo ao longo do tempo, tendo em conta as eficiências imediatas da transmissão mecânica da transmissão, a eletrônica de potência, os motores elétricos, as baterias e o sistema carregador.

Os níveis de potência de carga podem ser definidos de acordo com a energia elétrica retirada da rede e a respetiva taxa de carga possível. Os níveis de potência de carga para EV são geralmente divididos em dois esquemas, carga lenta (potência até 2kW), carga normal (potência até 3,7 kW), carga rápida (potência até 43kW) e carga ultrarrápida [2].

2.2.1 Carregamento lento e normal

O carregamento lento pode ser definido como o carregamento que utiliza os níveis de potência correspondentes às tomadas elétricas padrão normalmente presentes nas instalações residenciais. Está sobretudo associada à carga noturna. Como o nome indica, um carregamento EV com este esquema, demora 6 a 8 horas para uma recarga completa da bateria. De acordo com as normas IEC, os níveis de carga dos modos 1 e 2 (Figura 5 e Figura 6) são de carga lenta (os modos de carga serão discutidos mais tarde neste documento). Nos países europeus, a saída padrão para carregamento lento é 230 V, 16 A, o que demora em média 7-8 horas para uma carga completa da bateria (dependendo da capacidade da mesma). A América do Norte utiliza um abastecimento de 120 V, 15 A, o que leva em média 10-14 horas para uma carga completa da bateria. No Japão, o carregador normal funciona a 100/200 V que leva 3/7 h respetivamente para uma carga completa. Na China, o carregador monofásico funciona a 220 V e fornece uma corrente de ≤ 32 A [1].



Figura 5 Modo 1 de carregamento [2].



Figura 6 Modo 2 de carregamento [2].

2.2.2 Carregamento rápido

O carregamento rápido envolve níveis de potência elevados para carregar o veículo e pode ser efetuado em AC (corrente alternada) ou DC (corrente contínua). O carregamento rápido proporciona uma carga de 50% em 10 a 15 minutos (dependendo do nível, protocolo de carregamento e capacidade da bateria) De acordo com as normas IEC, os Modos 3 e 4 (modo 4 rápido) são utilizados para o carregamento rápido de EV. A Figura 7 ilustra o modo 3 de carregamento (carregamento semirrápido).

As ligações trifásicas permitem uma potência consideravelmente mais elevada para níveis de corrente modestos em comparação com instalações monofásicas [2].



Figura 7 Modo 3 de carregamento [2].

2.2.3 Carregamento ultrarrápido

Com o aumento da adesão à mobilidade elétrica, espera-se que a procura total por carregadores aumente também. Embora o carregamento lento em AC mantenha a sua quota dominante até 2030, a utilização de novos carregadores rápidos e ultrarrápidos (DC) irá aumentar muito significativamente (Figura 8). Neste momento, um carregador rápido DC atinge tipicamente 50 kW [1]. A capacidade média da bateria dos EVs principais no mercado é de 60,1 kWh (alcance médio de 317 km). Ao contrário do carregamento lento, maioritariamente utilizado durante a noite, o tempo de carregamento de 15 minutos é o máximo aceitável para a maioria dos condutores durante uma viagem. De maneira a proceder ao carregamento de um EV em 15 minutos, é necessária a utilização de um carregador de elevada potência, que em alguns casos pode ascender os 300 kW. Note-se que a potência de carregamento pode aumentar ainda mais, à medida que a capacidade da bateria aumenta e o tempo de carregamento depende também da capacidade da bateria.

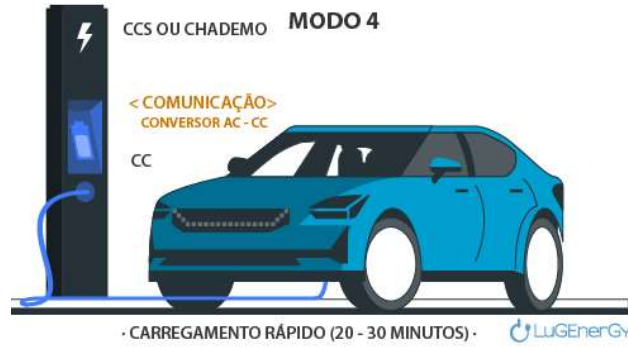


Figura 8 Modo 4 de carregamento [2].

Os protocolos de carregamento ultrarrápido atualmente utilizados são o CCS (Combined Charging Station, definido pela UE), o CHAdeMO (CHARGE de Move CHAdeMO, definido pelo Japão), e o GB/T (definido pela China) [3].

A potência máxima de carregamento definida por cada protocolo é diferente, sendo a mais baixa de 185 kW (GB/T), e a potência máxima de carregamento atinge os 400 kW (CHAdeMO). De maneira a aumentar ainda mais a potência máxima de carregamento, a associação CHAdeMO e a China *Electricity Council* codesenvolveram um novo protocolo, *ChaoJi*, com 900 kW de potência máxima, que é retro compatível com os protocolos CHAdeMO e GB/T [5].

2.2.4 Princípio de funcionamento de um carregador DC

Na Figura 9 encontra-se representado um diagrama simplificado do princípio de funcionamento de um carregador elétrico.

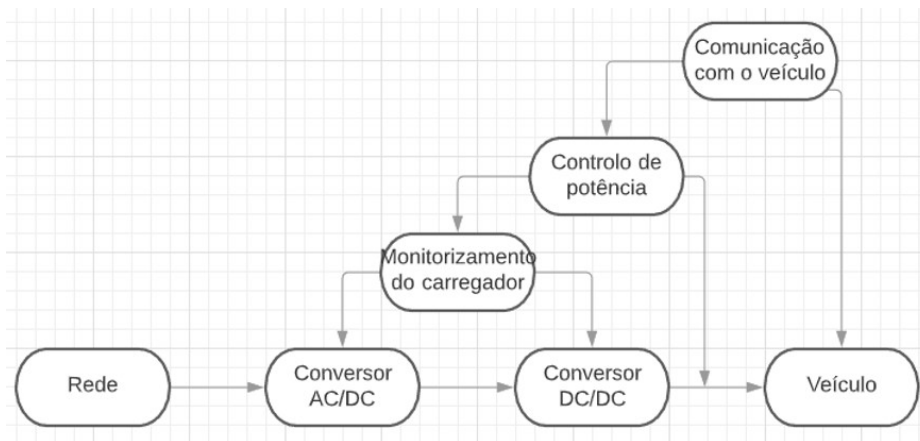


Figura 9 Diagrama de funcionamento de um carregador elétrico.

Durante o carregamento o veículo e o carregador estão em constante comunicação, monitorizando a temperatura dos vários componentes integrantes do sistema, bem como, correntes, tensões e humidade [1].

Numa primeira fase o veículo comunica com o carregador qual a potência máxima que pode receber e caso esta potência seja inferior ao valor que pode ser fornecido pelo carregador então o carregamento é aceite e iniciado [2] [3].

De seguida o carregador vai buscar energia diretamente a rede. O carregador passa então a converter a corrente AC em DC, através de um conversor AC-DC. De maneira a ser possível controlar a potência de saída minuciosamente é necessário existir um conversor DC-DC, que fará chegar ao veículo a sua potência máxima admissível.

Para além disso, a potência de carregamento varia em função da SoC da bateria e da temperatura [4]. A Figura 10 ilustra a curva de carga de um EV num carregador de 50 kW em função da SoC.



Figura 10 Curva de carga de um VE (Nissan Leaf) [51].

A potência divulgada pelos fabricantes de carregadores é referente à potência máxima que estes conseguem debitar, no entanto, o veículo a carregar é normalmente o fator limitante no que toca à potência de carga [5].

2.3 Vantagens e desvantagens dos EV

OS EVs, comparativamente aos veículos de combustão interna, apresentam como vantagens [5]:

- Custo por quilómetro inferior aos veículos de combustão.
- Menor produção de ruído.
- Menor gasto de manutenção devido a simplicidade do motor elétrico.
- Menor emissão de gases poluentes durante a locomoção.
- Melhor distribuição de espaço pois o motor elétrico ocupa significativamente menos espaço que o motor de combustão, para além de não necessitar de caixa de velocidades [6].

A maioria das vantagens devem-se principalmente à elevada eficiência do motor elétrico relativamente ao motor de combustão interna.

O motor de combustão interna (Figura 11) gera potência mecânica através da injeção de combustível misturado com ar no interior de um cilindro. Esta mistura é comprimida e detonada através de uma faísca no caso de um motor a gasolina ou através de compressão elevada no caso do diesel. A energia desta detonação gera por sua vez um movimento linear que terá de ser convertido num movimento rotacional pela cambota. Este movimento rotacional por sua vez passa pela caixa de velocidades e pelo diferencial e por fim chega às rodas. [7]



Figura 11 Motor de combustão interna [52].

Para além de todas estas conversões de movimento acima citadas temos também o controlo das válvulas de admissão e escape que utilizam a energia mecânica gerada pelo motor para funcionar, bem como, a energia térmica que este gera que acaba sendo dissipada. O motor, por fim, conta apenas com uma pequena parte da energia para locomoção, o que faz desta família de motores máquinas muito pouco eficientes [8].

Em contrapartida, o motor elétrico é muito mais simples apresentando um menor movimento de peças. O motor pode ser AC ou DC, baseando-se num campo magnético giratório que é induzido ao rotor, fazendo por sua vez este rodar [8]. Ao contrário do motor de combustão interna, o motor elétrico conta com uma curva de binário constante e pode ser colocado diretamente em cada roda (Figura 12). Desta forma, não necessita de diferencial nem de caixa de velocidades, aumentando a eficiência do conjunto [9].

Para além disso, visto que o motor elétrico pode operar como gerador, é possível recorrer ao processo de regeneração de energia, aumentando desta forma a autonomia do veículo.

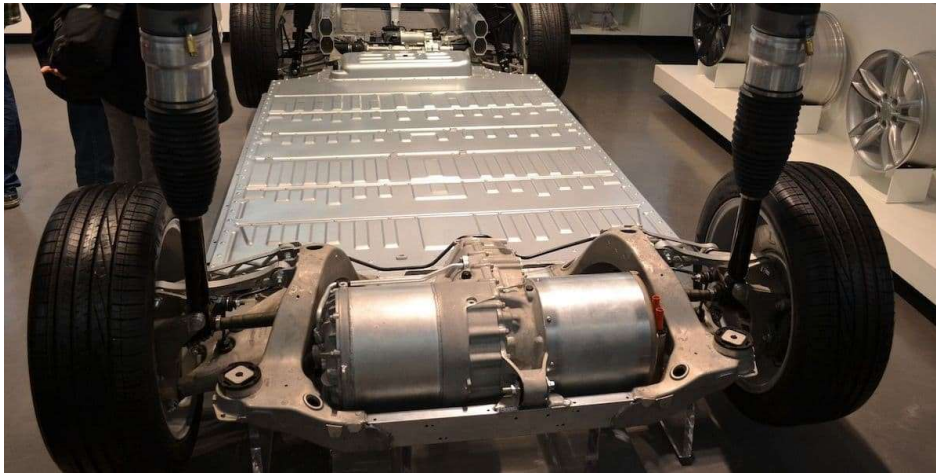


Figura 12 Eixo traseiro de um tesla model S [53].

No entanto existem algumas desvantagens dos EVs relativamente aos veículos de combustão, como é o caso de [6]:

- A falta de conhecimento na reparação.
- Número reduzido de postos de abastecimento.
- Tempo de carregamento superior ao de abastecimento de um veículo a combustão.
- Custo elevado das baterias.
- Autonomia reduzida.

Deste modo, o número reduzido de postos de carregamento de EVs, aliado à sua baixa autonomia, continuam a ser o fator limitante na adoção total deste tipo de veículos. De notar que a densidade de postos de carregamento em cidades é superior aos arredores, e por isso mesmo a maior parte da utilização de EVs dá-se em meio citadino [12].

A Figura 13 ilustra a distribuição de postos de carregamento na zona do Grande Porto e arredores.

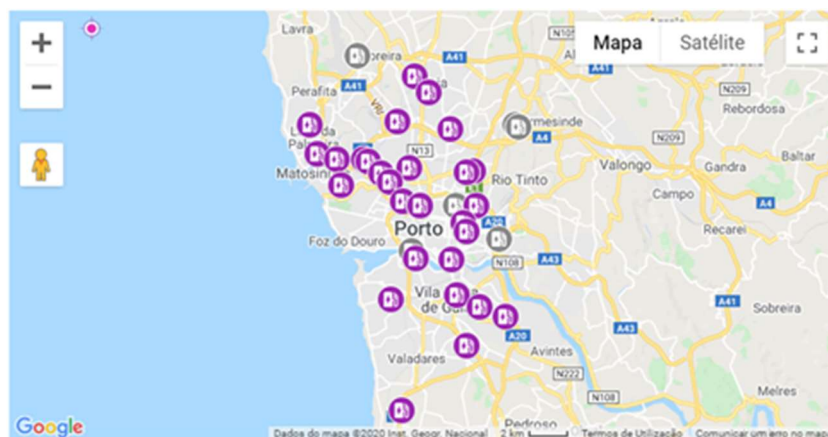


Figura 13 Mapa de postos de carregamento zona do grande Porto.

2.4 A Rede elétrica e o Carregamento em massa

O rápido crescimento da adoção de veículos elétricos (EVs) tem transformado o setor automóvel e impulsionado a procura por infraestrutura de carregamento em massa. Essa tendência traz consigo desafios e oportunidades significativas para a rede elétrica, que precisa se adaptar para acomodar essa crescente procura.

O aumento na procura por energia elétrica é, portanto, uma consequência direta do crescimento dos EVs. À medida que mais consumidores adotam esses veículos, a necessidade de energia elétrica para alimentá-los também cresce. Para atender a essa procura crescente, as redes elétricas devem ser atualizadas e otimizadas.

Um dos desafios mais proeminentes é a gestão do pico de consumo, que ocorre quando muitos EVs são carregados simultaneamente. Esse cenário pode sobrecarregar a rede, causando falhas e interrupções. Para evitar isso, é necessário implementar soluções de gestão de carga que equilibrem a procura e a oferta de energia elétrica.

As concessionárias de energia têm um papel crucial na implementação de infraestruturas de carregamento em massa. Elas devem investir no desenvolvimento de estações de carregamento rápido e eficiente que podem atender a um grande número de veículos simultaneamente. Além disso, é essencial estabelecer parcerias entre concessionárias, governos e fabricantes de automóveis para promover a expansão dessa infraestrutura.

Acontecimentos recentes mostraram a vulnerabilidade da rede elétrica a perturbações físicas. Embora não possamos construir uma rede totalmente segura, novas abordagens, inclusive através da produção distribuída, mostram que podemos construir uma rede menos centralizada e mais resiliente.

Embora o custo de produção de energia tenha diminuído drasticamente ao longo dos últimos anos, o custo de fornecimento dessa energia tem aumentado constantemente, o que acarreta um custo acrescido na fatura da eletricidade dos consumidores [7].

Deste modo, tem-se apostado na alteração do modelo tradicional de produção de energia, incentivando-se a utilização de fontes de energia renováveis aliadas com sistemas de armazenamento de energia para a produção de energia. Estes sistemas permitem responder às necessidades da rede de forma mais rentável não sendo necessário a construção de novas infraestruturas físicas [8].

2.4.1 O crescimento exponencial de EVs

O sector dos transportes é um dos mais consumidores de combustível fósseis, pelo que é um dos principais contribuintes para a emissão de gases de efeito de estufa (GEE) da União Europeia (UE), sendo responsável por vinte terços do total das emissões de GEE desde o ano de 2015. Adicionalmente, é o único sector a continuar a mostrar um aumento das emissões de GEE. Deste modo, isto não só aumenta a dependência dos combustíveis, como resulta noutros impactos graves, como poluição, ruído, utilização de recursos e resíduos, levando ao aparecimento de alterações climáticas globais [4].

Para lidar com o problema das alterações climáticas globais, a comissão das comunidades europeias (ECU) estabeleceu o objetivo de alcançar o transporte urbano sem emissões até 2050 e o

transporte urbano de mercadorias sem emissões até 2030. O ponto chave para a mudança atual é a qualidade das infraestruturas de carregamento, em particular a introdução de um maior número e de maior qualidade de EVs no mercado. Estes veículos são totais ou parcialmente alimentados por energia elétrica [3]. A Figura 14 apresenta a evolução da utilização de EVs nos últimos anos, sendo possível observar a estimativa de utilização de EVs até 2055.

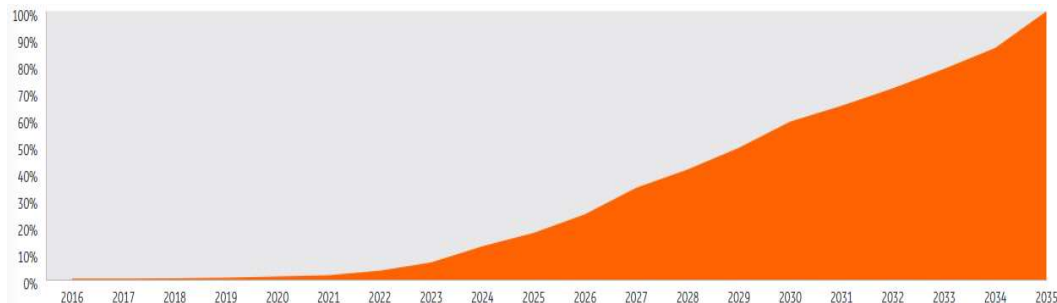


Figura 14 Previsão do mercado de VEs [14].

2.4.2 Fontes de Energia Renováveis e Carregamento Ultrarrápido

Quando existe uma interação da rede com uma estação ultrarrápida de carregamento, a rede elétrica, vê um novo tipo de carga, com características particulares:

- Uma potência extremamente elevada.
- Difícil previsão.

Estas características são muito semelhantes às estudadas no campo da integração de fontes de energia renováveis na rede elétrica, no que diz respeito à sua intermitência na produção de energia. Por exemplo, uma instalação fotovoltaica (PV) típica de tamanho moderado pode atingir uma potência média de 5-9 MW, pode ser comparável a uma estação de carga ultrarrápida com apenas uma dezena de carregadores [9]. Além disso, a produção de energias renováveis depende muito de fatores ambientais, que são estocásticos por natureza. As instalações fotovoltaicas, por exemplo, podem ver a produção cair para 10-25% da capacidade nominal em dias nublados. O perfil de carregamento, dominado pela escolha humana, é aleatório e de difícil previsão.

Deste modo, os impactos das estações de carregamento detalhados anteriormente são semelhantes aos das energias renováveis, podendo causar instabilidades nos níveis de tensão e frequência da rede contribuindo para problemas de qualidade de energia elétrica (QEE) [10], [11].

2.4.3 Problema da gestão da rede

Algumas alterações à gestão da rede atual referem-se à monitorização e controlo da procura que é colocada na estação geradora com a ajuda de tecnologias alternativas que envolvem uma combinação de geração distribuída (DG), tais como, fontes de energia renováveis, bem como o conceito de V2G, que será abordado posteriormente [16], [17].

Falhas inesperadas numa central elétrica, cargas indispensáveis, erros de cálculo na previsão da carga, ou condições climáticas imprevisíveis provocam picos de procura no sistema inesperados. Sendo a concretização de tais exigências dispendiosa para uma central elétrica (centralizada) em termos de eficiência e fiabilidade [18].

Para além disso, a difícil previsão do carregamento de EVs torna a gestão da rede elétrica mais complexo. Consequentemente, as possibilidades de diferentes mecanismos de carregamento agravam a situação, uma vez que os utilizadores podem optar por utilizar carregamento lento ou carregamento rápido para carregar os EVs. Adicionalmente, o carregamento desordenado de veículos em horas de pico pode facilmente levar a sobrecargas nos barramentos da rede, levando ao congestionamento de cargas, o que numa situação extrema pode provocar uma interrupção da tensão de alimentação [12].

No entanto, a utilização de fontes de energia renováveis aliadas com um sistema V2G requerem elevados custos de investimento para a sua implementação. Daí a necessidade de encontrar uma solução mais económica, eficiente e de fácil implementação [2], [19].

Por outro lado, se as estações de carregamento, denominados *Grid-to-Vehicle* (G2V), não forem devidamente reguladas podem causar sérios problemas na rede elétrica, como por exemplo, a sobrecarga em transformadores de distribuição, quando são colocados em carga veículos em períodos do dia em que o consumo de energia é bastante elevado. Para além disso, podem ocorrer outros problemas de QEE (Qualidade de Energia Elétrica), tais como, cavas de tensão, sobrecarga de linhas distribuição de energia, desequilíbrios de tensões de alimentação, um aumento das perdas no transporte de energia, desvios de frequência e consumo harmónico de corrente [12], [13]. Outro problema decorrente da não regulamentação do carregamento é o aumento do consumo de energia elétrica em horas de ponta, o que provoca uma necessidade de aumento na produção de energia que, consequentemente, leva ao aumento no seu preço, podendo causar uma sobrecarga que pode levar ao colapso da rede elétrica (blackout) [14], [15].

A solução para regular o carregamento dos veículos passa por desenvolver uma rede de comunicação que contenha um controlador central e equipar os EVs, bem como as estações de carregamento, com capacidade de comunicar com os diferentes controladores de forma a garantir o funcionamento correto do sistema que inclui consumidores de energia, proprietários de EVs, redes de distribuição e até mesmo as empresas produtoras de energia elétrica. O controlador central deve ser capaz de lidar com todas as informações, adaptando eficientemente o carregamento dos veículos às necessidades de seus utilizadores, tendo em consideração o preço da eletricidade em que as baterias são carregadas, bem como gerenciar outras cargas conectadas à rede elétrica, a fim de salvaguardar um consumo de energia suportável pelos produtores e infraestruturas de transporte de energia [16].

Para além dos desafios que a integração de EVs na rede elétrica acarreta, com a criação de uma rede de comunicação e monitorização bidirecional de carregamento, surgem oportunidades a nível do armazenamento distribuído e retorno de energia à rede, na habilitação de EVs plug-in (BEV e PHEV) equipados com carregadores bidirecionais, contribuindo desta forma para a estabilidade da rede elétrica. Assim sendo, surgem novos conceitos no âmbito das estações de carregamento bidirecionais, como o *Vehicle-to-Grid* (V2G), *Vehicle-to-Home* (V2H) e *Vehicle-to-Vehicle* (V2V) [16].

2.5 Modos de Integração do Veículo Elétrico com as *Smart Grids*

A crescente adoção de veículos elétricos (EVs) e o desenvolvimento das redes inteligentes (*smart grids*) têm criado oportunidades para otimizar a gestão de energia e melhorar a eficiência do sistema elétrico. A integração bem-sucedida dos EVs nas *smart grids* pode desempenhar um papel crucial na transição energética global.

As *smart grids* são redes elétricas avançadas que utilizam tecnologias de informação e comunicação para monitorizar, controlar e otimizar a geração, distribuição e consumo de energia elétrica. Essas redes oferecem benefícios significativos, como maior eficiência, menor custo operacional e melhor integração de fontes de energia renovável.

Os EVs, por sua vez, são uma parte essencial da transição para um futuro energético mais limpo e sustentável. Ao integrar-se às *smart grids*, os EVs podem ajudar a otimizar o uso de energia e a aumentar a eficiência do sistema elétrico. Existem dois modos principais de integração dos EVs com as *smart grids*: carregamento inteligente (*smart charging*) e *Vehicle-to-Grid* (V2G).

O carregamento inteligente é um processo que permite gerenciar e otimizar o carregamento dos EVs de acordo com a procura e a oferta de energia elétrica. Com o carregamento inteligente, é possível programar o carregamento dos veículos durante os períodos de menor procura ou quando a geração de energia renovável é mais abundante, reduzindo os custos de energia e minimizando o impacto no sistema elétrico. O carregamento inteligente também pode incluir tarifas dinâmicas e incentivos para encorajar os usuários a carregar seus veículos em horários específicos.

O *Vehicle-to-Grid* (V2G), por outro lado, é um conceito que permite aos EVs não só consumir energia da rede elétrica, mas também fornecer energia armazenada em suas baterias de volta à rede. Isso pode ser particularmente útil durante os períodos de alta procura ou quando a geração de energia renovável é limitada. O V2G tem o potencial de melhorar a estabilidade e a eficiência da rede elétrica, além de oferecer uma fonte adicional de receita para os proprietários de veículos elétricos.

A integração bem-sucedida dos EVs com as *smart grids* enfrenta diversos desafios e oportunidades. Entre os desafios estão a necessidade de atualizar a infraestrutura de carregamento, garantir a interoperabilidade entre os diferentes sistemas e gerenciar a privacidade e a segurança dos dados dos utilizadores.

Atualmente, o padrão da rede elétrica enfrenta uma mudança gradual devido ao conceito das *Smart Grids*, surgindo com base nas inovações tecnológicas e nas dinamizações da I&D que comprovam a sua viabilidade através da integração de energias renováveis, sistemas de armazenamento de energia e mobilidade elétrica na rede elétrica. Uma das soluções promissoras para um fluxo bidirecional de comunicação consiste na troca de informação, via internet, dos equipamentos ligados à rede elétrica e dos parâmetros da condição da rede elétrica, conceito designado por *internet-of-things* e *internet-of-energy*, respetivamente, que facilita a descentralização da produção da energia elétrica [17], [18].

2.5.1 Smart Charging

O conceito de *Smart Charging* (carregamento inteligente) consiste no carregamento do EV quando existe uma permissão ou necessidade da rede elétrica. Para tal, tem de ser mantida a comunicação entre o EV e a rede elétrica, ao contrário das cargas normais, em que apenas é conectado o veículo ao carregador, tal como é realizado na maioria dos sistemas de carregamento sem o recurso a qualquer sistema de comunicação. Ou seja, o *Smart Charging* de um EV é a possibilidade de alteração por parte de eventos externos do ciclo de carregamento, proporcionando assim ao veículo a integração em todo o sistema de potência de uma maneira muito mais simples [19]. Deste modo, o carregamento inteligente torna o sistema muito mais fiável, facilitando a sua segurança. De qualquer modo, este é um processo motivado pelos *Price Signals*, onde existe uma resposta por parte da carga dos EVs ao tempo de uso e preço da energia por hora, por exemplo, e pelos *Control Signals*, que estão de acordo com as situações do mercado e da rede elétrica [20]. A Figura 15 representa um esquema de *Smart Charging*.

Por conseguinte, o *Smart Charging* apresenta vantagens para os vários intervenientes, permitindo aos [17]:

- 1) Clientes: satisfação, custo reduzidos de energia e valor ecológico;
- 2) Sistema de potência: otimização da geração e capacidade da rede, eficiência de custo, minimização dos custos de reforço da rede e facilidade da integração de fontes de energia renováveis;
- 3) Sociedade: redução das emissões de CO₂ e custos relacionados com estas emissões, aumento da eficiência energética e do bem-estar social.

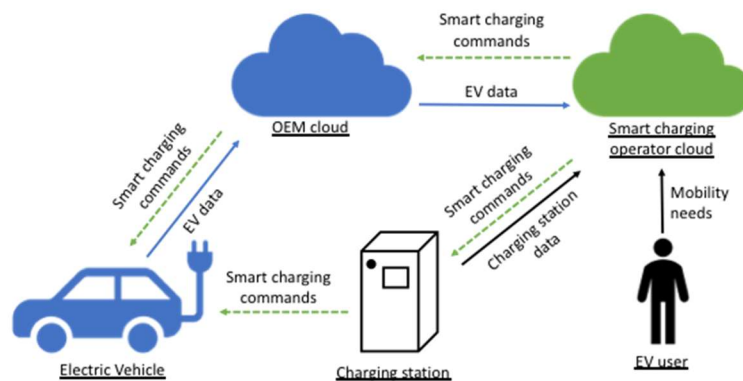


Figura 15 Esquema do *Smart charging* [54].

2.5.2 Vehicle-to-Grid (V2G)

Vehicle-to-Grid (V2G) é o esquema de carregamento mais complexo sendo considerado como uma extensão do *Smart Charging*. Este descreve um sistema onde os EVs comunicam com a rede elétrica para venderem serviços de resposta à procura, quer na devolução de energia à rede quer na limitação da taxa de carregamento. Tendo em conta, que em cada instante cerca de 95% dos veículos estão estacionados, as suas baterias podem ser usadas para fazer fluir a energia do EV para a rede, bem como o processo inverso (carregamento - fluxo de energia da rede para o EV). O esquema V2G pode ser alcançado a partir da descarga através de fluxo de energia bidirecional ou através da modulação da taxa de carga com fluxo de energia unidirecional [21], [22]. Na Figura 16 estão representados os fluxos de energia trocados num sistema V2G.

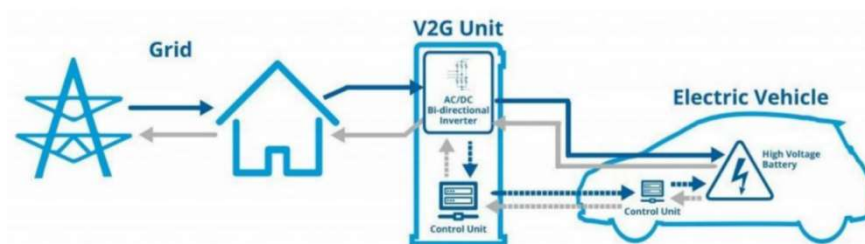


Figura 16 Esquema exemplificativo do V2G [55].

2.5.3 Vehicle-to-Home (V2H)

O carregador com capacidade V2G consegue também ser utilizado numa aplicação V2H, permitindo operar de forma isolada da rede., ou seja, como um sistema de alimentação ininterrupta (UPS).

Um algoritmo PLL (*Phase-Locked-Loop*) monitoriza a fase θ da rede, que numa solicitação externa para uma operação isolada (por exemplo, durante uma interrupção da tensão de alimentação), a fase inicial θ da tensão fornecida é ajustada para garantir uma transição suave. A rede local pode então ser alimentada com uma frequência predefinida (50/60Hz) isolada do resto da infraestrutura da rede. O sistema está neste caso a funcionar como o gerador de formação da rede, sendo responsável por controlar a frequência e a tensão da mesma. O fator de potência, ou potência reativa, é ajustado pelo controlo de tensão (dependendo da carga). Relativamente à sincronização, por exemplo, é necessário que o sinal do controlador indique que a rede elétrica está novamente em pleno funcionamento. Deste modo, o inversor pode mudar do modo isolado da rede (V2H) para o modo de ligação à rede (V2G) ou modo de carregamento (G2V) [23].

A Figura 17 representa um esquema do modo de funcionamento do V2H, também conhecido como modo ilha.

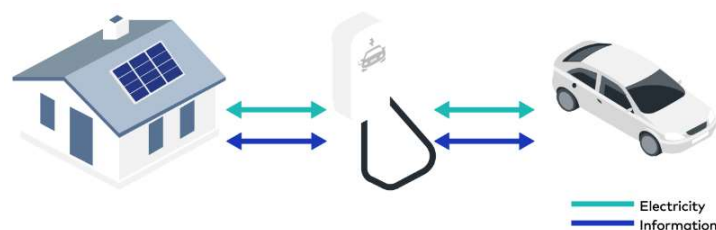


Figura 17 Esquema de funcionamento do V2H [56].

2.5.4 A solução da tecnologia V2G

O V2G é um conceito que permite aos EVs fornecer energia de volta à rede elétrica quando necessário, transformando-os essencialmente em unidades móveis de armazenamento energético. O V2G possui o potencial de auxiliar no combate aos problemas de excesso de procura na rede elétrica futura através de diversas formas:

- Alívio do pico de procura: Os EVs podem ser carregados durante períodos de menor procura, como no período noturno, e descarregar energia de volta à rede em momentos de pico de procura, contribuindo para o equilíbrio de carga na rede elétrica
- Integração de fontes de energia renováveis: O V2G facilita a integração de fontes de energia renováveis, como a eólica e solar, que apresentam uma natureza intermitente. O armazenamento da energia gerada por este tipo de fontes nos EVs e, posteriormente, a sua devolução à rede conforme necessário, pode contribuir para atenuar a variabilidade na produção energética e garantir um fornecimento mais estável e fiável.
- Resposta à procura: O V2G permite que os operadores da rede elétrica utilizem os EVs como fonte flexível de energia para fornecer serviços de resposta à procura. Isto pode contribuir para evitar a necessidade de acionar centrais energéticas adicionais e menos eficientes durante períodos de elevada procura.
- Suporte à estabilidade da rede: Os EVs conectados ao V2G podem ser utilizados para prestar serviços de apoio, como regulação de frequência e reserva operacional, auxiliando na manutenção da estabilidade da rede elétrica.
- Redução dos custos de infraestrutura: Ao permitir o funcionamento dos EVs como unidades de armazenamento energético e forneçam energia de volta à rede, o V2G pode reduzir a necessidade de investimentos adicionais em infraestruturas energéticas, tais como linhas de transmissão e distribuição e centrais elétricas [24].

Em suma, a tecnologia V2G permite que os EVs exportem sua energia não utilizada de volta para a rede para preencher lacunas na geração de energia renovável ou fornecer suporte durante períodos de ponta.

Estima-se que haverá cerca de 200 milhões de EVs na estrada até 2030, a maioria dos quais passará grande parte do tempo conectado a um carregador. Ao utilizar a tecnologia V2G, pode-se pensar nesses veículos como uma “grande bateria” móvel que carrega e descarrega energia em diferentes momentos do dia, de acordo com a procura. Tendo em conta, que a maioria dos EVs carrega durante a noite, o V2G permite a utilização de fontes de energia renovável (não fotovoltaica neste caso) durante períodos em que a procura é pequena e conseqüentemente preparem as suas baterias em plena capacidade para o dia seguinte. Adicionalmente, com o suporte do software V2G incorporado, é possível que os proprietários dos veículos escolham qual a SoC mínima que desejam que seja mantida nos veículos. Deste modo, o veículo está sempre pronto para ser desconectado do carregador, não causando assim nenhum distúrbio aos seus proprietários e contribuindo de forma ativa para a estabilidade da rede [24], [25].

A Figura 18 representa os quadrantes de funcionamento de um carregador unidirecional (Figura 18 (a)) e de um carregador bidirecional (Figura 18 (b)).

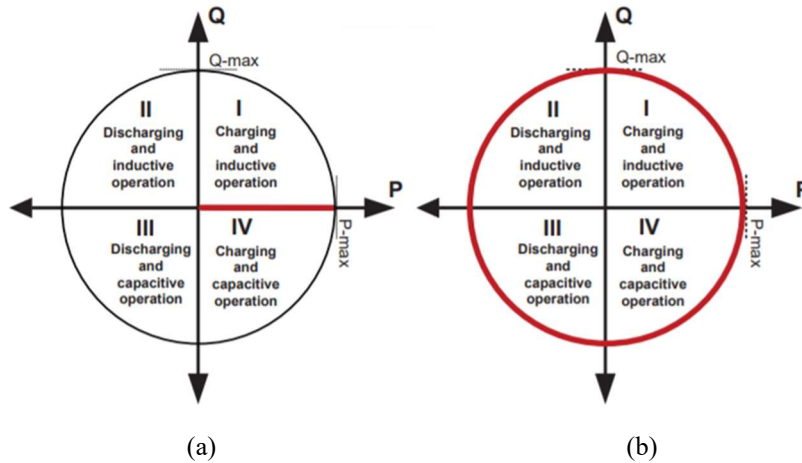


Figura 18 Quatro quadrantes de operação: (a) Carregamento unidirecional; (b) Carregamento bidirecional.

2.6 Carregadores V2G no mercado

O carregador Quasar da Wallbox (Figura 19) foi desenvolvido para transformar os EVs em potentes fontes de energia. Através da sua tecnologia bidirecional, pode carregar e descarregar o veículo, bem como transferir corrente da bateria do veículo para a rede doméstica ou para a rede elétrica pública. Este carregador permite uma potência máxima de 7.4 kW em ambos os sentidos.



Figura 19 Carregador V2G da Wallbox (Quasar)[57].

2.7 Centrais elétricas virtuais

Uma central elétrica virtual ou VPP (*Virtual Power Plant*) representada na Figura 20 é um sistema que combina várias fontes de energia distribuídas, como painéis solares, baterias e geradores eólicos, para agir como uma central elétrica convencional. Esse sistema é composto por diversas unidades geradoras de energia, como pequenas centrais hidroelétricas, painéis solares fotovoltaicos, sistemas eólicos, entre outros.

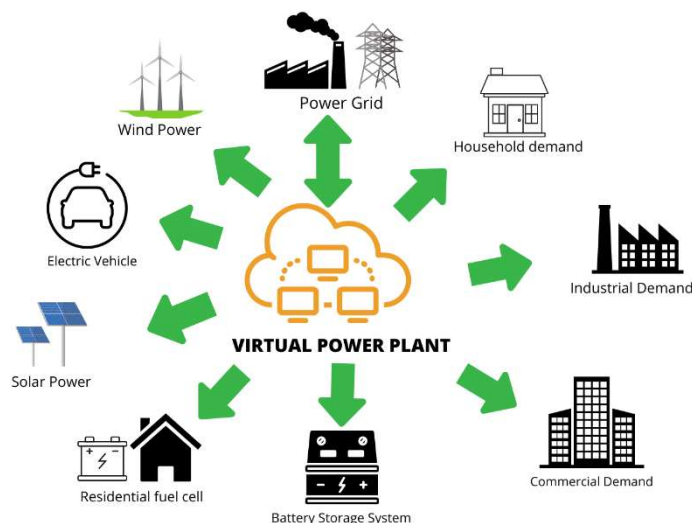


Figura 20 *Virtual power plant*.

A VPP usa tecnologia de gestão de energia inteligente para monitorizar e controlar remotamente essas fontes de energia distribuídas e fornecer energia suave e confiável aos clientes. Essa tecnologia permite que a VPP otimize a produção de energia de acordo com as necessidades, ou seja, ela pode aumentar ou diminuir a produção de acordo com a procura.

Isso pode ajudar a aumentar a eficiência energética, pois a VPP pode agregar a produção de diversas fontes de energia gerando energia limpa e renovável, diminuindo a necessidade de usar fontes de energia poluentes. Além disso, a VPP pode reduzir a dependência de fontes de energia centralizadas, o que pode aumentar a segurança energética, pois o sistema não fica dependente de uma única fonte de energia, e pode ser usado para suprir a falta de energia em caso de falha em uma central elétrica convencional.

A VPP também pode ser usada para armazenar energia, usando baterias, por exemplo, e fornecer energia quando a procura é alta, ou quando há interrupções na rede elétrica. Isso pode ajudar a estabilizar a rede elétrica e aumentar a segurança energética.

Além disso, as VPPs também podem ser utilizadas para ajudar a integrar fontes de energia renováveis na rede elétrica, garantindo que essas fontes de energia sejam usadas de maneira eficiente e económica.

2.7.1 Carregador de EV como VPP

Um carregador de EV pode ser parte de uma VPP, através da integração e coordenação com outros recursos energéticos distribuídos, especialmente ao considerar o papel importante do V2G nesse contexto.

Para que um carregador de EV faça parte de uma VPP, utilizando a capacidade do V2G, é necessário que ele cumpra alguns requisitos:

- **Conectividade e comunicação:** Os carregadores de EV devem estar conectados a uma plataforma de gestão da VPP, permitindo a comunicação bidirecional e o controle remoto. Essa conectividade é fundamental para monitorizar o estado do carregador, a quantidade de energia armazenada nos veículos e para enviar comandos de carga e descarga, viabilizando a implementação do V2G.
- **Controlo inteligente da carga e V2G:** Os carregadores de EV devem ser capazes de gerenciar de forma inteligente o processo de carga e descarga dos veículos, ajustando a taxa de carga com base em sinais da VPP e possibilitando a devolução de energia à rede por meio do V2G. Isso inclui a capacidade de realizar carregamento lento em momentos de baixa procura ou quando a geração de energia renovável é abundante e por outro lado interromper, reduzir ou até reverter a carga em momentos de alta procura ou escassez de geração.
- **Armazenamento de energia e V2G:** Os veículos elétricos conectados aos carregadores funcionam como dispositivos de armazenamento de energia, permitindo que a VPP gerencie a energia armazenada e a utilize para fornecer serviços à rede elétrica, como alívio de picos de procura, integração de fontes renováveis e estabilização da rede, tirando proveito do V2G.
- **Agregação de recursos:** A VPP deve ser capaz de agregar e gerenciar múltiplos carregadores de EV com capacidade V2G, bem como outros recursos energéticos distribuídos, como painéis solares, baterias estacionárias e turbinas eólicas. A combinação desses recursos pode criar um sistema mais resiliente, flexível e eficiente.
- **Participação em mercados de energia e serviços auxiliares com V2G:** A VPP pode permitir que os carregadores de EV, utilizando a tecnologia V2G, participem de mercados de energia e serviços auxiliares, como resposta à procura, reserva operacional e regulação de frequência. Isso pode gerar receita adicional e melhorar a eficiência e a estabilidade da rede elétrica [26].

2.8 Comunicação entre carregadores (OCPP)

O OCPP (*Open Charge Point Protocol*) é um protocolo de comunicação aberto para gestão de estações de carregamento de EVs que permite a integração de diferentes fabricantes de estações de carregamento e fornecedores de serviços de carregamento, independentemente da tecnologia utilizada. Ele é baseado em uma arquitetura cliente-servidor e foi projetado para ser escalável e seguro. O OCPP é uma solução para o desafio de interoperabilidade entre diferentes fabricantes de carregadores e diferentes sistemas de gestão de carregamento, o que é fundamental para expandir o uso de veículos elétricos.

Este protocolo é composto por diferentes mensagens e comandos, que permitem a comunicação entre a estação de carregamento e o sistema central que controla o fluxo de energia. Estas mensagens e comandos são utilizados para garantir que a estação de carregamento e o sistema central possam comunicar de maneira eficiente e com nível de sucesso elevado. Além disso, OCPP permite a integração das estações de carregamento com outros sistemas, como sistemas de geração distribuída, sistemas de armazenamento de energia e sistemas de gestão de procura.

Em relação ao *smart charging*, o OCPP permite que as estações de carregamento sejam monitorizadas e controladas remotamente, o que é essencial para otimizar a gestão da carga dos veículos elétricos. Ele permite a programação de carregamento para períodos de baixa procura, o que pode ajudar a equilibrar a carga na rede elétrica e evitar o aumento dos custos de geração de energia. Além disso, permite a integração de baterias de veículos elétricos como fonte de armazenamento de energia, permitindo usar a energia armazenada para carregar os veículos elétricos quando necessário.

Em relação às VPPs, a comunicação OCPP permite que as estações de carregamento sejam integradas e monitorizadas pelo sistema central, permitindo otimizar a geração de energia de acordo com as necessidades do mercado e garantir que haja suficiente energia disponível para carregar os veículos elétricos quando eles precisam ser carregados. Isso pode incluir aumentar ou diminuir a produção de energia de fontes renováveis, como painéis solares ou geradores eólicos, ou usar baterias para armazenar energia para uso posterior. Além disso, o OCPP permite a integração das estações de carregamento com outros sistemas, como sistemas de geração distribuída, sistemas de armazenamento de energia e sistemas de gestão de procura, permitindo a integração de diferentes tecnologias e sistemas para melhorar a eficiência e segurança do sistema elétrico.

Em resumo, o OCPP é um protocolo de comunicação aberto e escalável para gestão de estações de carregamento de veículos elétricos que permite a integração de diferentes fabricantes de estações de carregamento e provedores de serviços de carregamento, independentemente da tecnologia utilizada. Ele permite a comunicação eficiente e confiável entre a estação de carregamento e o sistema central, além de permitir a integração com outros sistemas, contribuindo para o aumento da eficiência, segurança e expansão do uso de veículos elétricos.

2.9 Conversores de Eletrônica de Potência

O constante desenvolvimento tecnológico na área da eletrônica de potência fez com que fosse possível a bidirecionalidade de recursos de baixa potência com a rede elétrica (como carregadores com potências inferiores a 10 kW).

Com o passar dos anos os fabricantes de EVs tem vindo a apostar cada vez em novas formas de transferir energia, não só da rede para o veículo (G2V), mas também do veículo para a rede (V2G). Ou seja, com recurso a conversores bidirecionais os EVs passam a estar habilitados, através da tecnologia Plug-In, à carga normal das suas baterias a partir da rede elétrica (G2V) ao mesmo tempo que têm a capacidade de devolver energia para a rede quando necessário, isto é, em horas em que o veículo não esteja a ser utilizado e em que haja um consumo mais elevado de energia elétrica (V2G). Para tal ser possível recorre-se a carregadores que possuem conversores de eletrônica de potência bidirecionais permitindo o fluxo bidirecional de energia, funcionando em dois modos de operação:

- Retificador no modo de carga: Consumir corrente sinusoidal e em fase com a tensão da rede elétrica de modo a evitar harmónicos de corrente e garantindo um fator de potência unitário.
- Inversor no modo de descarga: Fornecer uma corrente praticamente sinusoidal com reduzido conteúdo harmónico e em fase com a tensão da rede elétrica.

Nesta secção são abordadas topologias de conversores DC-DC e DC-AC bidirecionais, assim como teorias de controlo, técnicas de modulação e de controlo de corrente aplicáveis neste tipo de conversores.

2.9.1 Conversor DC-DC Buck-Boost (*Half-Bridge*)

O conversor DC-DC bidirecional *buck-boost* (*half-bridge*), representado na Figura 21, é o conversor DC-DC bidirecional não isolado mais utilizado. Este conversor permite a operação como *buck* (em que a fonte de alimentação é ligada no barramento de tensão v_{dc1} e a carga ao barramento de tensão v_{dc2}) ou como *boost* (em que a fonte de alimentação é ligada no barramento $dc2$ e a carga ao barramento $dc1$), i.e., em modo bidirecional. Para operar como *buck* são usados o IGBT S1 e o diodo antiparalelo do IGBT S2, enquanto para operar como *boost* são usados o IGBT S2 e o diodo antiparalelo do IGBT S1. Durante o modo de operação como conversor *buck*, S2 está sempre *off*, quando o S1 está *off* a tensão aos seus terminais de S1 é $+v_{dc1}$ V e quando está *on* a tensão é 0 V. Durante o modo de operação como conversor *boost* o IGBT S1 está sempre *off*, quando o IGBT S2 está *off* a tensão aos terminais de S2 é $+v_{dc1}$ V e quando o IGBT S2 está *on* a tensão é nula [27], [28].

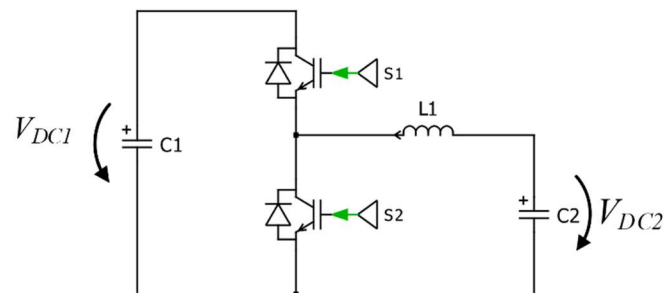


Figura 21 Conversor DC-DC *buck-boost* não isolado.

2.9.2 Conversor DC-DC Full-Bridge Isolado

O conversor *Dual Active Bridge* (Figura 22) é uma configuração bidirecional DC-DC constituído por uma ponte completa no lado primário e uma ponte completa no lado secundário, um transformador de alta frequência, um indutor de transferência de energia e um barramento DC de condensadores.

Os braços de ambas as pontes completas são controladas por impulsos de ondas quadradas complementares. O fluxo de energia no *Dual Active Bridge* (DAB) pode ser controlado através da mudança de fase dos impulsos de uma ponte em relação à outra. O controlo direciona a potência entre os dois barramentos DC de tal forma que a ponte principal fornece energia à ponte secundária e vice-versa. As ondas quadradas aplicadas às pontes criam um diferencial de tensão através da indutância de transferência de energia e direcionam a sua energia armazenada [29], [30].

Uma grande vantagem do DAB é o facto de este conter isolamento galvânico. Isso significa que o DAB isola o secundário e o primário através do seu transformador, o que é importante em aplicações em que é necessário evitar a passagem de corrente de continuidade entre os circuitos, como no caso do carregamento de veículos eléctricos.

Além disso, o DAB também pode ser projetado para operar em modo de interconexão. Isso permite que o DAB seja conectado a outros conversores e sistemas de armazenamento de energia para formar uma rede de geração de energia. Isso é útil em aplicações de geração distribuída, onde a energia é gerada localmente e distribuída para a rede eléctrica.

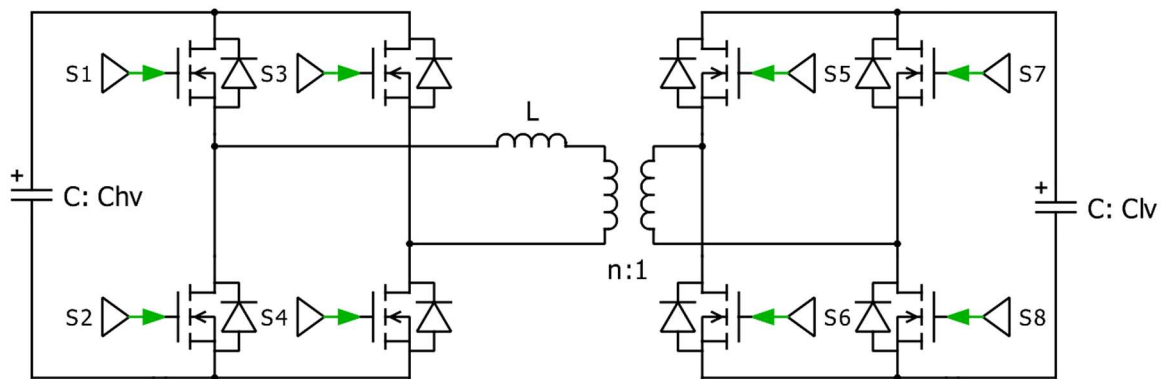


Figura 22 Conversor Dual Active Bridge.

2.9.3 Conversor DC-AC trifásico de 2 níveis

Os conversores fonte de tensão (*Voltage Source Converters – VSC*) possuem no barramento DC um elemento armazenador de energia, capaz de manter o nível de tensão praticamente constante. Na Figura 23, encontra-se representado o esquema elétrico de uma conversor fonte de tensão trifásico, a MOSFETS. Cada MOSFET contém um diodo de *free-wheeling* em antiparalelo, com o objetivo de criar um caminho para as correntes reversas, permitindo que esta configuração seja capaz de operar em modo bidirecional, isto é, permite o fluxo de energia nos dois sentidos.

Este conversor é um elemento crucial integrante de um carregador com capacidade bidirecional, uma vez que permite o fluxo de energia nos dois sentidos.

Este tipo de conversor é utilizado num vasto leque de aplicações, entre as quais se destacam: os variadores de velocidade para motores (*Adjustable Speed Drives – ASDs*); os UPSs; os sistemas de armazenamento de energia; os filtros ativos de potência e interfaces de fontes de energia renovável com a rede elétrica [31].

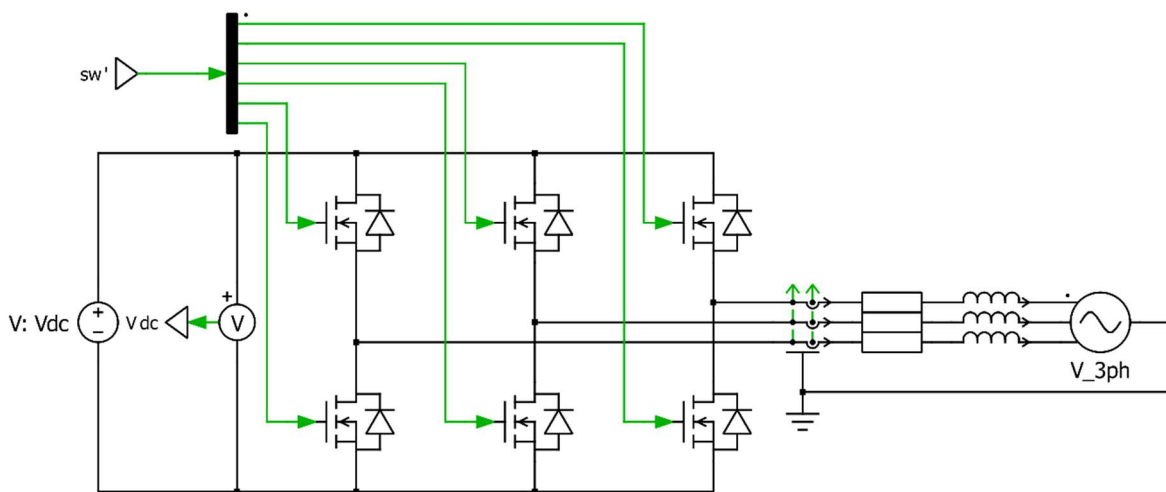


Figura 23 Conversor DC-AC trifásico de ponte completa.

2.9.4 Conversor DC-AC trifásico *Neutral-Point-Clamped*

O conversor multinível *Neutral-Point-Clamped* (NPC) é composto por um braço de semicondutores para cada fase, ligados a uma fonte de corrente contínua, mais um diodo no ponto médio, de modo a possibilitar o nível de tensão nulo.

A Figura 24 representa o esquema elétrico de um conversor NPC de 3 níveis, este é composto por três grupos de diodos ligados ao ponto neutro, e três braços - cada um com quatro IGBT's associados com um diodo em antiparalelo. Os semicondutores controlam o fluxo de energia trocada entre um sistema trifásico e o barramento DC. O conversor é designado por conversor de 3 níveis, pois cada braço pode disponibilizar três valores de tensão distintos de acordo com as combinações possíveis dos estados dos semicondutores de comutação [32], [33].

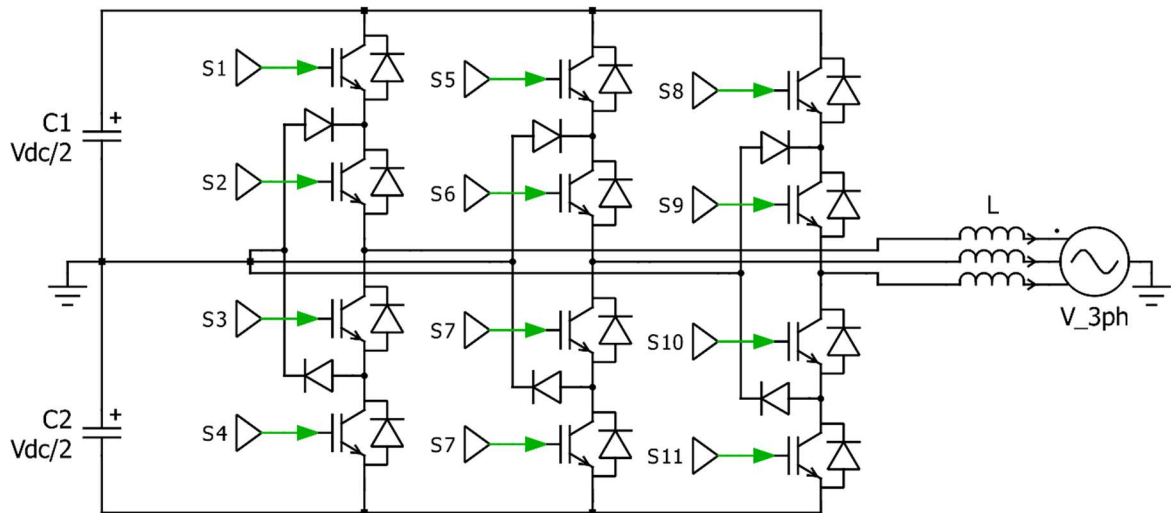


Figura 24 Conversor NPC de 3 níveis.

As funções dos inversores conectados à rede dependem da aplicação, do tipo de conexão à rede elétrica e recursos de energia distribuída. São aplicados diferentes esquemas de controle para atingir diferentes objetivos. As funções dos inversores conectados à rede podem ser classificadas em três categorias: funções básicas, funções específicas e funções de suporte à rede [34].

2.9.5.1 Funções básicas

No que diz respeito aos sistemas de armazenamento de energia e funções auxiliares dos inversores conectados à rede (*ancillary services*), quase todos têm a necessidade de possuir funções básicas, tais como:

- Recursos de sincronização da rede (PLL);
- Controle de tensão do barramento DC;
- Controle da corrente para a rede.

Essas funções correspondem aos papéis fundamentais dos inversores conectados à rede como unidades de alimentação da rede para converter a energia produzida pelos recursos de energia distribuída em energia AC com fator de potência unitário. A sincronização da rede inclui uma detecção da tensão da rede elétrica trifásica no ponto de acoplamento comum. Um algoritmo PLL com oscilador interno (modelo matemático) é uma técnica comum utilizada na sincronização da rede de modo a detectar a frequência e o ângulo da fase [34]. O controle da tensão do barramento DC é necessário de modo a regular a variação na tensão do barramento que é causada por variações na potência média bem como oscilação da potência instantânea devido a perturbações na rede. A capacidade de controle de corrente é necessária quando os inversores conectados à rede operam de modo a atender aos requisitos da rede. De acordo com a IEEE 1547, a distorção total da harmônica da corrente injetada deve ser inferior a 5%.

2.9.5.2 Funções específicas

Quanto ao nível secundário das funções de um inversor conectado à rede estas dizem respeito a funções de cariz específico a certas aplicações. Além das funções básicas, os inversores conectados à rede possuem algoritmos de controlo diferentes de acordo com as diferentes aplicações a que podem ser aplicados. Primeiro, no caso de um sistema fotovoltaico, as funções dos inversores conectados à rede incluem algoritmos de deteção do ponto de potência máxima (MPPT) que permitem melhorar a eficiência do sistema extraíndo a potência máxima das fontes fotovoltaicas durante o seu *steady-state*, e mudanças rápidas na luminosidade do meio. Além disso, a função *anti-islanding* é necessária de modo a permitir desligar e proteger os dispositivos em caso de falhas na rede.

No sistema de produção de energia eólica, a capacidade de controlo da potência do conversor do lado do gerador é necessária para funções de maximização e limitação de potência [34].

A capacidade de obter um fluxo de potência bidirecional deve ser alcançada para aplicações em sistemas de armazenamento de energia. Os inversores conectados à rede para este tipo de aplicação têm capacidade de carga e descarga do seu sistema de armazenamento anexo, usando controlo de tensão ou controlo de corrente.

Este tipo de inversores bidirecionais, por exemplo em aplicações de micro redes são classificados em três unidades: unidades de alimentação da rede, formação de rede e unidades de suporte à rede de acordo com o modo de operação [12].

2.9.5.3 Funções de suporte à rede

As funções anteriores explicadas são passivas à perturbação da rede, o que significa que os inversores conectados à rede passam pela perturbação e não compensam de maneira ativa. Os inversores conectados à rede podem ter funções de suporte à rede para fornecer compensação e regulação para a rede elétrica. Particularmente, os inversores conectados à rede utilizados para melhoria da qualidade de energia da rede são definidos como inversores multifuncionais, que são uma combinação de inversor e dispositivo de condicionamento de qualidade de energia. Esses dispositivos, quando conectados, possuem uma variedade de funções para diferentes perturbações da rede e são capazes de atuar como compensador síncrono estático, condicionadores unificados de qualidade de energia e filtros ativos.

As funções de suporte à rede incluem compensação de tensão, compensação de potência reativa, compensação de frequência, compensação harmónica e mitigação de variados problemas de QEE [35].

2.9.6 Teoria P-Q

A teoria P-Q é uma abordagem utilizada para otimizar o fluxo de potência em sistemas elétricos. Ela se baseia na representação da potência ativa (P) e reativa (Q) como duas grandezas independentes, controla essas grandezas de maneira a maximizar a eficiência e a fiabilidade do sistema elétrico.

A potência ativa (P) é a potência real que é utilizada pelos equipamentos elétricos, enquanto a potência reativa (Q) é a potência que é armazenada e emitida nas indutâncias e capacidades dos equipamentos elétricos. A potência reativa é necessária para gerar o campo magnético que permite a transferência de potência ativa, mas ela não tem qualquer utilidade prática.

A teoria P-Q permite que os sistemas elétricos sejam monitorizados e controlados de maneira a maximizar a eficiência e a fiabilidade, o que pode incluir:

1. Equilibrar a carga na rede elétrica para evitar o aumento dos custos de geração de energia
2. Controlar a potência reativa para evitar problemas de estabilidade e proteção
3. Integrar fontes de energia renováveis, como painéis solares e geradores eólicos, para aumentar a eficiência e reduzir a emissão de gases de efeito estufa
4. Integrar sistemas de armazenamento de energia, como baterias, para melhorar a fiabilidade e a flexibilidade do sistema elétrico.
5. Controlar a potência ativa e reativa de cada dispositivo conectado a rede elétrica para garantir que eles operam dentro de suas especificações e limites de segurança.
6. Identificar e solucionar problemas de qualidade de energia, como distorções harmônicas e *flicker*, para garantir que os dispositivos elétricos funcionem de maneira adequada e segura.

A teoria P-Q é amplamente utilizada em sistemas elétricos de alta tensão, incluindo redes de distribuição e transmissão, e é uma ferramenta importante para garantir a segurança, fiabilidade e eficiência dos sistemas elétricos. A integração de carregadores de veículos elétricos e VPPs com a teoria P-Q permite otimizar o uso da rede elétrica e garantir que haja suficiente energia disponível para carregar os veículos elétricos de maneira eficiente e segura.

Esta teoria consiste, inicialmente, na transformação das tensões instantâneas (v_a, v_b, v_c) e das correntes (i_a, i_b, i_c) do sistema de coordenadas a - b - c para o sistema de coordenadas α - β - 0 , através das equações (1) e (2), respetivamente [36], [37].

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Após os resultados das equações anteriores é possível efetuar-se o cálculo da potência real instantânea (p), da potência imaginária instantânea (q) bem como da potência de sequência zero instantânea (p_0), através da equação (3).

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

As potências instantâneas obtidas também podem ser decompostas na sua componente média e na sua componente alternada aplicando as seguintes equações:

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (4)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (5)$$

$$p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \quad (6)$$

Na Figura 25 . estão representados os fluxos das potências utilizadas na teoria p - q , trocadas num sistema elétrico trifásico.

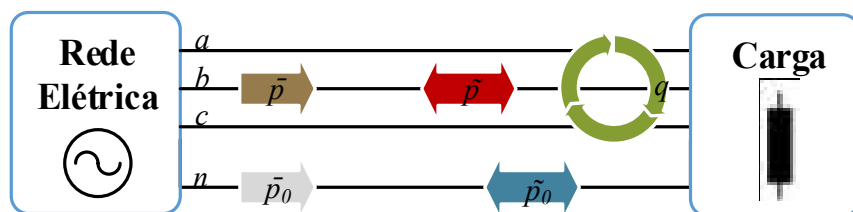


Figura 25 Potências da teoria p - q em fluxo num sistema trifásico.

Os conversores com capacidade de armazenamento de energia elétrica terão então um grande impacto no suporte à produção de energias renovável e postos de carregamento, na suavização de consumos de pico, suporte à geração fóssil (por exemplo, geradores a diesel), reserva de emergência de modo a mitigar um cenário de falta de energia. Um exemplo de aplicação de suavização fotovoltaica é o uso destes conversores com recursos de suporte à rede, em conjunto com os controlos de potência reativa e ativa.

Os conversores com capacidade de armazenamento de energia monitoram os desvios de tensão e frequência da rede de modo a manipular do fluxo de potência ativa e reativa no modo de alimentação/carga da rede, usando os dois métodos propostos a seguir, $P(f)$ e $P(f) - Q(v)$. Através da teoria P - Q é possível descobrir qual a corrente necessária a injetar na rede para corrigir uma queda na frequência, bem como o consumo necessário no caso de um excesso de frequência [12], [35].

2.9.7 STATCOM

O STATCOM (*Static Synchronous Compensator*) é um dispositivo de compensação de potência reativa que se baseia em tecnologia de conversão de energia, composto por um inversor síncrono controlado VSC (*Voltage Source Converter*) e um sistema de armazenamento de energia. Ele é projetado para melhorar a estabilidade e qualidade de energia em sistemas elétricos de alta tensão, através do monitoramento e controlo da potência reativa injetada na rede elétrica.

O funcionamento do STATCOM é baseado na capacidade de controlar a potência reativa injetada na rede elétrica, permitindo o ajuste da tensão e estabilidade da rede. Para além disso, pode ser utilizado para controlar a potência ativa injetada na rede, permitindo-o funcionar como uma fonte de energia elétrica.

O STATCOM é capaz de melhorar a qualidade de energia, corrigindo problemas de distorção harmónica e *flicker*, bem como é utilizado para a integração de fontes de energia renováveis e gestão de procura, aumentando desta forma a fiabilidade e segurança do sistema eléctrico. É uma tecnologia fundamental para o desenvolvimento de sistemas eléctricos inteligentes e flexíveis, e é amplamente utilizada em aplicações de compensação de potência em sistemas eléctricos de alta tensão.

Uma configuração típica do STATCOM consiste em VSCs multinível, um detetor de fase (PLL) e um transformador elevador. A potência reativa é fornecida ou absorvida produzindo uma forma de onda de tensão interna controlada.

A maioria dos STATCOMs disponíveis no mercado operam como corretores de fator potência e requerem uma referência de tensão para operar. A forma de onda da tensão é ajustada em resposta à referência de tensão.

Em geral, os STATCOMs operam como dispositivos controlados por corrente alternada, embora o controlo da corrente de saída seja realizado através da regulação da tensão interna do dispositivo em amplitude, enquanto o defasamento é próximo de 90° em relação à tensão na rede. Se a amplitude da tensão do STATCOM for maior que a amplitude da tensão da rede, é fornecida à rede potência reativa [14], [38].

2.10 Técnicas de modulação

O modo de controlo destes semicondutores é feito com recurso a modulações por largura de impulso (*Pulse Width Modulation* - PWM), em conversores convencionais. No entanto, de maneira a resolver as complexidades derivadas do aumento dos níveis de tensão, bem como equilíbrio dos níveis de tensão nos condensadores, surgiram diferentes técnicas de controlo dos semicondutores. De seguida, são apresentadas as técnicas de modulação PWM mais comuns e as que foram consideradas mais relevantes para o conversor em estudo.

2.10.1 Modulação PWM sinusoidal

A técnica de modulação PWM sinusoidal é a mais típica e conhecida. Nesta técnica, a referência de tensão AC sinusoidal é comparada com a onda portadora triangular de alta frequência em tempo real para determinar os estados de comutação para cada semicondutor do conversor. Após a comparação, os estados de comutação para cada semicondutor podem ser determinados de acordo com [39]:

- Se a onda de referência for superior à onda portadora, semicondutor ON;
- Se a onda de referência for inferior à onda portadora, semicondutor OFF.

Na Figura 26 esquematiza as formas de onda dos sinais de referência (v_{refA} , v_{refB} , v_{refC}), da onda portadora triangular (v_{port}), da tensão de saída de cada comparador (v_{compA} , v_{compB} , v_{compC}), que corresponde ao sinal de comando da *gate* do IGBT superior de cada braço, e por último, da tensão de saída do conversor antes e depois de ser filtrada. Caso o sinal de referência seja superior à onda portadora, a tensão de saída do comparador (v_{comp}) toma o valor alto, caso contrário, toma o valor baixo.

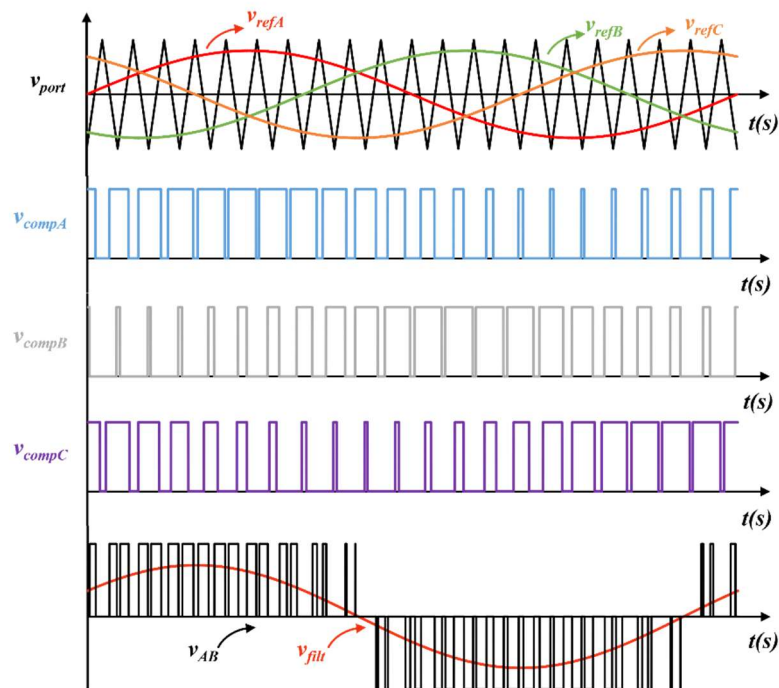


Figura 26 Princípio de operação da técnica de modulação SPWM.

2.10.2 Modulação *Space Vector PWM*

O SVPWM (*Space Vector Pulse Width Modulation*) é uma técnica de modulação utilizada para controlar a potência elétrica em sistemas elétricos de alta tensão. Ele é uma variação da modulação PWM (*Pulse Width Modulation*) e utiliza vetores de espaço para selecionar as fases elétricas que devem ser ativadas.

O funcionamento do SVPWM é baseado na representação gráfica da tensão elétrica em um espaço tridimensional, onde as coordenadas x, y e z representam as componentes das fases A, B e C, respetivamente. A tensão elétrica é representada por um vetor no espaço tridimensional, e o objetivo é selecionar o vetor que representa a tensão desejada para ser injetada na rede elétrica.

Para isso, o SVPWM utiliza uma técnica chamada decomposição de Park, que consiste em decompor o vetor de tensão desejado em três componentes ortogonais, que correspondem às fases A, B e C. Essas componentes são usadas para controlar os inversores síncronos, que injetam a tensão desejada na rede elétrica.

A principal vantagem do SVPWM em relação à modulação SPWM é que ele permite uma melhor utilização da potência elétrica e uma redução no nível de distorção harmônica. Além disso, ele também é capaz de controlar a potência ativa e reativa injetada na rede elétrica, permitindo uma otimização mais precisa do sistema.

A técnica de modulação SVPWM tornou-se numa técnica de modulação popular para inversores trifásicos (VSI) em aplicações como controlo de motores síncronos AC de indução e de ímanes permanentes.

A técnica de modulação SVPWM é a representação vetorial no plano $\alpha\beta$ de Concórdia de cada tensão trifásica de saída do conversor, consoante as combinações possíveis dos estados dos semicondutores.

Considerando conversor trifásico representado Figura 23 existem diversas combinações, consoante os níveis possíveis para tensão de saída de cada braço. Assim sendo, as tensões de saída do inversor serão caracterizadas por V_α e V_β . No caso do inversor trifásico tem-se $-v_{dc}$, 0, v_{dc} , e o número total de estados possíveis será $2^3 = 8$ [4].

A equação (7) representa a transformada de Clarke que realiza a transformação das tensões do sistema de coordenadas a-b-c para o eixo de coordenadas α - β .

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

Na Figura 27 é possível visualizar o mapa de vetores de um inversor trifásico, com as combinações de semicondutores.

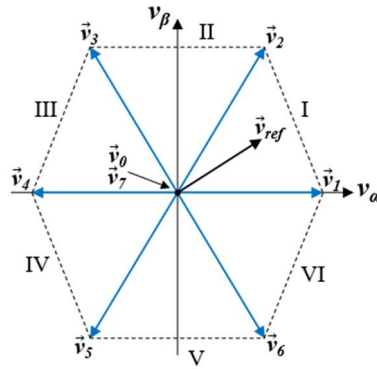


Figura 27 Mapa vetorial de um inversor trifásico.

Esta técnica de modulação vai controlar o conversor de maneira a obter um determinado vetor. Note-se que, no caso de não ser um vetor possível, ou seja, não estar no grupo de combinações possíveis, a modulação seleciona o vetor possível mais próximo [40].

$$\vec{v}_{ref} = \frac{t_0}{T_S} \vec{v}_0 + \frac{t_1}{T_S} \vec{v}_1 + \dots + \frac{t_7}{T_S} \vec{v}_7 \quad (8)$$

2.10.3 Modulação *Phase Shift PWM*

O *phase shift* PWM é uma técnica de modulação de largura de pulso que consiste em deslocar o início de cada pulso de modulação em relação aos pulsos anteriores. Isso permite que as diferentes fases da onda sejam controladas de maneira independente, o que resulta em numa melhor eficiência e menor *ripple* (ondulação) na saída. Essa técnica é frequentemente usada em inversores de frequência, conversores DC-DC e controladores de velocidade de motores elétricos.

Na Figura 28 encontram-se representadas dois sinais PWM aplicados a semicondutores integrantes de uma configuração *dual active bridge*. Note-se que um dos semicondutores se encontra localizado no lado primário do transformador enquanto o outro se encontra no lado secundário, pois apenas existe desfasamento entre os dois lados do transformador.

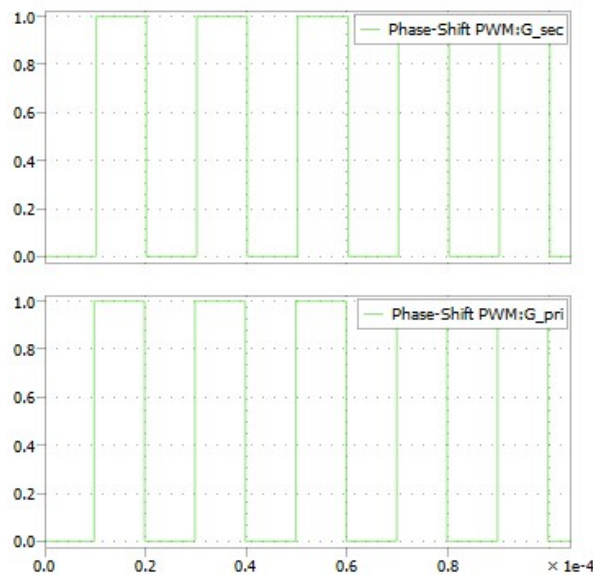


Figura 28 Exemplo de modulação *Phase Shift* PWM.

2.11 Técnicas de controlo

As técnicas de controlo de corrente têm a função de produzir na saída do conversor uma corrente o mais próxima possível da corrente de referência. Esta técnica tem como objetivo otimizar o funcionamento dos conversores, baixar a distorção harmónica da corrente, obter uma resposta dinâmica rápida e regular a tensão do barramento DC [41].

2.11.1 Controlo PID

Um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) é um sistema de controlo de malha fechada que é usado para regular a saída de um processo em relação a uma entrada de referência. É amplamente utilizado em diversas áreas, desde a indústria até a robótica e automação, para controlar variáveis como temperatura, velocidade, pressão, entre outras [42].

O controlador PID calcula um sinal de controlo para o processo com base na diferença entre o valor atual da variável controlada ("*process variable*" ou PV) e o valor desejado ("*setpoint*" ou SP). O sinal de controlo é então aplicado ao processo para ajustar a variável controlada e, assim, reduzir a diferença entre o PV e o SP.

O controlador PID tem três componentes principais: o componente Proporcional, Integral e Derivativo. Cada um desses componentes contribui para o cálculo do sinal de controlo de maneira diferente.

Em conjunto, os componentes P, I e D formam o algoritmo PID. O algoritmo calcula o sinal de controlo a partir de uma combinação ponderada dos três componentes, em que o peso de cada componente é determinado pelos parâmetros de ganho (K_p , K_i e K_d) ajustados pelo usuário. Esses parâmetros devem ser ajustados cuidadosamente para cada aplicação, a fim de obter um desempenho ideal do controlador PID.

O modo de funcionamento deste tipo de controlo encontra-se representado no diagrama de blocos da Figura 29.

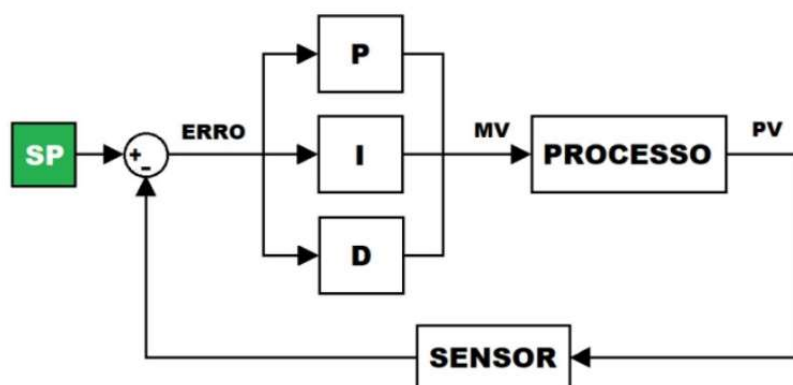


Figura 29 Diagrama de blocos controlo PID [58].

2.11.1.1 Componente proporcional

Existe um limite máximo e mínimo para aplicação do sinal de MV por motivos de restrição de ordem física e segurança: esta faixa de operação é chamada de Banda Proporcional. Se o sinal de controlo opera fora dos limites, diz-se que está saturado e opera com comportamento não linear. Quanto maior for o valor da ação Proporcional, menor será a Banda Proporcional e maior a energia de controlo. Isto faz com que o sistema responda com maior agilidade, contudo o sinal de saída pode ultrapassar ou ficar abaixo do setpoint em regime permanente, e o erro nunca será anulado completamente.

A Figura 30 ilustra o funcionamento da componente proporcional.

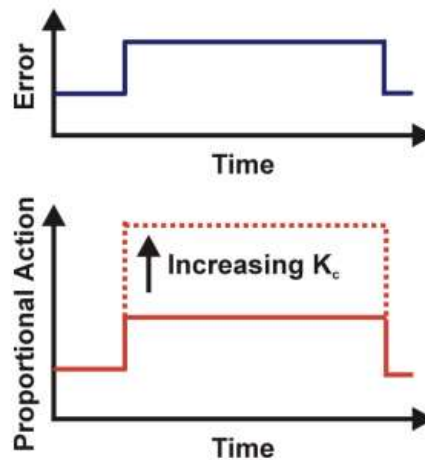


Figura 30 Ganho proporcional [59].

2.11.1.2 Componente integral

O controlo integral age sobre a saída de controlo MV enquanto existir um erro e a sua contribuição cresce com o passar do tempo visando eliminar este offset.

No controlo proporcional quando o erro é pequeno o valor da saída $MV(p)$ é insuficiente para eliminar o offset, mas a ação do controlo integral pode eliminar o offset mesmo com um erro muito pequeno, pois a sua ação cresce com o tempo aumentando continuamente o valor da saída $MV(i)$ enquanto existir um erro.

O tempo que o controlador I precisa ficar agindo para que sua saída atinja o mesmo valor proporcionado pela saída do controlador P a um determinado erro é chamado de T_i , que é o tempo em que $MV(i)$ repete o valor de $MV(p)$, por isso em muitos controladores, T_i é expresso em repetições por minuto.

A Figura 31 ilustra o funcionamento da componente integral.

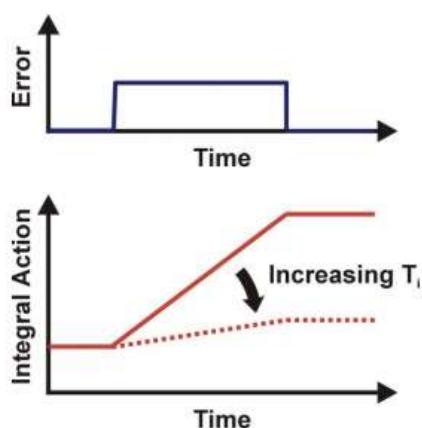


Figura 31 Ganho integral [59].

2.11.1.3 Componente derivativa

O processo de controlo normalmente apresenta uma inércia em relação às modificações na MV, ou seja, o tempo que uma modificação na entrada do processo demora a provocar uma modificação na saída.

A ação Derivativa antecipa a ação de controlo para que o processo reaja de maneira mais célere. Esta ação preditiva aumenta a estabilidade relativa do sistema e torna a resposta mais rápida e menos oscilatória conforme for o tempo derivativo. Em regime permanente esta ação será nula porque o valor de erro será constante.

A Figura 32 ilustra o funcionamento da componente derivativo.

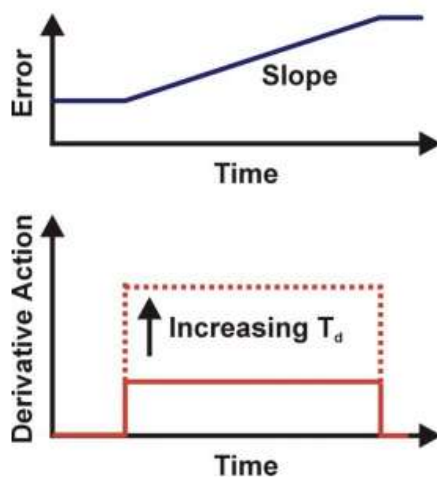


Figura 32 Ganho derivativo [46], [59].

2.11.1.4 Componente *feedforward*

Além dos três componentes principais do algoritmo PID (P, I e D), existe uma outra técnica de controlo que pode ser usada em conjunto com o PID, chamada de *feedforward* (ou preditivo). A ideia do *feedforward* é utilizar informações adicionais para ajustar a saída do controlador antes mesmo que a perturbação ocorra, com o objetivo de minimizar o erro na saída.

O *feedforward* é baseado em um modelo matemático que descreve como o sistema deve responder a uma entrada. Esse modelo é utilizado para calcular um sinal de controlo preditivo que é adicionado à saída do controlador PID. O objetivo do sinal é compensar as variações na saída causadas por perturbações no sistema antes mesmo que elas ocorram.

Por exemplo, numa aeronave não tripulada a componente *feedforward* pode induzir um ganho na saída do controlador PID proporcional ao setpoint, desta maneira a saída tem uma resposta mais rápida, pois não tem de esperar pelo processamento inicial do controlador PID.

A implementação do *feedforward* pode ser realizada de várias formas, dependendo da aplicação e das informações disponíveis. Algumas formas comuns incluem a utilização de modelos matemáticos do processo, a utilização de sensores adicionais para medir variáveis importantes, ou a utilização de dados históricos para prever a resposta do sistema a determinadas perturbações.

A combinação do controlador PID com o *feedforward* pode melhorar significativamente o desempenho do sistema de controlo, reduzindo a latência, o erro, e aumentando a eficiência. No entanto, a sua implementação também pode ser mais complexa do que o PID tradicional e pode exigir uma análise cuidadosa do sistema para determinar a melhor forma de integrá-lo com o restante controlo.

A Figura 33 representa o sistema de blocos de um controlador PID com componente *feedforward*.

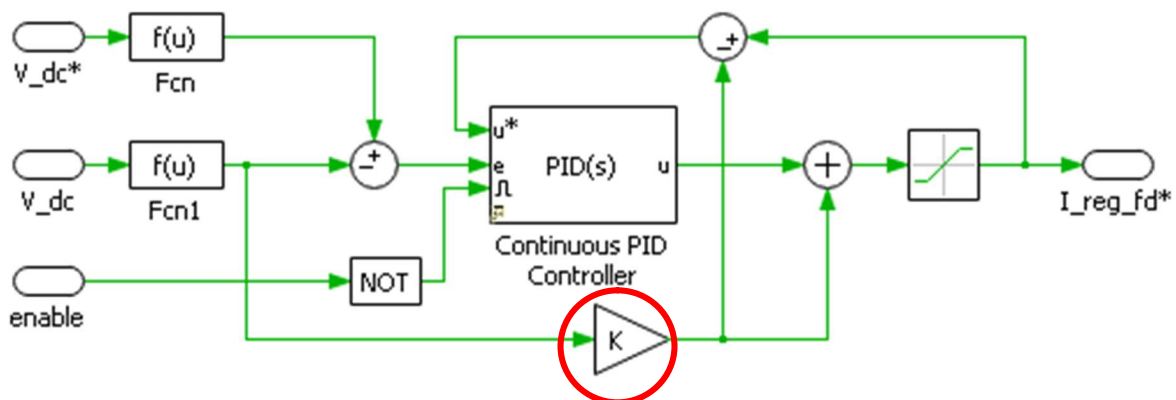


Figura 33 Controlador PID com *feedforward*.

2.11.2 Controlo preditivo baseado em modelo

O controlo preditivo baseado em modelo (MPC) é um conjunto de métodos de controlo que abarca o conceito de predição e obtenção do sinal de controlo através da minimização de uma determinada função objetivo e considera o erro futuro e as restrições nas variáveis de processo. O MPC tem mostrado muito êxito na indústria de controlo de processos. Isto porque esta técnica permite lidar com diferentes casos. Desde sistemas SISO (única entrada e única saída) até sistemas multivariáveis. Para além disso, permite a inclusão de ações de realimentação e pré-alimentação, podendo ser incluídas restrições de entrada e saída na formulação da lei de controlo e pode também compensar intrinsecamente os tempos mortos do processo.

Apesar da maior parte dos sistemas reais apresentarem características não lineares, dentro de uma faixa pequena de operação o seu comportamento pode ser aproximado de forma satisfatória através de modelos lineares em técnicas de MPC. A principal vantagem do MPC linear comparado ao não linear é que o problema de otimização associado é de resolução mais simples. Porém, quando o processo tem um alto grau de não linearidade, a faixa de operação é variável ou quando experimenta transições contínuas em sua operação necessariamente deverá ser tomado em conta o modelo não linear no projeto de controlo para que se mantenha a estabilidade e desempenho esperados.

Em cada instante t e fazendo uso do modelo do processo “predizem-se” as futuras saídas para um determinado horizonte N , chamado horizonte de predição. Estas saídas preditas, $y(t + k | t)$ (a notação indicam o valor predito da variável no instante $t+k$ calculado no instante t), para $k=\{1. . . N\}$, dependem dos valores conhecidos até o instante t (entradas e saídas passadas) e dos sinais de controlo em $t+k$ calculadas em t , $(u(t + k | t))$ para $k= \{0. . . N-1\}$, que se pretende enviar ao sistema e que são as que se desejam calcular [43].

3. Simulação do Conversor AC/DC Bidirecional

3.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas as simulações computacionais do sistema proposto, com o objetivo de analisar o comportamento dos vários elementos constituintes. Através das simulações computacionais, pretende-se que, durante a implementação prática, sejam evitados possíveis problemas no sistema, e também que não se comprometa a integridade das pessoas e equipamentos. A ferramenta de simulação escolhida foi o software de simulação PLECS.

PLECS (*Power Electronics Control Simulation*) cujo logotipo está representado na Figura 34, é uma ferramenta de software para simular e analisar o comportamento dos sistemas eletrônicos de potência. É utilizado por engenheiros, investigadores e educadores para conceber, testar e otimizar circuitos e sistemas eletrônicos de potência. O software apresenta uma interface de fácil utilização, uma biblioteca de modelos pré-construídos, e capacidades avançadas de simulação, tais como simulações dinâmicas e de estado estável, simulações em tempo real de hardware no circuito, e simulações de transitórios eletromagnéticos. O PLECS também pode ser integrado com outras ferramentas de simulação, tais como MATLAB e *Simulink*, para uma análise mais aprofundada e desenho de controlo.



Figura 34 PLECS logotipo.

3.2 Modelo de Simulação do Conversor AC/DC Bidirecional

O modelo de simulação do conversor AC/DC trifásico, desenvolvido no software PLECS, encontra-se representado na Figura 35. Este modelo apresenta no andar de potência a topologia utilizada do conversor AC/DC trifásico a três braços.

Este modelo conta com uma fonte de corrente controlada por um bloco *C-script* que calcula a corrente a carregar ou descarregar da rede em função do desvio de frequência. Por limitações de processamento da RTBOX não foi possível simular em *hardware in loop* o conversor DC/DC a acoplar ao AC/DC, sendo então nesta simulação substituído por uma fonte de corrente. No entanto foi também executada a simulação do conversor DC/DC que será exposta neste documento.

De modo a possibilitar o ligar e desligar do conversor com a fonte de corrente foi aplicado um ramo resistivo com um contactor S1 complementar a S2 e S3.

A frequência de comutação de operação do conversor foi estabelecida em 20 kHz.

Relativamente ao controlo do conversor foi utilizada a modulação PWM sinusoidal com uma malha de controlo de tensão do condensador do lado DC definido para 800V e uma malha de controlo de fator potência que permite que o conversor tenha um comportamento capacitivo ou indutivo.

Para simular a rede elétrica foi criado um bloco que permite variar a frequência da rede de modo a possibilitar a simulação da malha de controlo de frequência (controlo da fonte de corrente).

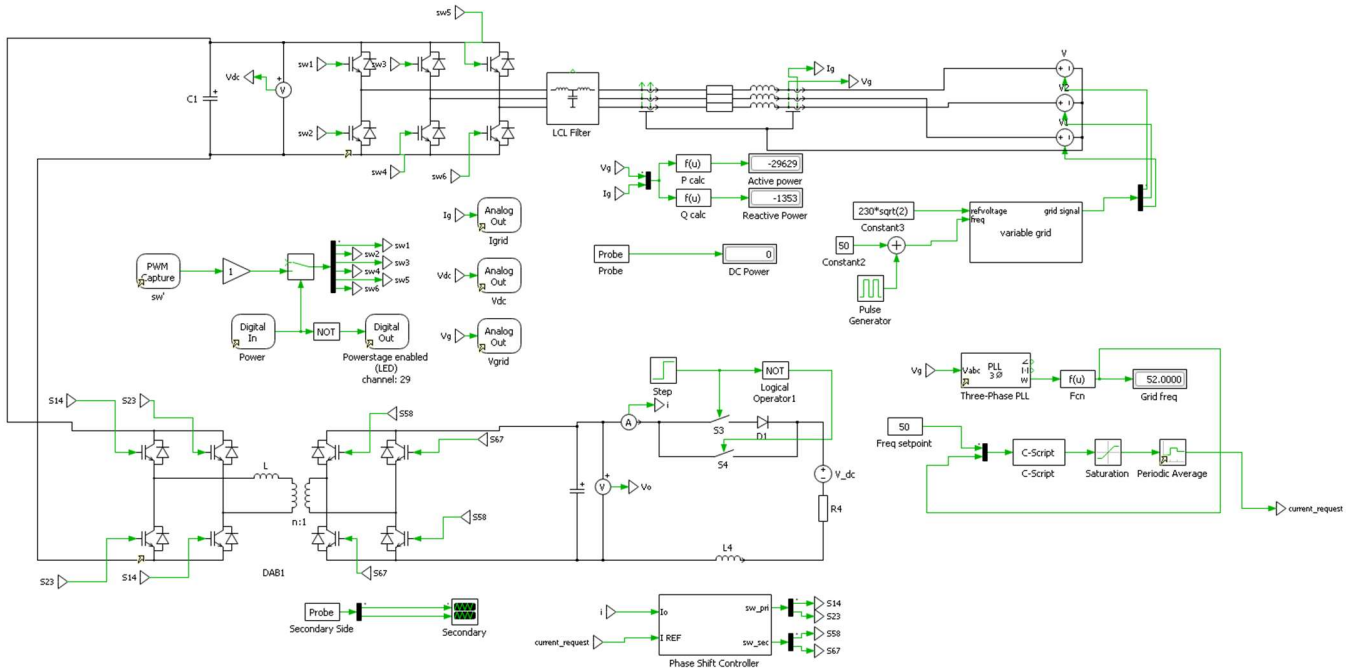


Figura 35 Esquema completo do conversor.

As principais especificações do conversor AC/DC trifásico a ser implementado encontram-se apresentadas na Tabela 2. O conversor AC/DC trifásico é dimensionado para trabalhar com tensões fase-neutro de 230 V e com uma corrente nominal, no lado DC, com um valor de 40A nos dois sentidos, o que perfaz uma potência de 31kW de carga e descarga.

Tabela 2 Características do conversor AC/DC.

Parâmetro	Valor
Valor eficaz da tensão fase-neutro	230 V
Potência nominal	31 kW
Tensão nominal no barramento CC (V_{CC})	800 V
Frequência de comutação (f_{sw})	20 kHz
Frequência de amostragem (f_s)	40 kHz
Condensador do barramento DC	1 mF

Relativamente ao lado DC foi utilizada uma configuração *dual active bridge*, e de modo a possibilitar a carga e descarga foi utilizada uma fonte de tensão em serie com uma resistência de 500mΩ que simula uma bateria.

Na Tabela 3 estão representadas as características principais do estágio DC/DC do conversor

Tabela 3 Características do conversor DC/DC.

Parâmetro	Valor
Gama de tensão	250-500 V
Potência nominal	31 kW
Frequência de comutação (f_{sw})	100 kHz
Frequência de amostragem (f_s)	200 kHz

3.3 Simulação da rede

De modo a simular a rede elétrica e possibilitar a variação da sua frequência foi criado no PLECS um subsistema denominado de *variable grid*. Este subsistema recebe a tensão de pico a gerar por cada fase e a sua frequência. As sinusoides geradas por este subsistema são de seguida aplicadas a fontes de tensão controladas. De modo a causar distúrbios na frequência, foi passada uma onda triangular (em alguns casos foi utilizado um degrau) com offset de 50 unidades e valor pico-a-pico de 4 unidades de modo a obter uma variação na rede de 52 a 48Hz. De modo a tornar a rede mais realista foi utilizada uma impedância de linha com uma indutância de 840mH e uma resistência de 26 mΩ.

Na Figura 36 encontra-se representada a simulação da rede elétrica onde é possível observar todos os componentes anteriormente referenciados.

Na Figura 37 é possível observar um ciclo de rede gerado pela função *variable grid* que no instante gerava formas de onda com uma frequência de 48 Hz.

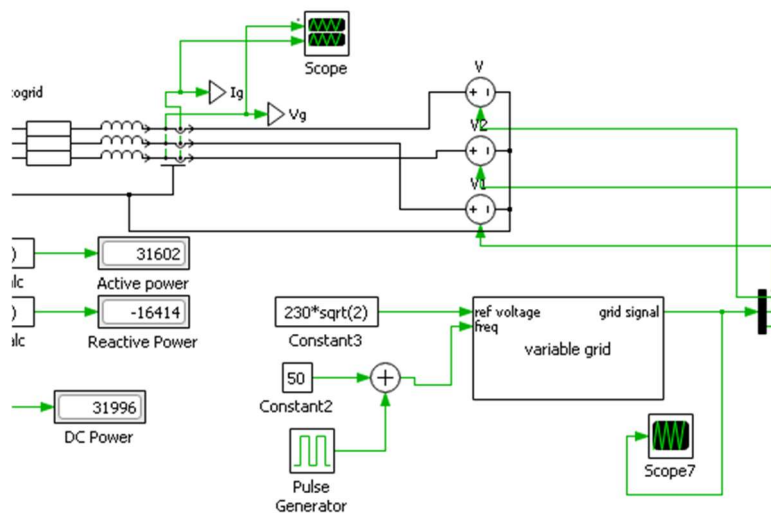


Figura 36 Lado da rede.

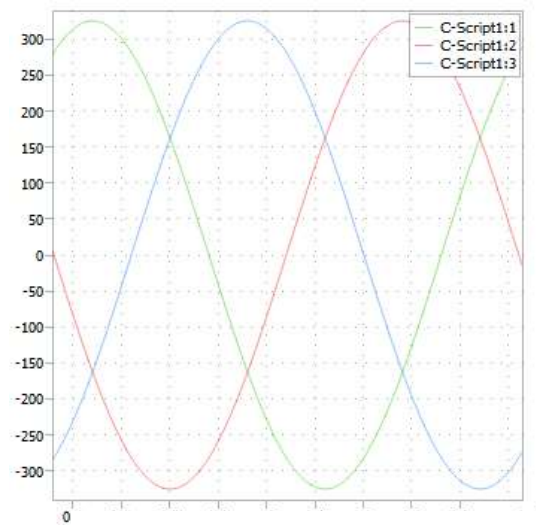


Figura 37 Ciclo de rede gerado.

3.4 Sistema de Sincronização com a Rede Elétrica

De modo a possibilitar a ligação do conversor com a rede elétrica foi utilizada uma PLL (*Phase Locked Loop*) trifásica. A PLL é um circuito eletrónico que é utilizado para sincronizar duas fontes de sinais elétricos. A PLL é importante porque permite que diferentes sistemas elétricos trabalhem em conjunto de forma sincronizada, no caso do conversor é importante para que exista sincronismo com a rede elétrica. O controlo da PLL é responsável por ajustar a frequência do sinal de saída para que ele seja igual à frequência de referência. Para tal, é comparado o sinal de entrada com o sinal de referência e gerando um sinal de erro. No caso do conversor em simulação foi utilizado um controlador PI. O circuito integrante da PLL encontra-se representado na Figura 38.

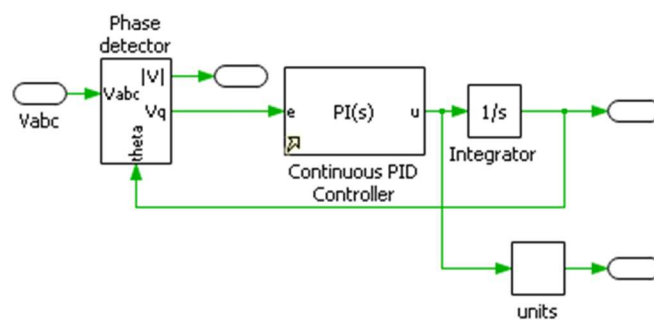


Figura 38 Circuito integrante da PLL.

Como detetor de fase a PLL utiliza um detetor de fase SRF (*Self-Resonant Frequency*) cujo modelo se encontra representado na Figura 39. Um detetor de fase SRF é um circuito eletrónico que é utilizado para medir a frequência de um sinal eléctrico. Esta abordagem baseia-se na medição da frequência de auto-ressonância do modelo matemático de um circuito LC (indutância-capacidade).

O detetor de fase SRF funciona comparando a frequência de entrada com a frequência de auto-ressonância do circuito LC. Quando a frequência de entrada é igual à frequência de auto-ressonância, o circuito LC entra em ressonância e gera uma tensão de saída máxima. A frequência de entrada é então medida comparando-a com a frequência de auto-ressonância.

Na Figura 40 está representada a forma de onda em dente de serra presente na saída da PLL com uma frequência igual à frequência da rede (aproximadamente 45 Hz no momento do teste).

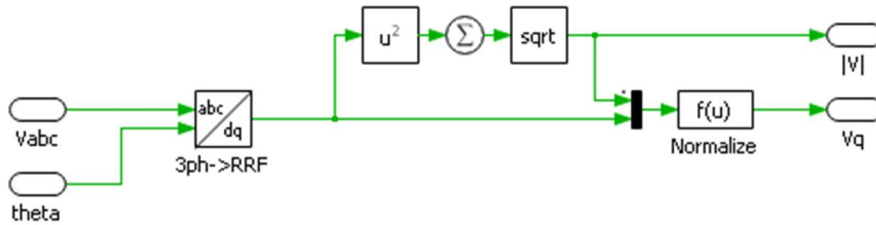


Figura 39 Circuito integrante do detetor de fase.

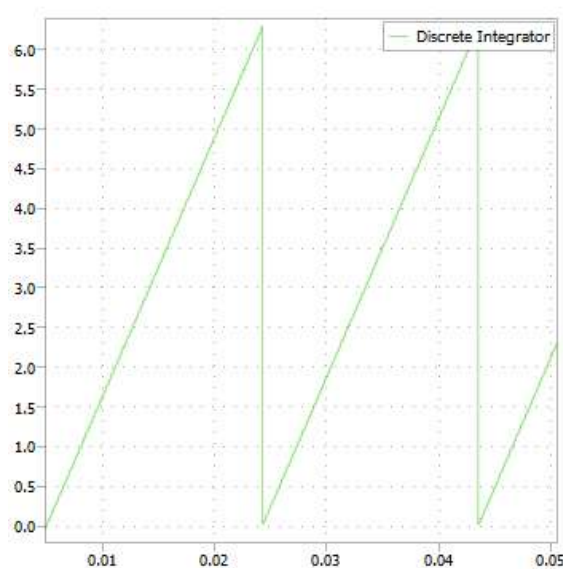


Figura 40 Saída theta da PLL.

3.5 Filtragem de harmônicos

O conversor em estudo faz utilização de um filtro LCL (indutor-condensador-indutor). O filtro LCL é composto por dois indutores (bobinas) e um condensador conectados em série e paralelo, respetivamente. A ligação em série dos indutores ajuda a bloquear a passagem das correntes harmónicas e a ligação paralela do condensador ajuda a bloquear a passagem de tensões harmónicas. Desta maneira é possível melhorar a qualidade das ondas de saída do inversor, reduzindo as correntes e tensões harmónicas e melhorando a forma da onda.

A Figura 41 representada as formas de onda das tensões e correntes antes do filtro LCL.

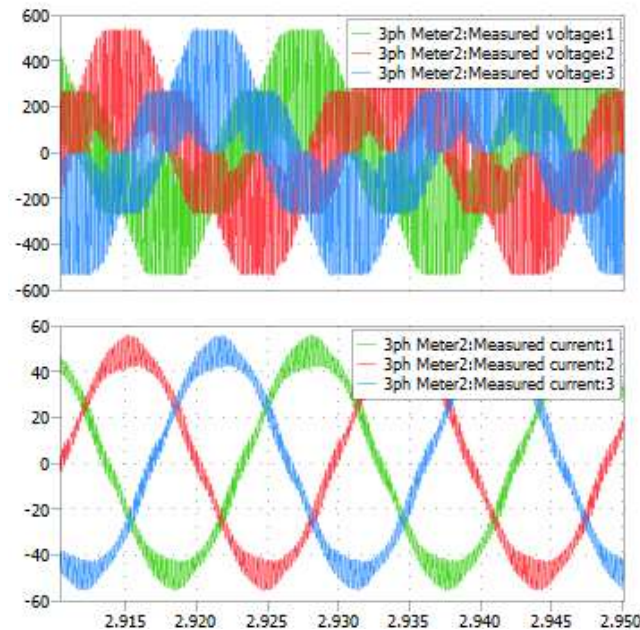


Figura 41 Formas de onda antes do filtro LCL.

O objetivo do filtro LCL é reduzir os harmónicos de corrente gerados pelo conversor AC/DC e melhorar a qualidade da corrente na rede eléctrica. Para isso, são utilizados quatro componentes: duas bobinas, um condensador e uma resistência, que formam uma série de impedâncias.

A frequência de ressonância (f_{res}) do filtro LCL é determinada pela seguinte equação[44]:

$$f_{res} = 1 / (2 * \pi * \sqrt{(L * C)})$$

onde:

L representa a indutância do indutor.

C representa a capacidade do condensador.

A indutância do indutor é determinada pela seguinte equação [44]:

$$L = (V_{dc})^2 / (P * f_{res})$$

onde:

V_{dc} representa a tensão no barramento DC (800 V).

P representa a potência do conversor (31 kW).

A capacidade do condensador é determinada pela seguinte equação [44]:

$$C = 1 / (4 * \pi^2 * f_{res}^2 * L)$$

Assumindo uma frequência de ressonância de $f_{res} = 5 \text{ kHz}$, temos:

$$L = (800^2) / (31000 * 5e3) = 8,33 \text{ mH}$$

$$C = 1 / (4 * \pi^2 * (5e3)^2 * 8.33e-3) = 70.7 \text{ }\mu\text{F}$$

Assim, o filtro LCL é composto por dois indutores com uma indutância de 4.15 mH, e um condensador com uma capacidade de 70.7 μF .

A Figura 42 representa as formas de onda das tensões e correntes na entrada do conversor.

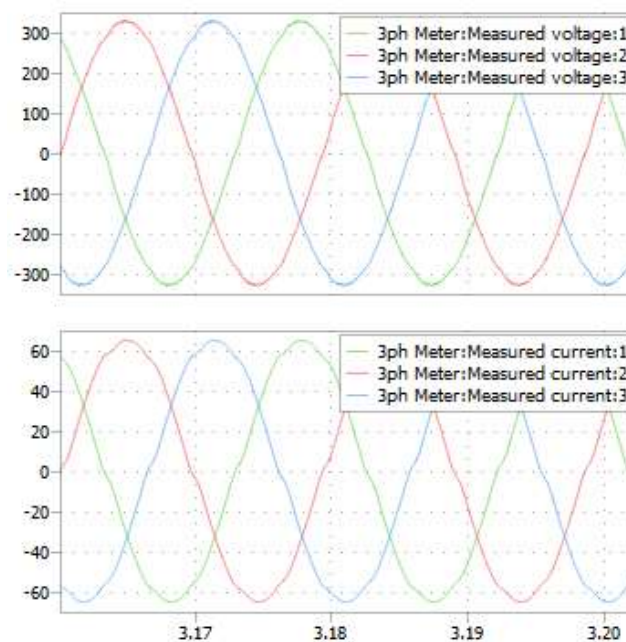


Figura 42 Correntes e tensões na entrada do conversor com potência de 31 kW.

3.6 Dimensionamento do Barramento DC

O barramento DC e o condensador nele localizado são componentes importantes de um conversor AC/DC, uma vez que desempenham um papel fundamental na manutenção de uma tensão estável do barramento DC, que é necessária para o bom funcionamento do conversor.

O condensador de barramento DC é utilizado para armazenar energia e suavizar a tensão de ondulação causada pela comutação do conversor. A tensão do barramento DC é utilizada para conduzir os dispositivos eletrônicos de potência, tais como os dispositivos de comutação, e se a tensão não for estável, pode causar problemas como o aumento das perdas, aumento das perdas de comutação, e aumento dos harmônicos provenientes da comutação, o que pode levar à diminuição da eficiência do conversor e ao aumento da interferência eletromagnética (EMI). O condensador do barramento DC também desempenha um papel crítico no desempenho do conversor, uma vez que ajuda a reduzir a tensão de *ripple*, o que melhora a eficiência do conversor.

O condensador de barramento DC também ajuda a evitar transientes de tensão causados pela comutação do conversor, o que pode levar a danos nos dispositivos de comutação do conversor.

Para além disso, sendo um componente chave no conversor, é importante assegurar que é devidamente concebido e que representa o valor de capacidade, tensão nominal e corrente de ondulação adequados para a aplicação específica do conversor.

Para o dimensionamento do condensador do barramento DC de um conversor AC/DC trifásico bidirecional de 31 kW, com uma frequência de comutação de 20 kHz e uma tensão no barramento DC de 800 V, é necessário calcular a corrente de *ripple* (I_{ripple}) no barramento DC e determinar a capacidade requerida para sua atenuação. A equação para o cálculo da corrente de ripple é dada por [45]:

$$I_{ripple} = P / (f_{sw} * V_{dc})$$

onde:

P representa a potência do conversor (31 kW).

f_{sw} representa a frequência de comutação (20 kHz).

V_{dc} representa a tensão no barramento DC (800 V).

Ao realizarmos o cálculo, obtemos:

$$I_{ripple} = 31000 / (20000 * 800) = 0,15 A$$

A capacidade requerida é determinada pela seguinte equação [45]:

$$C = I_{ripple} / (2 * \pi * f_{sw} * \Delta V)$$

onde:

ΔV representa a variação da tensão no barramento DC permitida.

Com uma variação de tensão ΔV de 2 V, temos:

$$C = 0,15 / (2 * \pi * 20000 * 2) = 27,4 \mu F$$

Assim, conclui-se que uma capacidade de aproximadamente 27,4 μF é suficiente para atenuar a corrente de ripple no barramento DC deste conversor AC/DC trifásico bidirecional de 31 kW, com uma tensão de ripple de 2 V. Na Figura 43 encontra-se representada a forma de onda da tensão do barramento DC em regime permanente, sendo possível observar que a tensão apresenta um ripple inferior a 1V pico-a-pico.

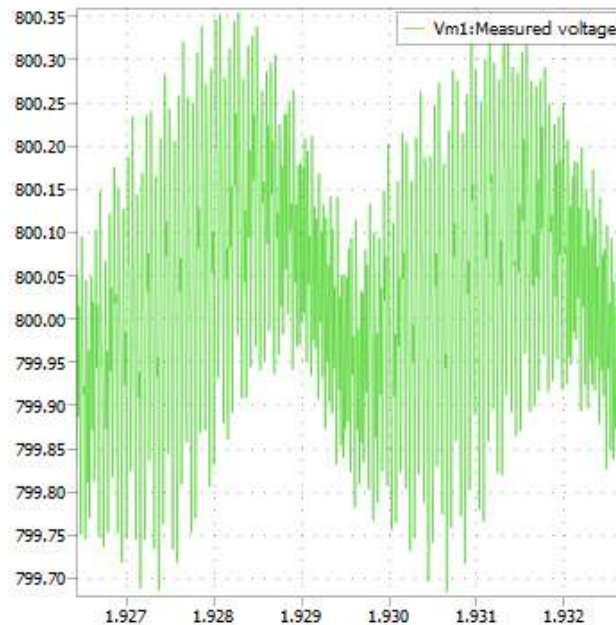


Figura 43 Tensão do condensador do barramento DC em *steady state*.

A carga do condensador é executada inicialmente apenas através dos díodos até este obter uma tensão de 580V, a partir daí é iniciada a comutação de modo a obter a tensão requerida de 800V, como é possível observar na Figura 44.

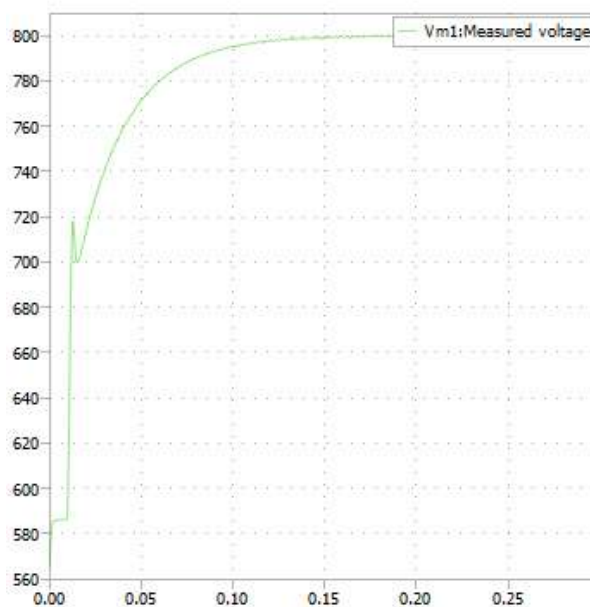


Figura 44 Subida da tensão no barramento DC.

3.7 Conversor DC/DC

Para calcular a indutância e a capacidade do secundário do conversor *dual active bridge* (DAB) foram utilizadas as seguintes equações [46]:

Indutância:

$$L_s = (T_{sw} / (di/dt))$$

Onde:

L_s representa a indutância do secundário, T_{sw} representa o período de comutação, e di/dt representa a taxa de mudança de corrente.

Capacidade:

$$C = I_{ripple} / (V_{out} * f_{sw} * \Delta V_{ripple})$$

Onde:

C é a capacidade, I_{ripple} é a corrente de ripple, V_{out} é a tensão de saída, f_{sw} é a frequência de comutação e ΔV_{ripple} é a variação da tensão de ripple.

Como este estágio vai estar conectado à bateria de um Nissan Leaf este dimensionamento foi feito para uma tensão de saída de 350 V. Foi definida uma corrente de ripple de 2 A e uma tensão de ripple para menos de 1V, deste modo:

$$C = 2 / (350 * 100 * 10^3 * 0.001) = 57\mu F$$

O valor foi ajustado para 60 μ F de modo a obter uma filtragem superior.

Já para a indutância utilizando os valores fornecidos:

$$T_{sw} = 1 / 100 * 10^3 = 10 \mu s$$
$$di/dt = 10A/\mu s$$

A indutância seria:

$$L_s = (T_{sw} / (di/dt)) = (10 * 10^{-6}) / (10) = 1 \mu H$$

Este valor foi ajustado para 2 μ H de modo a reduzir o *ripple* na corrente de saída.

Relativamente ao transformador, foi utilizado um transformador ideal com uma relação no enrolamento de 2/1.

Desta maneira foi possível obter uma corrente de *ripple* inferior a 300 mA e uma tensão de *ripple* inferior a 1 V como é possível observar na Figura 45.

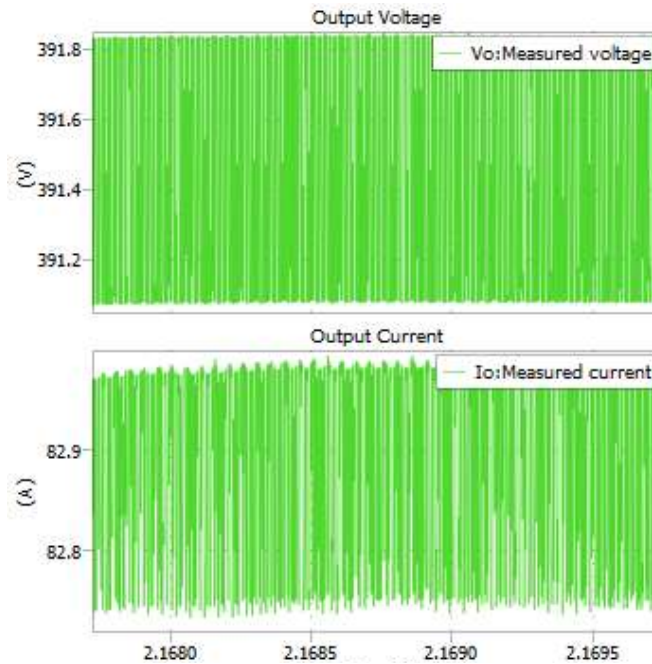


Figura 45 Formas de onda na saída do conversor DC/DC.

Foi adicionado um ramo de pré-carga com um diodo que permite que o condensador seja carregado pelo conversor, evitando assim a descarga da bateria no momento da conexão.

Assim foi possível obter uma curva de início de carga representada na Figura 46 onde é possível ver a subida do valor da corrente de maneira gradual até ao valor requerido (90 A), sem a existência da inversão da corrente quando a tensão do condensador ainda é inferior à tensão da bateria.

Note-se que, de forma a reduzir o tempo de simulação, o ganho proporcional e integral responsável pelo controlo de corrente do estágio DC/DC foram ajustados de modo a obter uma resposta o mais rápido possível sem a obtenção de *overshoot*, no entanto numa aplicação real com diferentes condições de utilização estes ganhos seriam idealmente reduzidos. Deste modo seria de esperar uma resposta de saída mais conservadora.

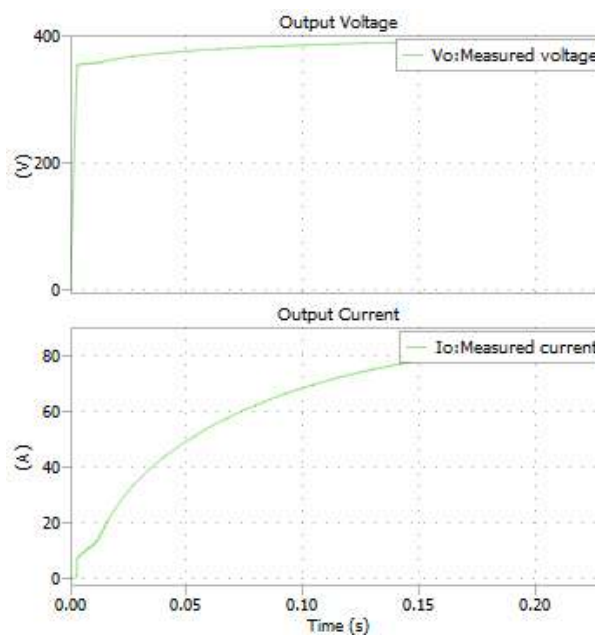


Figura 46 Início de carga.

Deste modo é possível carregar e descarregar a bateria em questão a 90 A com um tempo de estabilização de menos de 300ms como é possível visualizar na Figura 47.

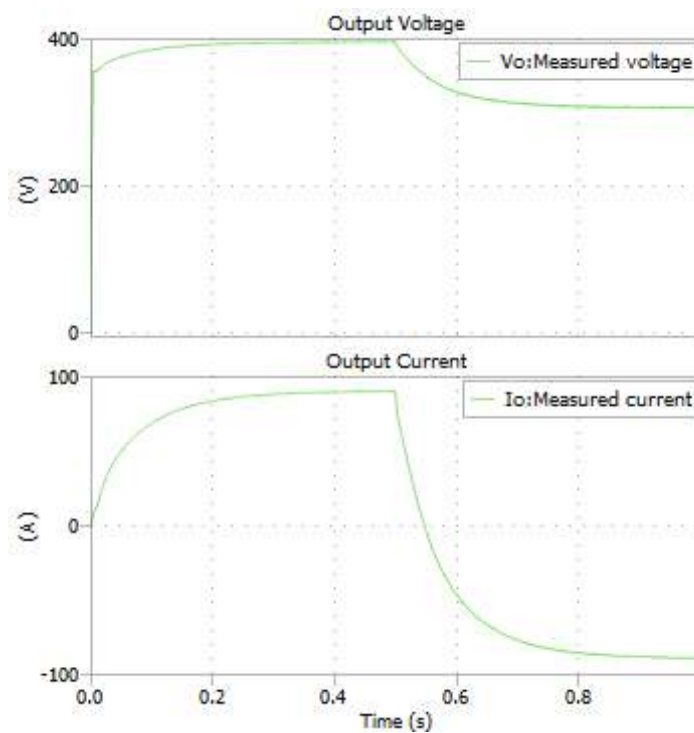


Figura 47 Ciclo carga/descarga.

3.8 Controlo do conversor AC/DC

De seguida será apresentado o controlo do conversor AC/DC, este controlo encontra-se isolado do restante controlo pois será integrado numa DSP mais à frente.

O controlo do conversor AC/DC é responsável por garantir que a corrente e a tensão de saída do conversor sejam mantidas dentro dos limites especificados, mantendo também o condensador do lado DC carregado com a tensão desejada, enquanto também proporciona suporte à rede elétrica. Isso é conseguido através do uso de controladores de corrente e tensão, que monitorizam e regulam a corrente e tensão de entrada e saída do conversor. Além disso, o conversor também inclui controlador de frequência e de potência ativa e reativa através da utilização da teoria pq, que permitem que o conversor forneça suporte à rede elétrica, ajudando a manter a estabilidade da frequência e a equilibrar a carga na rede, podendo desta forma se comportar como uma carga capacitiva ou indutiva.

Na Figura 48 encontra-se representado o esquema de blocos responsável pelo controlo do conversor AC/DC.

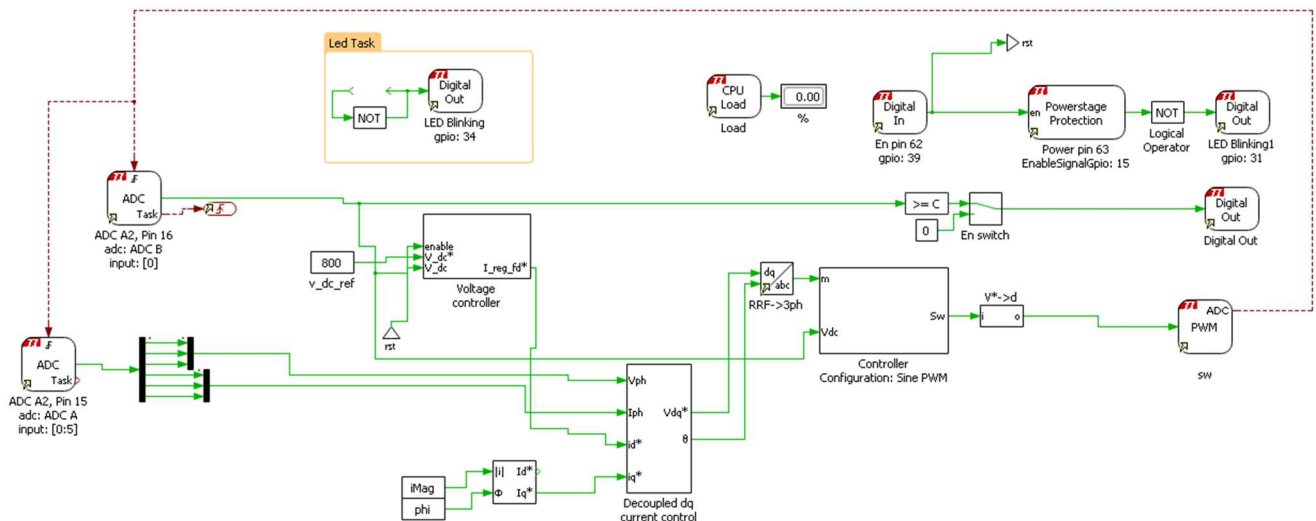


Figura 48 Esquema de blocos do controlo do conversor AC/DC.

3.8.1 Controlo de tensão do barramento DC

O controlo de tensão do barramento DC no conversor AC/DC é um processo fundamental para garantir a estabilidade e eficiência do sistema. Isso é alcançado através do uso de um controlador de tensão DC (DCC), bloco designado por *voltage controller* na Figura 48.

O processo de controlo consiste em medir a tensão DC no barramento, e enviar essa informação para o controlador DCC. O controlador DCC compara então a tensão medida com um sinal de referência de tensão pré-determinado, no caso 800 V. Se a tensão medida estiver fora do intervalo desejado, o controlador DCC calcula um erro que será utilizado como entrada para um controlador PI com realimentação, que gera uma referência de corrente de saída I_d . A saída de corrente é a corrente necessária a absorver ou fornecer da rede para controlar a tensão do barramento DC. Este processo é repetido continuamente de forma a manter a tensão do barramento DC dentro do

intervalo desejado. O interior do bloco de controlo de tensão encontra-se representado na Figura 49.

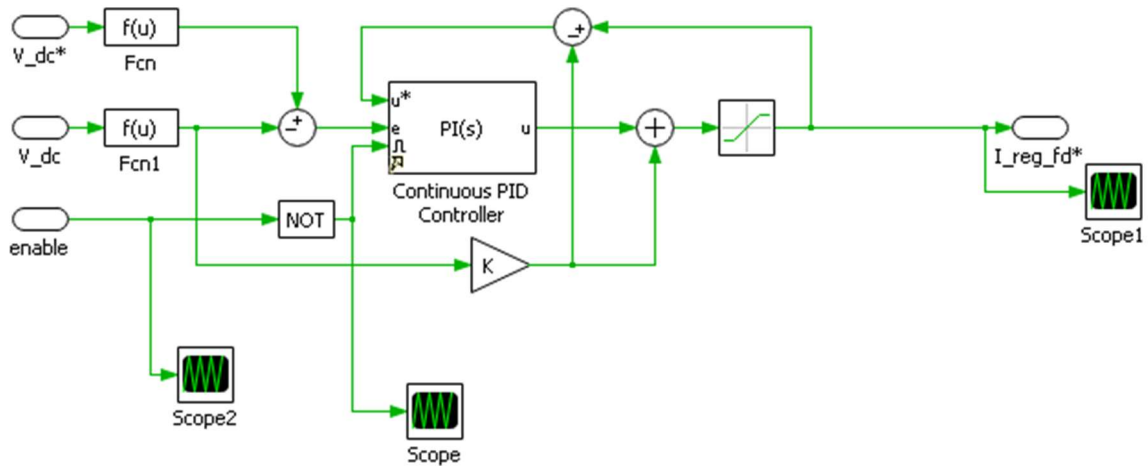


Figura 49 Bloco de controlo de tensão do barramento DC.

3.8.2 Controlo do fator potência e corrente

Este bloco é baseado na técnica de controlo de corrente dq que é uma técnica avançada de controlo de corrente. Ela baseia-se na separação da corrente de saída em duas componentes independentes, a corrente d e a corrente q, permitindo assim o controlo independente das mesmas.

Este tipo de controlo baseia-se na transformada de Park, que converte as correntes e as tensões de uma base de tempo para uma base de espacial. A corrente d (i_d) é projetada para controlar a potência ativa da corrente de saída, enquanto a corrente q (i_q) é projetada para controlar a potência reativa da corrente de saída. Isso permite que o controlador mantenha a tensão de saída constante, enquanto ajusta a potência ativa e reativa de saída para atender às necessidades do sistema, garantindo assim a estabilidade do sistema e a eficiência do conversor.

Na Figura 50 está representado o interior do bloco de controlo de corrente dq, é possível visualizar a entrada do corrente i_d que é a saída do bloco de controlo de tensão do barramento DC. A corrente i_q pode ser induzida no caso de ser requerido algum fator potência (diferente de 1) ao conversor e dessa maneira este ter um comportamento indutivo ou capacitivo, no entanto geralmente esta componente será mantida a 0. É possível também vislumbrar uma PLL que é utilizada única e exclusivamente para possibilitar a transformada de Park das correntes. São utilizados 2 controladores PI, um para cada corrente de modo a controlar o desvio do *setpoint* requerido para cada componente.

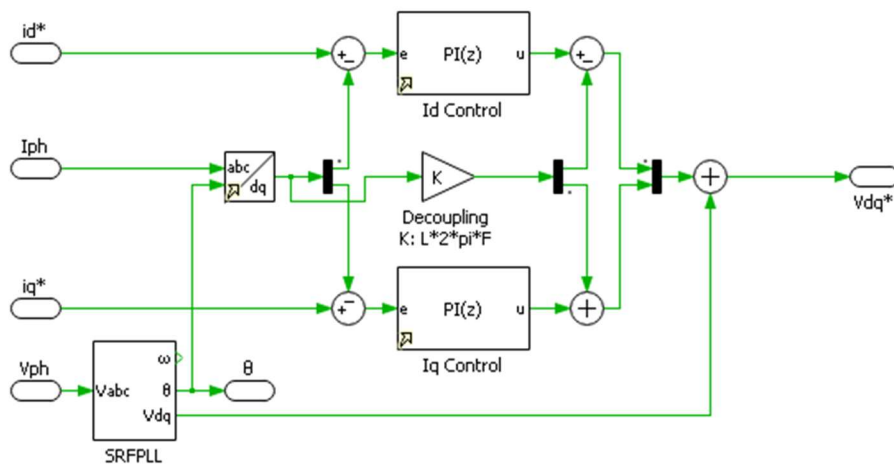


Figura 50 Controlo corrente dq.

De modo a testar a funcionalidade de controlo do fator potência proporcionada por este bloco, foi executado um teste de modo a conseguir ter um atraso de 120° da corrente face à tensão, ou seja, o conversor tem um comportamento capacitivo enquanto continua a carregar a bateria presente no secundário do transformador do conversor DC/DC como é possível verificar pela Figura 51.

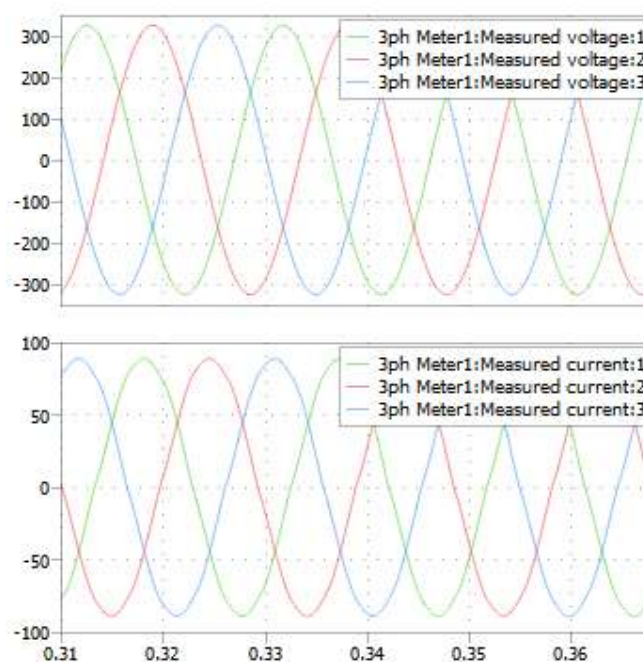


Figura 51 Forma de onda das tensões e das correntes com comportamento capacitivo.

Idealmente este bloco deverá ter um *setpoint* de corrente I_q nulo, deste modo este bloco fica encarregue de manter um fator de potência unitário por parte do conversor, sendo caso necessário controlar este *setpoint* com o objetivo de absorver ou produzir potência reativa.

A saída deste bloco produz duas componentes de tensão, a tensão d (representada a verde) e a tensão q (representada a vermelho) que assim como as correntes estão diretamente ligadas à componente ativa e reativa da potencia, respetivamente (Figura 52).



Figura 52 Tensão d e q.

Estas tensões serão por sua vez transformadas do plano dq para o plano abc de modo a obter as sinusoides a modular.

Para transformar a tensão de dq para abc é necessário aplicar o processo inverso da transformada de Clarke. Ela é utilizada para converter as tensões de uma base de espaço para uma base de tempo. A passagem de tensão dq para abc é expressa matematicamente da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 V_a &= (2/3) * V_d + (1/3) * V_q \\
 V_b &= -(1/3) * V_d + (1/3) * V_q + (\sqrt{3}/3) * V_q \\
 V_c &= -(1/3) * V_d + (1/3) * V_q - (\sqrt{3}/3) * V_q
 \end{aligned}$$

onde V_a, V_b, V_c são as tensões das três fases e V_d, V_q são as tensões dq.

No entanto nesta simulação foi utilizado um bloco presente no PLECS que se encarrega de executar esta transformação.

Na Figura 53 estão presentes as sinusoides a modular após a passagem pelos blocos de controlo de tensão do barramento DC e fator potencia.

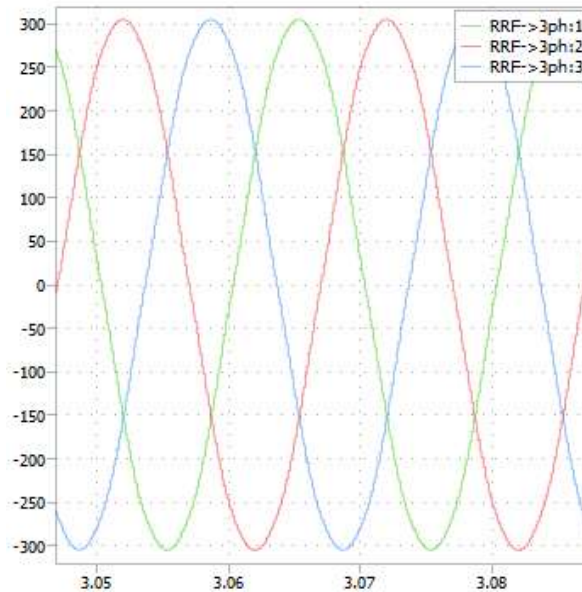


Figura 53 Sinusoides a modular.

3.9 Controlo do Conversor DC/DC

O controlo do conversor DC/DC foi feito exclusivamente para simulação e por isso não se encontra isolado, ou seja, encontrasse no mesmo ficheiro que o modelo de simulação, por não ser necessária a separação do controlo a integrar na DSP.

Foi desenvolvido um controlo em corrente, de modo a obter uma saída de corrente com precisão.

Para este controlo foi utilizada a modulação PWM com *phase Shift* que é uma técnica avançada de controlo. Ele baseia-se na modulação PWM e no deslocamento da fase entre as ondas PWM geradas.

Deste modo o primeiro passo foi implementar um controlador PI que fica encarregue de controlar o erro da corrente DC que flui para e da bateria e retornar a percentagem de desfasamento que terá de existir entre o sinal PWM do primário e do secundário.

O cálculo da percentagem de desfasamento pode ser obtido através:

$$\%desfasamento = (Tdesfasamento * 100) / T_{pwm}$$

Na Figura 54 é possível observar a percentagem de desfasamento a aplicar entre o pulso do primário e do secundário para uma carga a 60A seguido de uma descarga 60A (aproximadamente 8% de desfasamento).

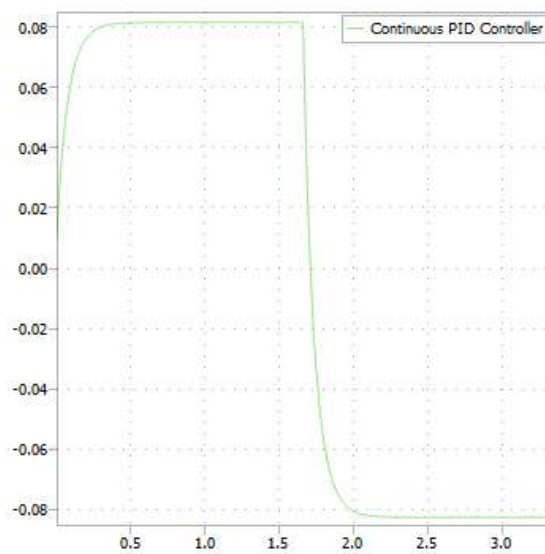


Figura 54 Desfasamento a aplicar.

Este sinal é fornecido ao bloco de controlo PWM phase_shift presente na Figura 55.

O funcionamento deste bloco segue a seguinte lógica:

1. Gerar sinais de referência: Primeiro, é gerado um sinal de referência de corrente desejado para cada ponte ativa, utilizando dentes de serra.
2. Gerar sinais PWM: Em seguida, os sinais de referência são comparados com ondas de referência e os sinais PWM são gerados utilizando flip-flops. Esses sinais PWM são gerados com deslocamentos de fase precisos entre si, de forma a garantir a corrente de saída desejada.
3. Controlar a ponte ativa: Os sinais PWM gerados são utilizados para controlar a corrente de saída de cada ponte ativa. Este processo é realizado comparando os sinais PWM com a corrente de saída e ajustando a tensão de saída de cada ponte ativa de forma a garantir a corrente de saída desejada.

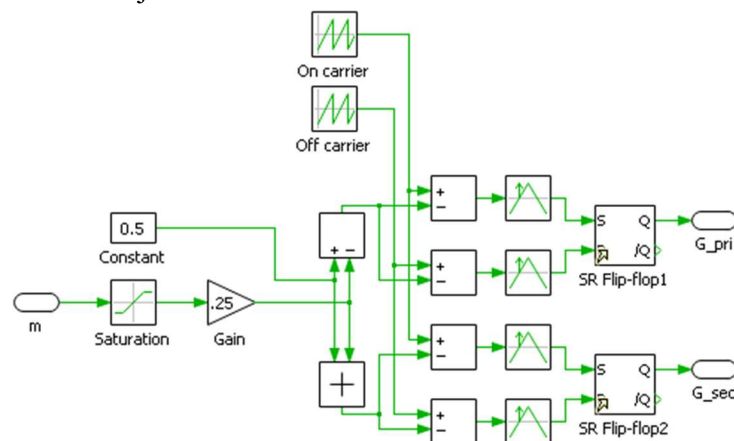


Figura 55 Controlo phase-shift PWM.

A saída deste bloco gera então os dois sinais PWM que deverão ser aplicados ao primário e ao secundário do conversor DC/DC com o desfasamento ideal que irá fornecer a corrente de saída requerida. Os sinais PWM referidos acima estão presentes na Figura 56.

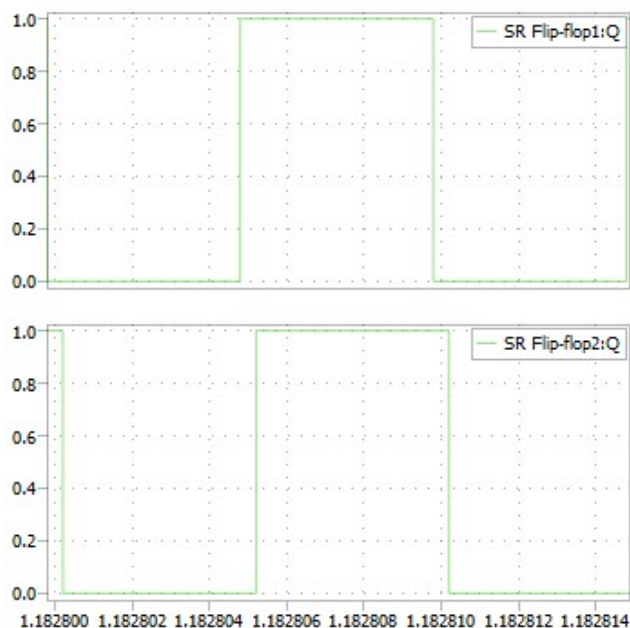


Figura 56 Sinais de PWM a aplicar ao lado primário e secundário do transformador.

O desfasamento entre os dois sinais de PWM é de 0.407 us o que dá um desfasamento de aproximadamente 8% entre os dois sinais:

$$(4e - 7 * 100) / 5e - 6 = 8.1\%$$

Este é o valor de desfasamento necessário para obter 60A de corrente no secundário do conversor.

Os semicondutores do mesmo braço do conversor vão receber os sinais simétricos aos acima representados.

3.10 Teste de funcionamento

De modo a testar o funcionamento do conversor foi executado um teste em que foi causada uma alteração na frequência da rede que alimenta o conversor. Este distúrbio na frequência fez variar a frequência desde 48 Hz até 52 Hz. Enquanto isto, o conversor encontra-se a carregar uma “bateria” a uma corrente de 10 A e uma tensão nominal de 360 V.

O valor da banda morta foi definido para 600 mHz, sendo 300 mHz acima da frequência nominal e 300 mHz abaixo, este valor foi definido tendo como base o regulamento de ligação à rede do arquipélago dos Açores, visto ser a localização do protótipo futuro.

Na Figura 57 encontra-se representado o perfil de frequência da rede que foi passado ao bloco de simulação da rede variável e a respetiva resposta da malha de controlo de frequência (requisito de corrente). O requisito de corrente no caso de ser positivo equivale a carga e no caso de ser negativo equivale a descarga.

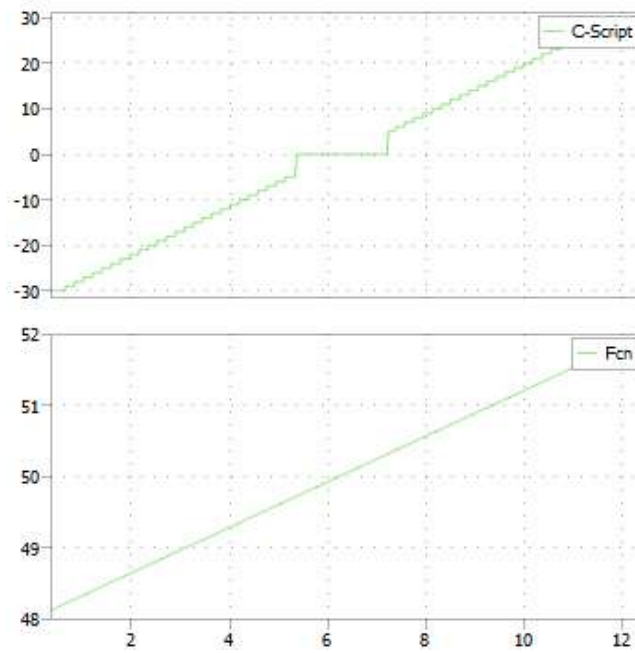


Figura 57 Perfil de frequência e resposta da malha de controle.

Na Figura 58 é possível observar a corrente e tensão na bateria durante esta simulação. De notar que como o veículo se encontra a carregar com uma corrente de 10 A todo o gráfico referente à corrente na bateria se encontra com um offset de 10 A.



Figura 58 Tensão e corrente na bateria durante a simulação.

Na Figura 59 é possível verificar o instante em que se dá a inversão no sentido da corrente, dada pela inversão da fase da corrente face à tensão. Isto é, quando se encontra em descarga (dos 2s aos 2.10s), a forma de onda da corrente encontra-se em oposição de fase com a forma de onda da tensão, por outro lado quando se encontra em carga (dos 1.80s aos 1.90s) a forma de onda da corrente encontra-se em fase com a tensão.

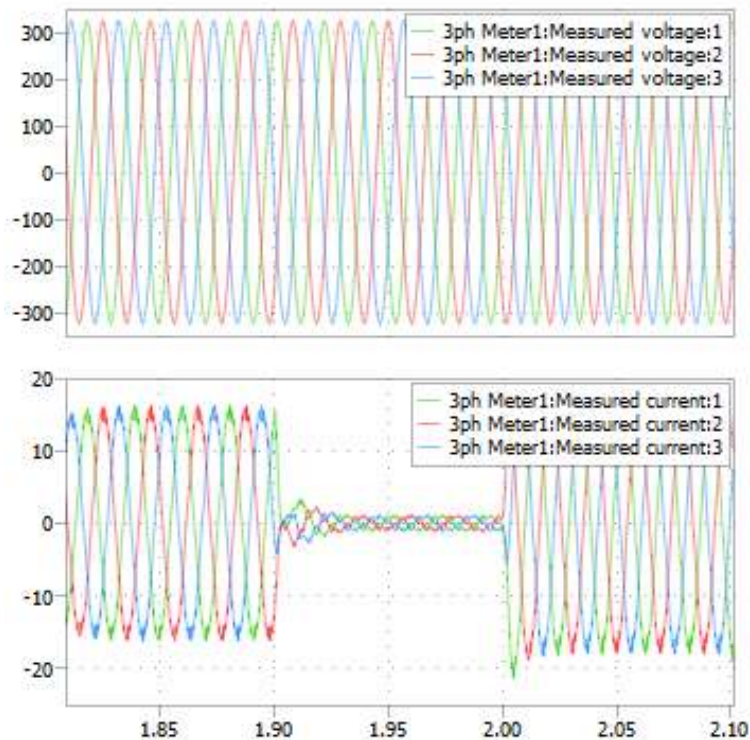


Figura 59 Inversão de corrente do lado da rede.

Desta forma, este modelo de conversor pode ser utilizado por carregadores de veículos elétricos, enquanto conta também com capacidade autónoma de prestar suporte à rede. Esse suporte pode ser por conta de absorção ou produção de potência reativa, podendo funcionar como STATCOM através da malha de controlo da corrente i_q , ou através da correção de eventuais desvios de frequência. Com esta última a bateria poderá carregar mais rápido no caso de uma sobre frequência ou até mesmo descarregar no caso de uma subfrequência.

4. Simulação HIL do Conversor AC/DC

4.1 RT BOX

A RT Box (*Real-Time Box*) representada na Figura 60 é um dispositivo compacto e portátil de aquisição de dados que é utilizado para sincronizar e recolher dados de várias fontes em tempo real. A RT Box pode ser ligada a um computador via USB e pode ser controlada usando várias linguagens de programação, tais como MATLAB e *Python*. Tem vários canais de entrada e saída analógicas e digitais. A RT Box pode também gerar sinais temporizados precisos, tais como impulsos TTL, para sincronizar a aquisição de dados e acionar dispositivos externos.



Figura 60 RTBOX 1.

No caso da simulação em estudo a RTBOX estava a processar todo o hardware de potência constituinte do conversor (planta).

4.2 DSP TMS320F28379D

A TMS320F28379D representada na Figura 61 é uma *Digital Signal Processor* (DSP) da Texas Instruments que se destaca pelo seu alto desempenho e eficiência. Ela possui uma frequência de processamento de até 150 MHz, com 32 bits, e conta com recursos avançados como memória flash, memória RAM e comunicação via redes CAN, I2C, SPI, UART. Além disso, possui recursos de segurança, como criptografia e autenticação.

Uma das características importantes da DSP TMS320F28379D é a disponibilidade de diversos periféricos, incluindo conversores A/D e D/A, comparadores, temporizadores, PWM, e interfaces de comunicação para Ethernet, CAN e LIN. Em específico, a DSP TMS320F28379D possui 16

canais de Conversores Analógicos para Digitais (ADC) e 8 PWMs, o que a torna uma opção flexível.

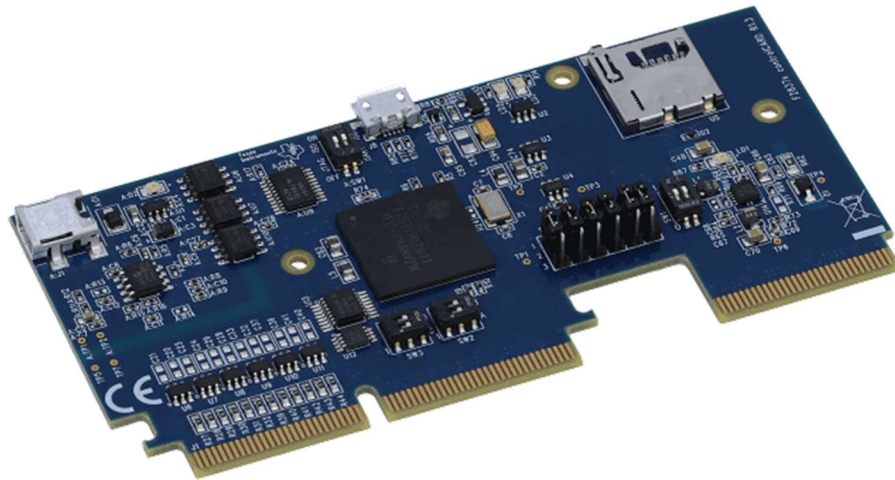


Figura 61 DSP TMS320F28379D.

O Controlo do conversor AC/DC foi processado por esta DSP, ficando então esta encarregue de ler os sinais de tensão e corrente da rede e do condensador e gerar e aplicar os 6 sinais PWM aos semicondutores virtuais que eram processados pela RTBOX.

4.3 Conversor simulado

O modelo simulado neste capítulo é em tudo semelhante ao anterior, no entanto a única alteração é o desaparecimento do estágio DC/DC, sendo substituído por uma fonte de corrente. Esta ação foi necessária devido a limitações na capacidade de processamento da RTBOX.

Na Figura 62 encontra-se representada a planta simulada na RTBOX onde é visível o desaparecimento do estágio DC/DC e a sua substituição por uma fonte de corrente.

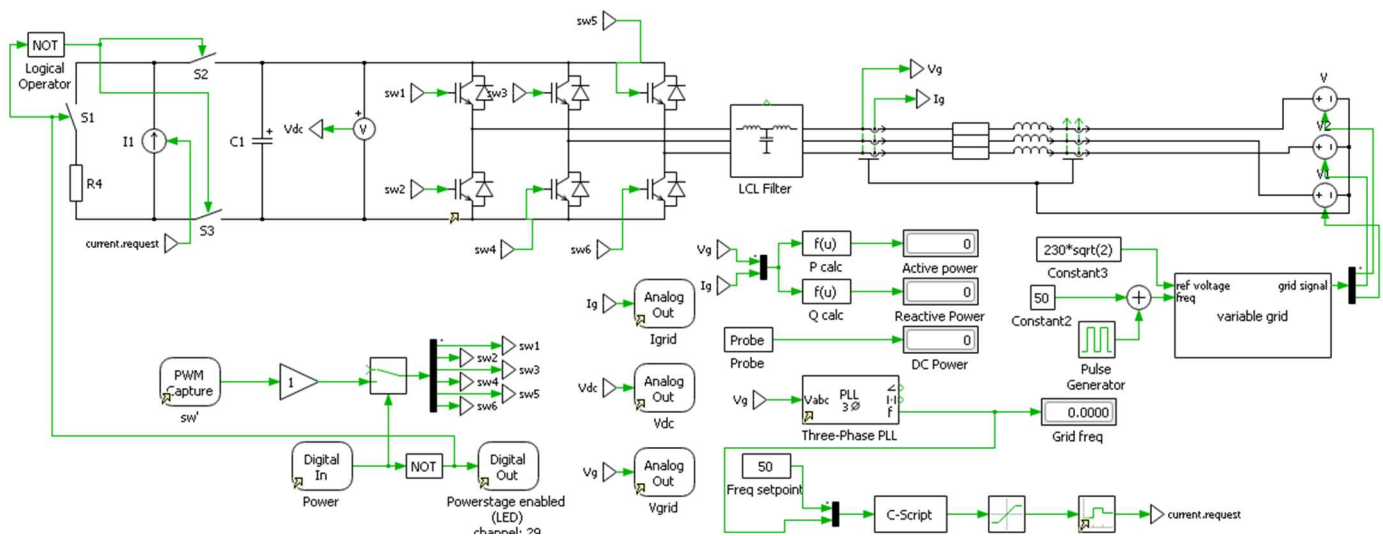


Figura 62 Planta simulada na RTBOX.

De modo a possibilitar as ligações entre a DSP e a RT box, foi utilizada uma *docking station* da Texas Instruments. Esta *docking station* (Figura 63) integra verticalmente a DSP e permite a fácil utilização dos seus pinos.

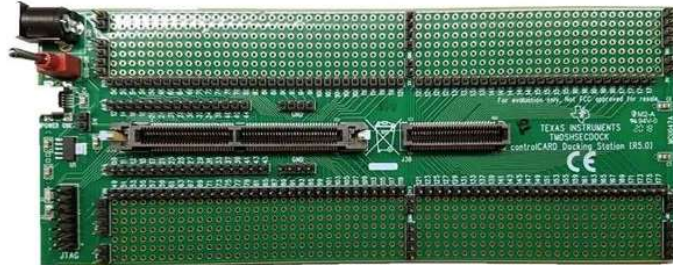


Figura 63 Docking Station.

A interligação feita entre a RTBOX (planta) e a DSP (controlo) segue a Tabela 4.

Foram utilizados 7 canais de conversão analógico para digital, sendo 3 para as correntes na rede, 3 para as tensões na rede e 1 para a tensão do condensador localizado no barramento DC.

Relativamente às entradas digitais da RTBOX foram utilizados seis sinais PWM a enviar pela DSP que são referentes aos sinais a aplicar a cada um dos seis semicondutores de potencia. Foi utilizada uma entrada adicional que visa a ligação do conversor e seu respetivo desligamento.

Relativamente às saídas digitais da RTBOX foram utilizadas 2 saídas digitais que têm como objetivo acender um led presente na DSP quando o estágio de potencia se encontra ligado.

Tabela 4 Interligação RTBOX-DSP.

	Function	RT Box channel	RT Box Pin		cCard Pin	HSEC Pin
			Signal	GND		
Analog Out	Ig1	AO12	13	35	ADC-A0	9
	Ig2	AO13	14	33	ADC-A1	11
	Ig3	AO14	15	31	ADC-A2	15
	Vg1	AO4	5	25	ADC-A3	17
	Vg2	AO5	6	25	ADC-A4	21
	Vg3	AO6	7	25	ADC-A5	23
	Vbus	AO11	12	23	ADC-B0	12
Digital In	PWM1	DI0	1	5	PWM1A	49
	PWM2	DI1	20	28	PWM1B	51
	PWM3	DI2	2	14	PWM2A	53
	PWM4	DI3	21	37	PWM2B	55
	PWM5	DI4	3	37	PWM3A	50
	PWM6	DI5	22	37	PWM3B	52
	Power	DI11	7	37	GPIO-23	74
Digital Out	Enable sw MCU	DO11	7	5	GPIO-39	88
	Power stage enabled	DO29	17	5		

A Figura 64 representa o *setup* de *hardware in loop* utilizado, onde é possível vislumbrar as conexões entre a DSP e a RTBOX.

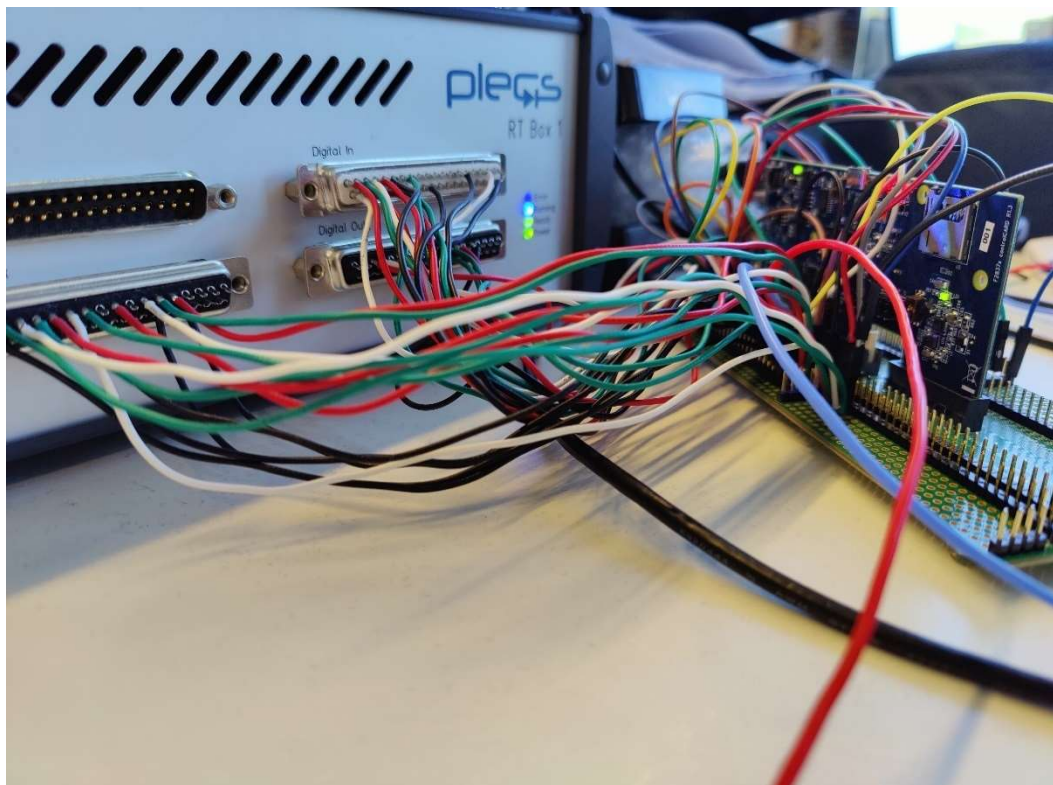


Figura 64 Interligação RTBOX-DSP.

4.4 Programação da planta na RTBOX

De modo a gerar e ler sinais com a RTBOX foram utilizados dentro do ambiente de simulação do PLECS os blocos destinados à programação da RTBOX. Os blocos utilizados com esta finalidade são o *PWM capture*, *digital in*, *digital out* e *analog out*.

O bloco *PWM capture* é responsável por recolher os sinais PWM enviados pela DSP para cada um dos semicondutores, no caso do conversor em estudo são 6 sinais. O período de amostragem a que esta recolha é feita é de 100us.

O bloco *digital in* é utilizado apenas para ligar a comutação da planta, por recomendação, com o objetivo de aumentar a segurança.

O bloco *digital out* é utilizado como saída digital para informar a DSP de que o seu sinal foi lido pela RTBOX e liga um led, de modo a dar conhecimento de que o controlo se encontra a correr.

O bloco *analog out* é uma saída analógica, e neste caso simula a leitura que na realidade teria de ser feita por sensores (correntes e tensões da rede e tensão do barramento).

4.4.1 Fatores de escala

Os sinais analógicos que saem da RTBOX têm de ser submetidos a uma escala de 0 a 3 V para isso foram aplicados os seguintes cálculos:

$$AO_range = 3$$

Para a tensão no barramento DC (condensador)

$$\begin{aligned} AO_vdc_max &= Vdc * 1.5; \\ AO_vdc_scale &= (AO_range)/AO_vdc_max; \\ AO_vdc_offset &= 0; \end{aligned}$$

Para a medição das tensões na rede

$$\begin{aligned} AO_vg_max &= Vg_peak * 2.5; \\ AO_vg_scale &= AO_range/AO_vg_max; \\ AO_vg_offset &= AO_range/2; \end{aligned}$$

Para a medição das correntes na rede

$$\begin{aligned} AO_ig_max &= Iref_peak * 2.5; \\ AO_ig_scale &= AO_range/AO_ig_max; \\ AO_ig_offset &= AO_range/2; \end{aligned}$$

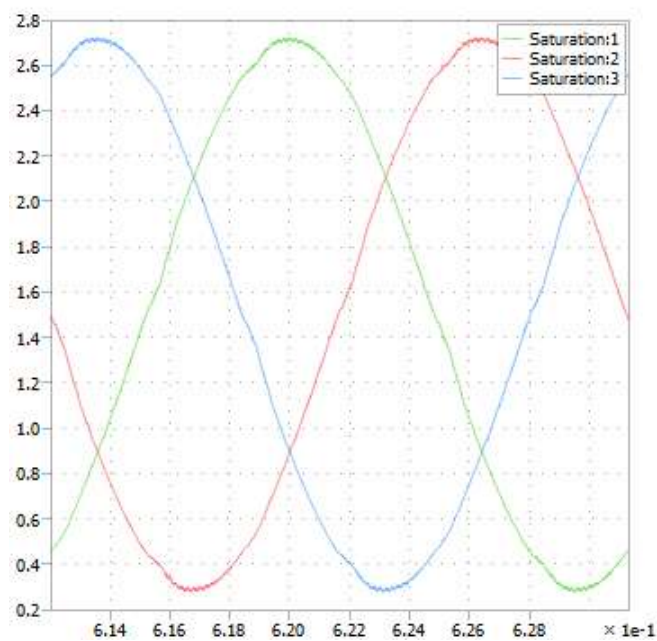


Figura 65 Tensões da rede no ADC.

Por sua vez os sinais recebidos pela DSP numa gama de 0 a 3 V (Figura 65) são submetidos a um fator de escala de maneira a serem convertidos para a sua verdadeira grandeza (Figura 66). Para isso são utilizados os seguintes cálculos:

Medições da rede

Ctr.DSP_ADCA_scale

$$= [1/AIO_vg_scale \ 1/AIO_vg_scale \ 1/AIO_vg_scale \ 1/AIO_ig_scale \ 1/AIO_ig_scale \ 1/AIO_ig_scale]$$

Ctr.DSP_ADCA_offset

$$= -[AIO_vg_offset/AIO_vg_scale \ AIO_vg_offset/AIO_vg_scale \ AIO_ig_offset/AIO_ig_scale \ AIO_ig_offset/AIO_ig_scale \ AIO_ig_offset/AIO_ig_scale]$$

Medições do barramento DC

$$Ctr.DSP_ADCB_scale = [1/AIO_vdc_scale]$$

$$Ctr.DSP_ADCB_offset = [0]$$

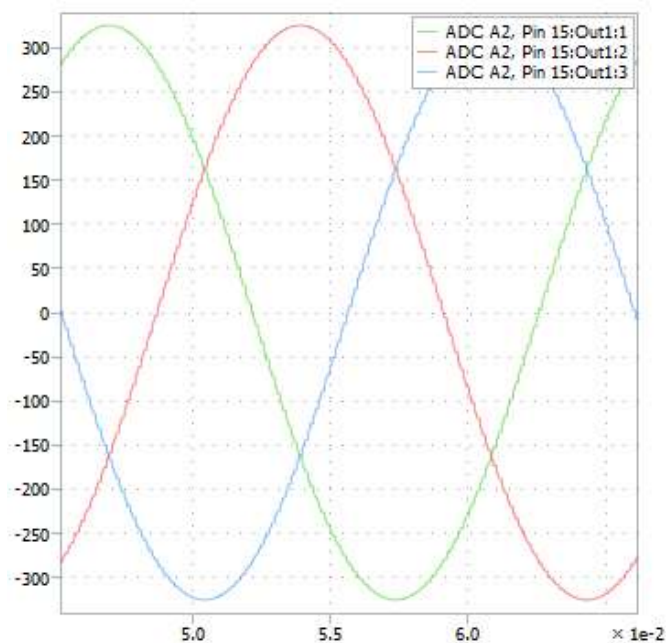


Figura 66 Tensões da rede após fator de escala reverso.

4.5 Simulação da rede

A Figura 67 ilustra a forma de onda trifásica de uma rede elétrica simulada com uma frequência de 52 Hz, gerada pela RTBox.

As três linhas sinusoidais distintas representam as fases da rede elétrica gerada pela RTBox: fase A, fase B e fase C. Cada linha possui uma cor diferente para facilitar a diferenciação entre as fases. As formas de onda estão igualmente espaçadas num ciclo de 360 graus, com um desfasamento de 120 graus entre cada uma. A fase A inicia-se no ângulo zero graus, a fase B começa a 120 graus e a fase C inicia-se a 240 graus.

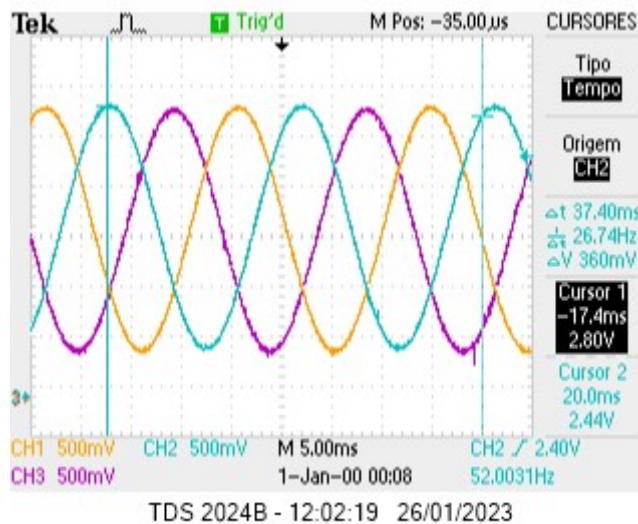


Figura 67 Rede simulada na RTBOX.

4.6 Correntes na rede

A Figura 68 mostra as formas de onda da corrente na saída de um conversor bidirecional em modo de operação como inversor.

No visor do osciloscópio, são visíveis diversas linhas sinusoidais que representam as correntes de saída nas diferentes fases do inversor. Cada linha possui uma cor distinta, facilitando a identificação das diferentes fases. As formas de onda encontram-se igualmente espaçadas num ciclo completo de 360 graus, apresentando um desfasamento de 120 graus entre si. Para além disso, é possível observar-se que as correntes nas 3 fases apresentam a mesma amplitude e reduzido conteúdo harmónico.

A imagem inclui ainda eixos (vertical e horizontal) graduados em unidades de corrente e tempo, respetivamente, o que permite uma análise pormenorizada das características das formas de onda da corrente na saída do conversor. As formas de onda apresentadas no osciloscópio revelam elevada qualidade e precisão, com frequência e amplitude estáveis e sem distorções significativas.

Um aspeto notável na imagem é a congruência entre as formas de onda obtidas no osciloscópio e as geradas previamente na simulação com o software PLECS, uma ferramenta de simulação especializada em eletrónica de potência e sistemas elétricos. Esta correspondência indica que o

conversor bidirecional está a desempenhar conforme o previsto, e confirma a exatidão e a fiabilidade dos resultados da simulação.

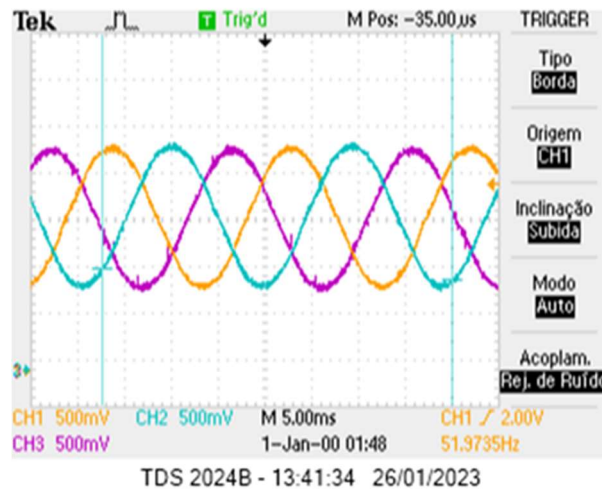


Figura 68 Correntes na saída do conversor.

4.7 Modos de operação

A descrição refere-se a duas figuras distintas que ilustram os dois modos de funcionamento do conversor bidirecional: modo retificador e modo inversor. Estas figuras permitem uma análise visual das diferenças entre os dois modos de operação, nomeadamente em relação à fase da corrente e da tensão.

Na Figura 69, o conversor bidirecional funciona no modo retificador, convertendo corrente alternada (AC) em corrente contínua (DC). A imagem apresenta duas formas de onda sinusoidais, uma representando a corrente (roxo) e a outra representando a tensão (amarelo). Ambas as formas de onda estão em fase, o que significa que atingem os seus picos e vales simultaneamente. Esta característica indica que a potência ativa está a ser transferida da rede elétrica para a carga em DC, com o conversor a atuar como um retificador.

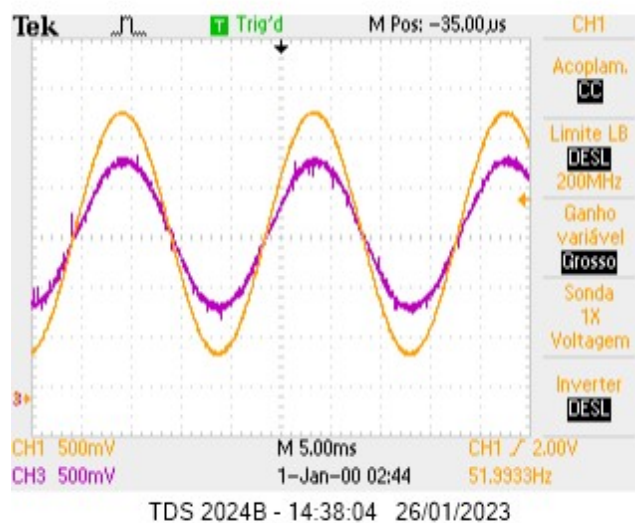


Figura 69 Funcionamento do conversor como retificador.

Na Figura 70, o conversor bidirecional opera no modo inversor, convertendo corrente contínua (DC) em corrente alternada (AC). A imagem também exibe duas formas de onda sinusoidais, representando a corrente (roxo) e a tensão (amarelo). Neste caso, as formas de onda estão em oposição de fase, ou seja, quando uma atinge o pico positivo, a outra encontra-se no pico negativo, e vice-versa. Esta característica revela que a potência ativa está a ser transferida da bateria em DC para a rede elétrica, com o conversor a funcionar como um inversor.

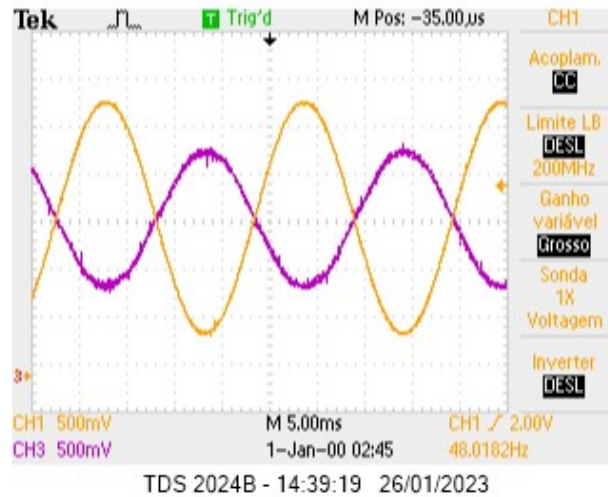


Figura 70 Funcionamento do conversor como inversor.

5. Carregador V2G

5.1 Requisitos do Carregador

O carregador em desenvolvimento tem como requisito principal a capacidade de carga e descarga de veículos elétricos. Faz utilização do protocolo CHAdeMO, que até ao momento é o único protocolo com capacidade bidirecional.

Foram utilizados os módulos de potência cujo modelo não pode ser divulgado, no entanto contam com uma potência de 12 kW. Para controlar os módulos é utilizada comunicação CAN, pelo que a carta principal do carregador (A11) ficará encarregue de comunicar com o veículo e com o módulo, controlando os parâmetros do módulo consoante a informação vinda do veículo.

O carregador de EV's com capacidade bidirecional em estudo tem como objetivo a prestação ativa de suporte à rede. Este visa não só a carga do veículo (o mais rápido possível) sem descuidar, contudo, a qualidade energética da rede elétrica a que se encontra conectado.

O carregador monitoriza constantemente a frequência da rede conseguindo através desta métrica decidir se deve descarregar ou carregar o veículo e a que potência o deverá realizar. Estas ações são feitas automaticamente pelo algoritmo inteligente que integra o dispositivo. Acrescido a estas funcionalidades automáticas o carregador pode também ser gerido manualmente através do input de uma variável de set-point de potencia, que deve ser enviada pelo *BackOffice* encarregado de gerir o dispositivo. Esta variável funciona como um limite máximo de potência no caso de ser positiva e como um set-point real no caso de ser nulo ou negativo.

O carregador vai se basear no estado da SoC do veículo para decidir se este poderá ou não ser carregado/descarregado, para isso deverá ser definido um SoC mínimo e um SoC máximo. O veículo irá carregar até este SoC mínimo e partir daí o algoritmo inteligente tomará conta da carga, não sendo, portanto, possível prever qual a SoC com que o veículo vai estar quando o utilizador decidir retirar o veículo da sessão, por este motivo a gama entre a SoC máxima e mínima deve ser definida pelo utilizador tendo este em conta que o veículo poderá se encontrar com uma SoC igual à mínima na altura em que este for necessário. Note-se, no entanto, que o veículo ao entrar na gama de SoC que habilita o algoritmo inteligente não sairá mais dessa mesma gama a não ser que lhe seja dado um input de *power setpoint* negativo, e nesse caso o veículo será descarregado até ao valor mínimo absoluto de SoC (configurável).

Dado que a localização requerida para a instalação dos carregadores em estudo serão ilhas, e visto que estas contêm uma rede elétrica mais pequena (com menos inércia), é de salientar o papel de suporte à rede que os carregadores terão.

Em suma, o objetivo do carregador será como o próprio nome indica carregar o veículo, mas tendo em atenção o estado da rede, carregando mais rapidamente ou mais lentamente consoante o valor da frequência da rede (sub ou sobre frequência). Na Figura 71 está presente o fluxograma preliminar da potência de carga a aplicar ao veículo.

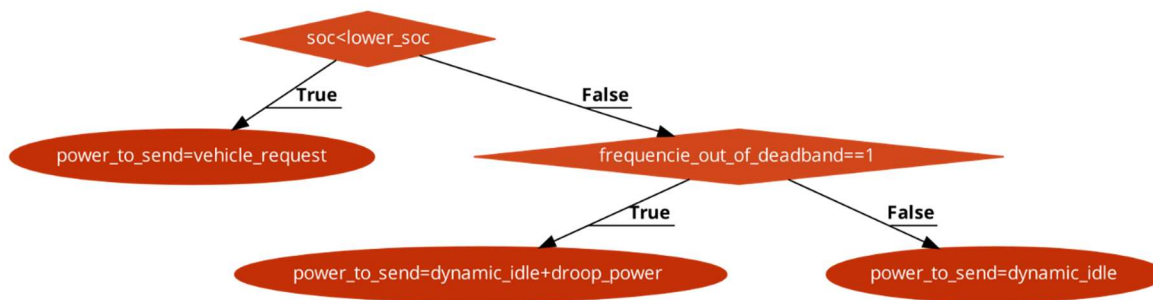


Figura 71 Máquina de estados de envio de potência.

5.1.1 Regulação de frequência

Note-se que existem 3 tipos de regulação de frequência existentes (Figura 72), a regulação primária, a secundária e a terciária. A regulação da frequência primária consiste em aumentar ou diminuir a potência injetada em cada momento pelas unidades geradoras ligadas à rede e está associada à ação do regulador automático do grupo das várias unidades geradoras que satisfazem as condições técnicas para prestar este serviço. A regulação de frequência secundária é caracterizada como a potência injetada na rede, subindo, ou descendo, um pouco como a reserva de regulação primária. Por sua vez, a reserva secundária é a reserva que permite a estabilização da frequência com maior duração, assumindo a estabilização da frequência de forma permanente e substituindo a reserva primária no equilíbrio entre a geração e o consumo. A reserva terciária destina-se a complementar a reserva primária e a reserva secundária se houver uma grande diferença entre a produção e o consumo de eletricidade. É também utilizada em caso de congestionamento da rede.

O carregador em análise entrará na regulação primária de frequência, monitorizando em todos os instantes o desvio de frequência da rede e com esses dados, tomando a decisão de acelerar ou atrasar a carga do veículo bem como descarregar o veículo no caso de existir essa necessidade.

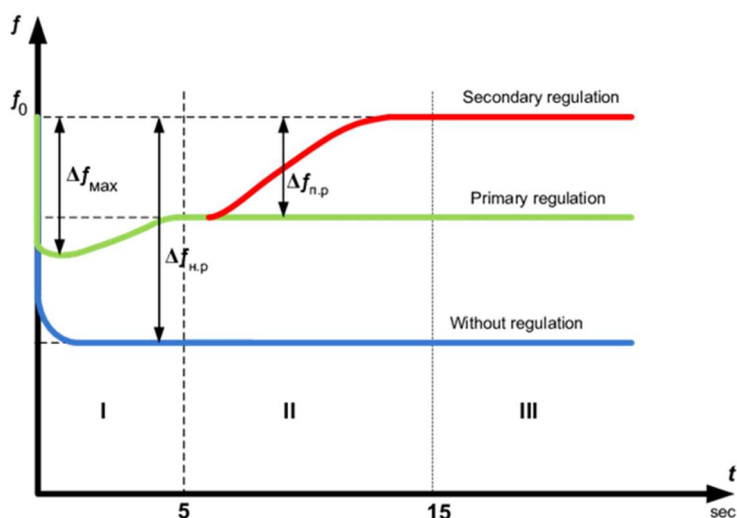


Figura 72 Tipos de regulação de frequência.

5.1.2 Correção do fator potência

Para uma alimentação AC sinusoidal com uma carga linear, o fator de potência (PF) é a medida da relação entre a potência real e potência aparente fornecida pela fonte de corrente alternada. A potência real é medida em watts e representa a energia consumida pela carga para exercer trabalho útil.

A potência reativa, é a energia que flui para trás e para a frente, entre a fonte e a carga e é o resultado da natureza reativa dos componentes no lado da carga.

Potência aparente é a soma vetorial da potência ativa e reativa. Quando a potência reativa é alta, a fonte de alimentação AC tem de fornecer uma grande potência aparente, o que tipicamente obriga ao sobre dimensionamento da fonte e também resulta em perdas mais elevadas de transmissão de energia para a carga.

Cargas que retiram corrente da fonte de uma forma não sinusoidal, provocam distorção da forma de onda de tensão da fonte, levando à degradação de outros equipamentos ligados à mesma rede elétrica. Normas regulamentares (EN61000-3) impõem limites sobre a qualidade da forma de onda de corrente consumida pelos equipamentos, com a finalidade de limitar os níveis harmônicos da corrente. Vários métodos ativos e passivos podem ser usados para moldar a corrente consumida pelos equipamentos para alcançar a conformidade com as normas regulamentares.

Sendo, portanto, importante que o carregador contribua de forma ativa para a correção do fator potência.

O modulo de potência utilizado, utiliza como primeiro estágio de potência um conversor *boost* com correção do fator de potência (PFC), representado na Figura 73 este é capaz de converter a corrente alternada (AC) em corrente contínua (DC) com um alto fator potência (FP). Opera por meio de dois transístores que são controlados por um circuito de controlo para alterar a forma de onda de entrada AC para uma forma de onda DC pulsada. O circuito de PFC ajusta a forma de onda para maximizar a potência média transferida do fornecimento de energia para a carga, enquanto mantém o fator potência de unitário.

O conversor *boost* PFC consiste num circuito retificador, um filtro, um estágio PFC e um conversor *boost*. O circuito retificador converte a corrente de entrada AC em corrente DC pulsante, que é então filtrada para remover o componente de alta frequência. O estágio PFC é responsável por corrigir o fator potência, ajustando a forma de onda de entrada para se aproximar a uma forma de onda sinusoidal pura com fator potência próximo a 1. O conversor *boost* aumenta a tensão DC de saída para um nível adequado à entrada do estágio DC/DC.

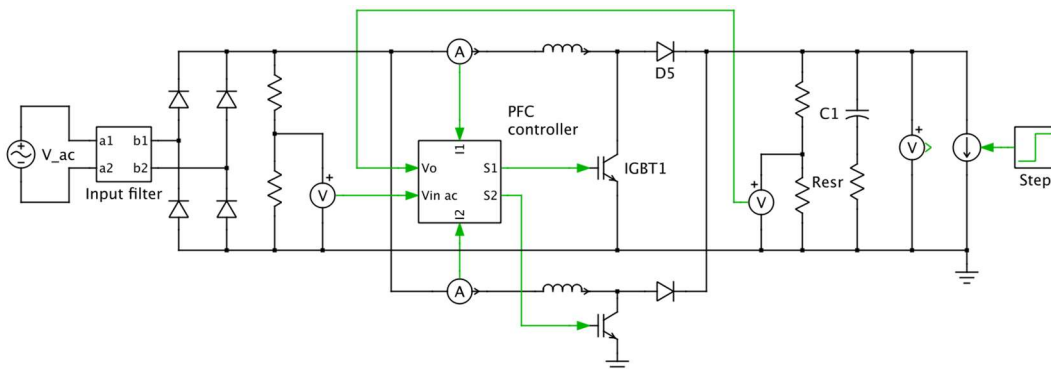


Figura 73 Conversor PFC boost.

5.2 Protocolo CHAdeMO

CHAdeMO é um protocolo de carregamento ultrarrápido destinado a veículos elétricos que tem sido desenvolvido desde 2010 por um consórcio de empresas japonesas, incluindo: Mitsubishi , Subaru , TEPCO , Nissan , Toyota , Hitachi , Honda e Panasonic . Na sua primeira versão este permite cargas com potências de até 62,5 kW com uma tensão de 500 V e 125 A em corrente contínua. A revisão CHAdeMO 2.0 permite uma potência de até 400 kW com uma tensão de 1000 V e 400 A em corrente contínua.

Como já foi mencionado atrás o carregador em desenvolvimento faz utilização do protocolo CHAdeMO. Existem várias versões deste protocolo existindo algumas pequenas alterações nas mensagens entre cada uma delas, no entanto para este caso foi utilizada a versão 0.9.1, que é a primeira versão a contar com compatibilidade de descarga. No início da carga é enviada uma mensagem relativa ao protocolo que é utilizado pelo carregador ao veículo. O veículo é compatível com todas as versões tendo apenas de ser informado acerca da versão a ser utilizada pelo carregador.

Na Figura 74 está representada a tomada CHAdeMO e na Figura 75 a ligação de cada pino da tomada CHAdeMO com o veículo já a Tabela 5 contém a designação de cada pino.

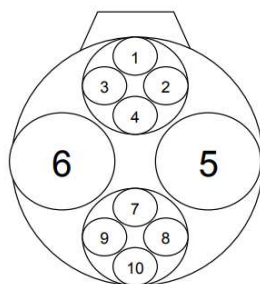


Figura 74 Tomada CHAdeMO.

Tabela 5 CHAdeMO pin layout.

Pin. No.	Name
1	Grounding wire
2	Operation start/stop 1
3	Charge/discharge connector 12V line
4	Operation permission/prohibition
5	DC (-)
6	DC (+)
7	Charge/discharge connector connection verification
8	CAN – H
9	CAN – L
10	Operation start/stop 2

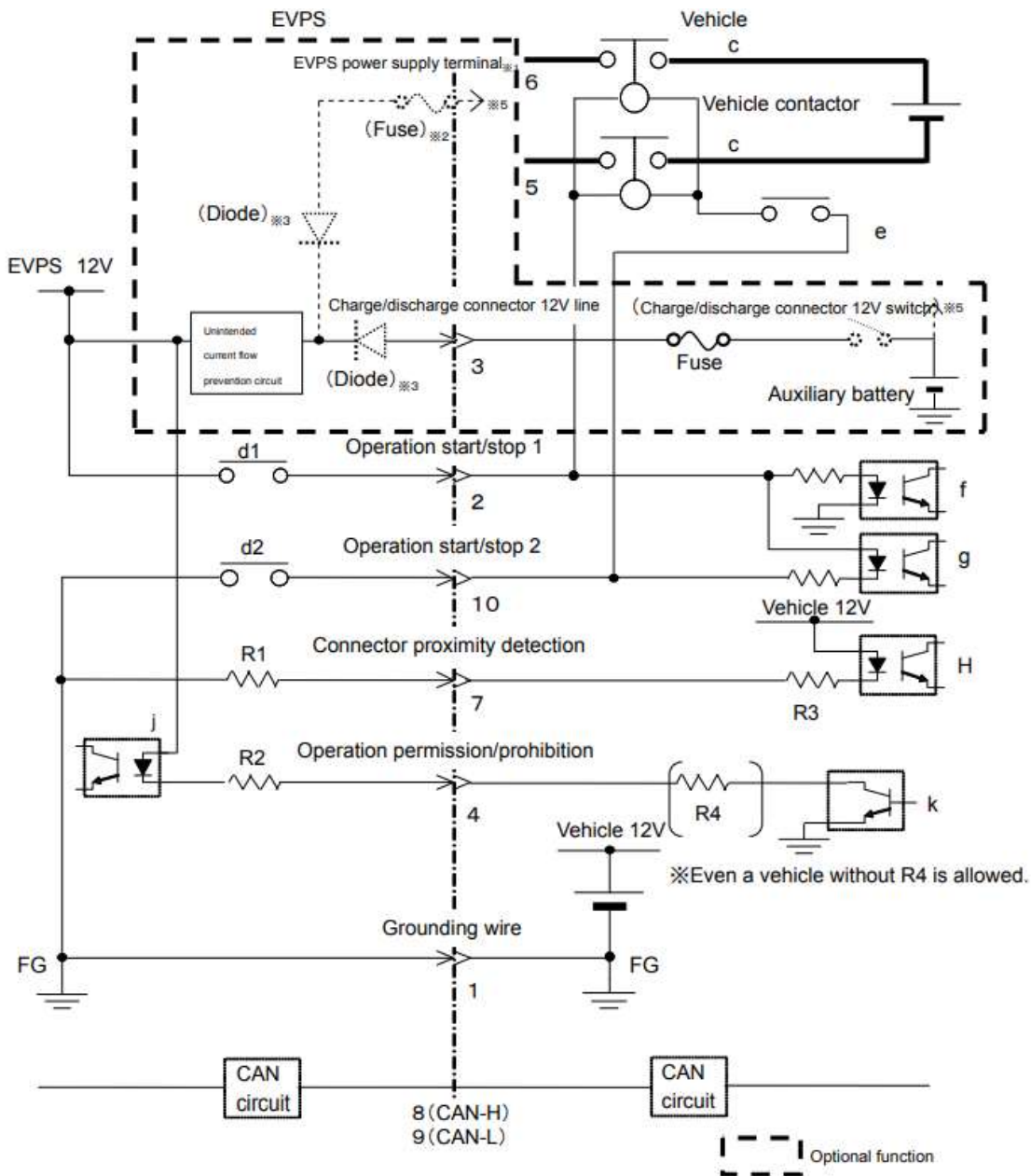


Figura 75 Interface CHAdeMO com o EV.

Durante a sessão de carregamento a receção de mensagens e envio das mesmas entre o veículo e o carregador é feito através do protocolo CANBUS com um período de 100 ms entre mensagens. Na Tabela 6 e na Tabela 7 estão representadas todas as mensagens de receção e transmissão respetivamente (carregador como referência), bem como o seu endereçamento e significados.

Tabela 6 Mensagens RX (EV para Carregador).

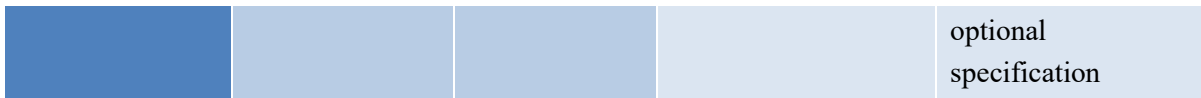
FROM	TO	ID	Byte	Content
Vehicle	EVPS	0x100	0	Minimum charge current
			1,2,3	
			4,5	Maximum battery voltage
			6	Total battery capacity
			7	
		0x101	0	
			1	Maximum charging time
			2	Maximum charging time (extended)
			3	
			4	
			5,6	
			7	
			0x102	0
		1,2		Target battery voltage
		3		Maximum charge current
		4		Fault flag
		5		Status flag
		6		Remaining battery capacity
		7		
		0x200		0
			1,2,3	
			4,5	Minimum

				discharge voltage
			6	Minimum remaining battery capacity for discharging
			7	Maximum remaining battery capacity for charging (optional)
		0x201	0	V2H charge/discharge sequence number
			1,2	Approximate discharge completion time (optional)
			3,4	Available vehicle energy (optional)
			5,6,7	
		0x700	0	Automaker code
			1,2,3,4,5,6,7	

Tabela 7 Mensagens TX (Carregador para EV).

FROM	TO	ID	Byte	Content
EVPS	Vehicle	0x108	0	Identifier regarding the compatibility with the vehicle contactor welding detection using the voltage drooping characteristic of the EVPS's DC side.
			1,2	Available output voltage
			3	Available output current

			4,5	Threshold voltage	
			6,7		
		0x109	0	CHAdEMO sequence control number	
			1,2	Present output voltage	
			3	Present charging current	
			4	Discharge compatibility	
			5	Status and fault flag	
			6	Remaining charging time	
			7	Remaining charging time (extended)	
			0x208	0	Present discharge current
				1,2	Available input voltage
		3		Available input current	
		4,5			
		6,7		Lower threshold voltage	
		0x209	0	V2H charge/discharge sequence control number	
			1,2		
			3,4,5,6,7		
		0x708	0	Compatible maker code	
			1,2,3,4,5,6,7	Conform to each manufacturer's	



5.3 Módulos de potência

No projeto foi utilizado um módulo comercial de potência nominal de 11 kW, com capacidade de conversão bidirecional entre AC (rede) e DC. Projetado para redes inteligente (V2G e V2H) aplicações, possui um design modular capaz de operação paralela, e pode ser usado como parte de um sistema de alta potência. O seu design inovador de 4 fases permite operação em trifásico 16 A por fase ou monofásico 32 A.

Por questões de confidencialidade a imagem do módulo não pode ser divulgada.

5.3.1 Comunicação CANBUS

O *Controller Area Network* - CAN bus é um protocolo baseado em mensagem projetado para permitir que as unidades de controlo eletrónico (ECUs) encontradas nos automóveis recentes, bem como noutros dispositivos, se comuniquem entre si de maneira confiável e prioritária. Mensagens ou “frames” são recebidos por todos os dispositivos conectados no mesmo barramento.

Existem duas variantes do comprimento da mensagem: padrão (Figura 76) e estendida (Figura 77). A diferença real é o identificador adicional de 18 bits no campo de arbitragem.

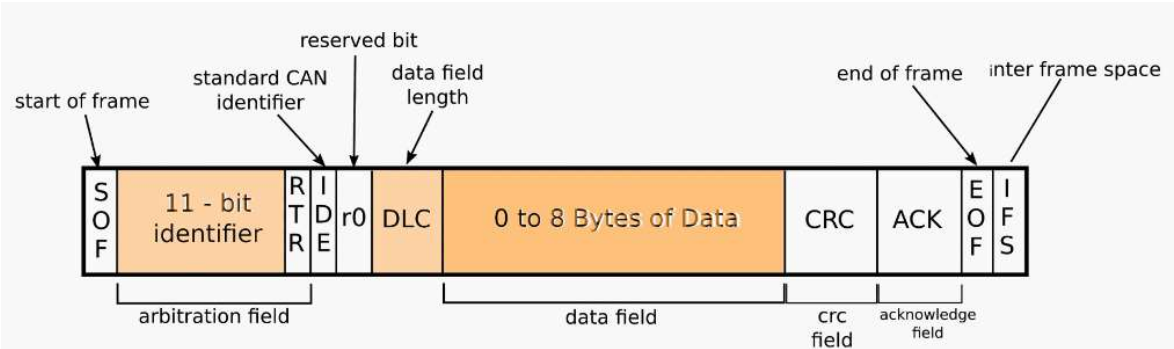


Figura 76 Trama CAN padrão.

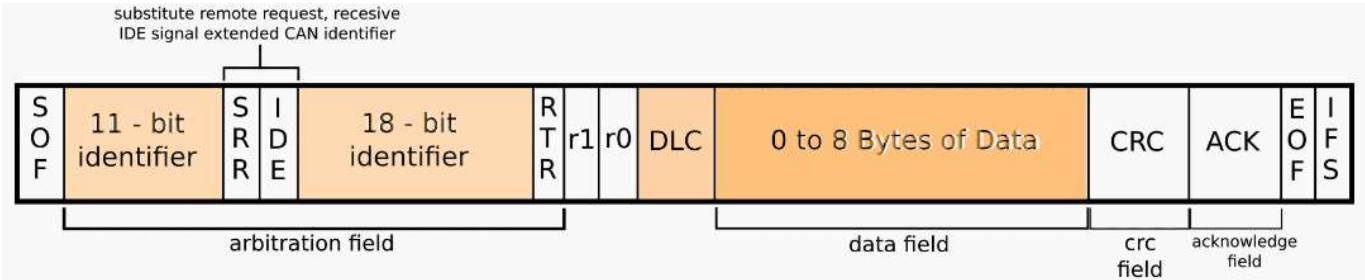


Figura 77 Trama CAN estendida.

No caso dos módulos de potência bidirecionais estes utilizam a comunicação padrão.

De modo a possibilitar numa primeira fase a operação dos módulos foi utilizado o software busmaster, que é um software que permite a leitura e escrita em vários tipos de barramentos como o caso do CANBUS.

Através desta ferramenta é possível construir uma base de dados com todas as mensagens de escrita/leitura dos módulos de potência bidirecionais, tornando mais simples a operação e interpretação de mensagens recebidas pelos módulos.

A utilização deste software possibilitou a interação com os módulos de uma maneira mais célere, sem a necessidade da utilização de uma carta de controlo, possibilitando assim a execução de testes.

Na Figura 78 é possível visualizar a base de dados criada para os módulos de potência no software busmaster.

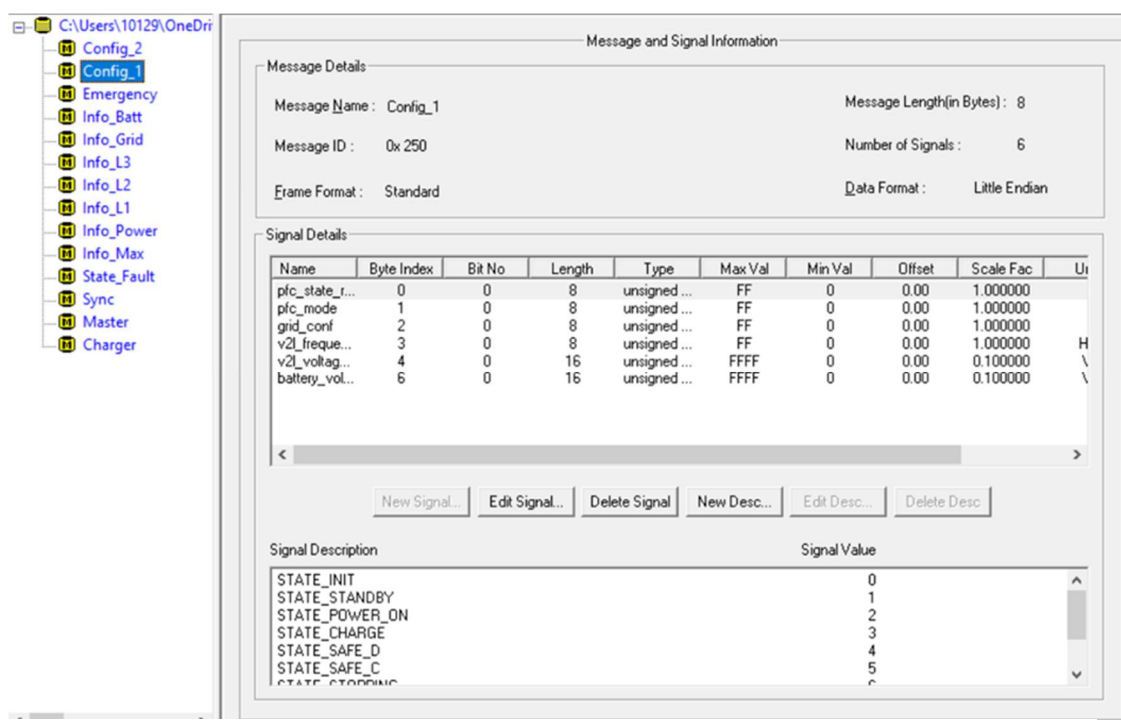


Figura 78 Base de dados BMPU no Busmaster.

Através do Busmaster é também possível a execução de mensagens cíclicas, o que permite a execução de cenários de simulação de carga, antes de se proceder à integração dos módulos.

Na é possível visualizar todas as mensagens de transmissão que têm de ser enviadas aos módulos com um período de 100 ms.

A mensagem *heartbeat* é uma mensagem de presença e é enviada sempre que o módulo de encontro conectado ao computador ou a um controlador, no caso o módulo não receber o *heartbeat* no período de 100 ms, este entra em modo de emergência, abortando qualquer operação que esteja a decorrer.

A mensagem de *Sync* é um *request* de informação, ao ser enviada esta mensagem o módulo envia todas as mensagens RX representadas na Figura 78.

As restantes mensagens são mensagens de configuração, onde são definidos todos os parâmetros requeridos do módulo, como modo de operação, tensão, corrente e potência de saída.

Na Figura 79 está representado o grupo de mensagens cíclicas necessárias à operação dos módulos de potência.

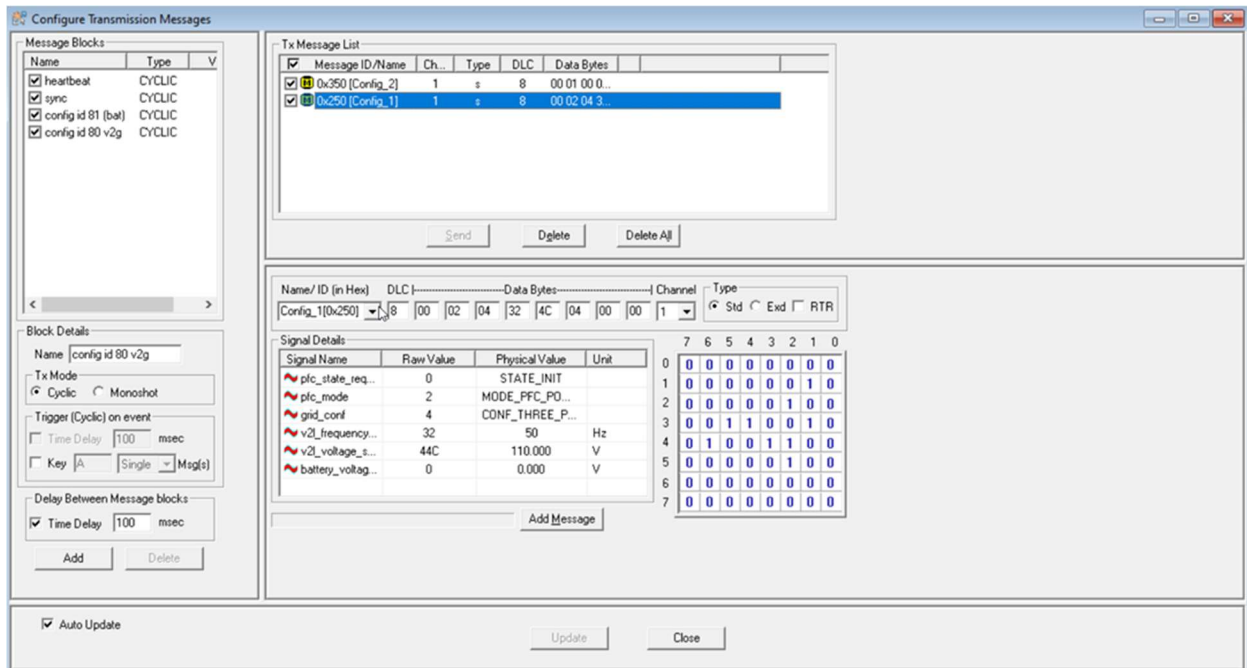


Figura 79 Grupo de mensagens cíclicas de operação do módulo B MPU.

5.3.2 Testes executados aos módulos

Os testes foram definidos para testar a conformidade dos módulos de potência com a norma IEC para sistema de carregamento de veículos elétricos (IEC61851 -23 ED2).

Os pontos críticos deste teste são:

- Latência entre a deteção de um problema e a anulação da corrente e tensão na saída do módulo.
- Tempo de resposta do módulo a mensagens de *start/stop*.
- Verificar se o comportamento dos módulos para sobrecorrente e sobretensão está de acordo com os requisitos da IEC.

5.3.2.1 Teste de curto-circuito DC

Neste teste foram colocadas uma ponta de prova de tensão e corrente na saída DC do módulo de potência, bem como um contactor entre o positivo e o negativo.

Após o início da carga foi ligado o contactor de modo a curto circuitar o módulo de potência.

A Figura 80 representa o esquema do teste executado para melhor compreensão.

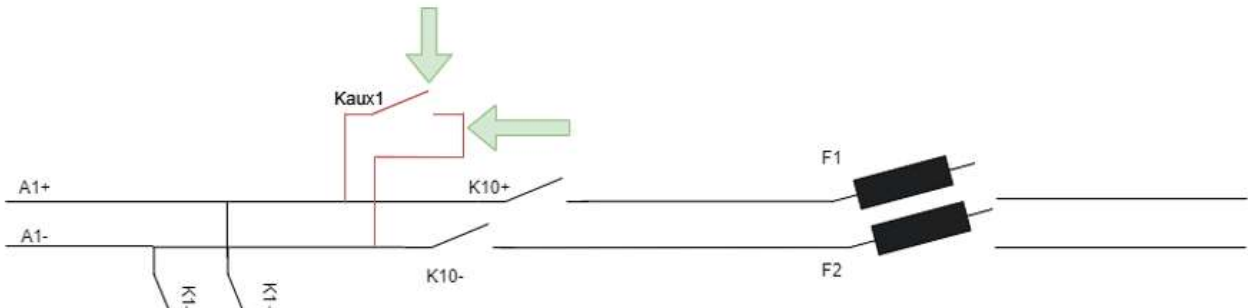


Figura 80 Teste de curto-circuito.

5.3.2.3 Teste de atraso

Neste teste foi analisado o tempo necessário entre o envio de uma mensagem CAN (mensagem – Definir tensão de saída) e alteração dos valores de tensão na saída.

Para saber quando a mensagem CAN foi enviada, foi fechado um relé.

A Figura 81 representa o esquema do teste executado para melhor compreensão.

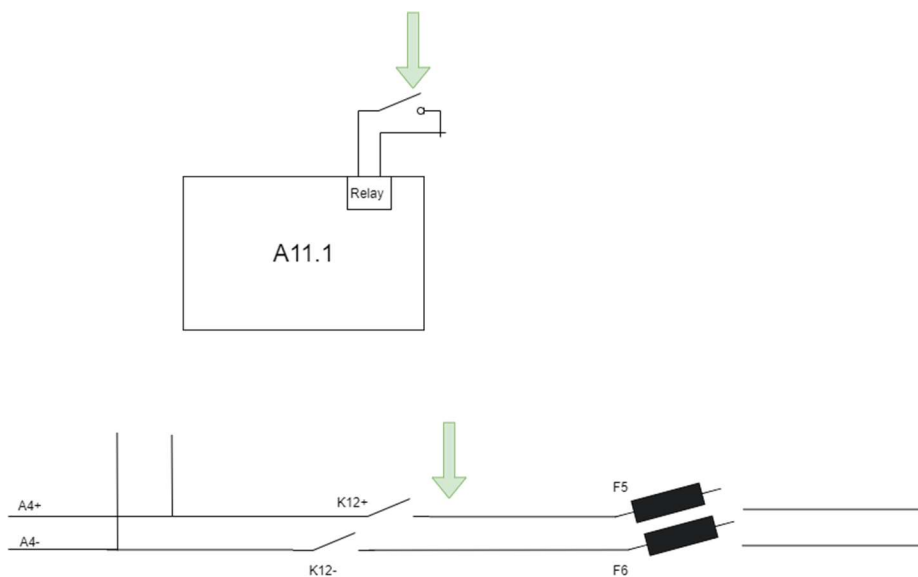


Figura 81 Teste de atraso de comunicação.

5.3.2.4 Teste de regulação de saída DC

Para certificar o ponto (CC.6.3 Regulação de corrente de saída CC –IEC 61851-23) foi colocada a ponta de prova na saída DC do módulo e verificado o valor enviado (note-se que foram enviados valores diferentes de modo a testar toda a gama do módulo) pelo controlo do módulo.

O erro máximo permitido entre a corrente de saída e a corrente alvo solicitada pelo veículo segundo a norma IEC é:

- ± 150 mA se o valor de corrente requerido for igual ou inferior a 5 A;
- $\pm 1,5$ A se o valor de corrente requerido for superior a 5A e inferior ou igual a 50 A;
- ± 3 % da corrente máxima de saída do equipamento EV CC se o valor da corrente requerida for superior a 50 A.

5.3.2.5 Teste de paragem de emergência

Utilizando o mesmo *setup* utilizado no teste de atraso de comunicações, com apenas uma diferença neste caso, foi enviada por CAN uma mensagem de paragem.

De acordo com a norma IEC, se uma paragem de emergência for acionada pelo equipamento, este deverá reduzir a sua saída da seguinte forma:

- A corrente de saída deverá ser inferior a 5 A em 30 ms;
- A tensão de saída deve ser inferior a 60 V entre o terminal positivo e negativo, inferior a 28V entre o terminal positivo e a terra e o terminal negativo e a terra em 1s.

5.3.2.6 Load dump

Load dump significa a desconexão de uma carga motorizada. Refere-se à desconexão do veículo elétrico (Ev) do carregador enquanto a bateria se encontra em carga.

Quando acontece um *load dump*, o controlo do carregador deve parar o fornecimento de energia imediatamente, no entanto, como a abertura dos contactores é relativamente rápida, a energia acumulada nos componentes passivos (indutivos / capacitivos) do carregador irá causar uma sobretensão de saída.

Em qualquer caso de *load dump*, a sobretensão não deve exceder 110 % do limite máximo de tensão do veículo tal como comunicado durante a fase de inicialização ou + 50 V, o que for mais alto.

A Figura 82 representa o esquema do teste executado para melhor compreensão.

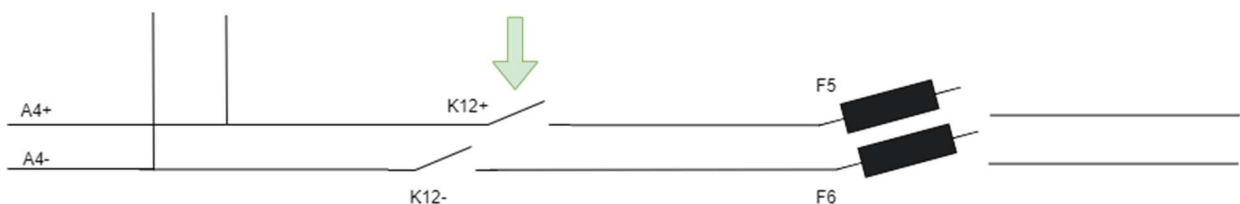


Figura 82 Teste de *load dump*.

A Figura 83 representa a *dashboard* do *software* proprietário do módulo de potência no momento em que foi executado o teste de *load dump*.

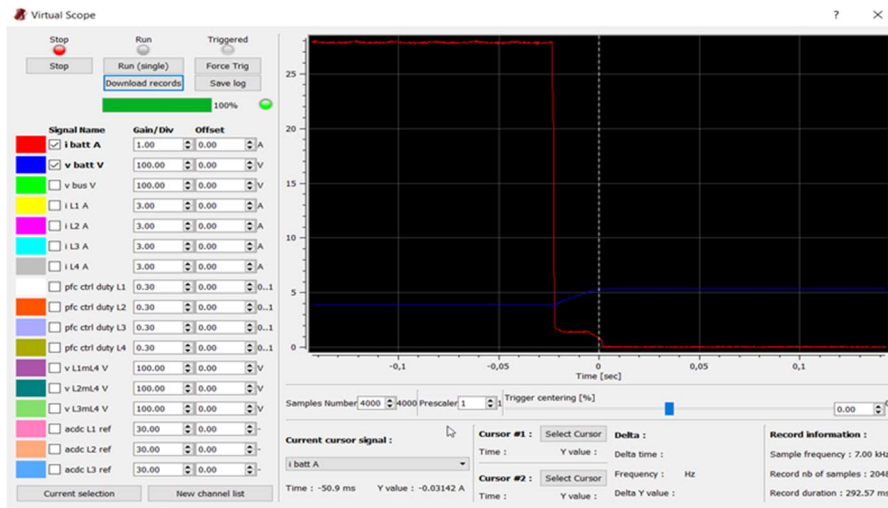


Figura 83 Teste de *load dump* ao módulo de potência bidireccional.

5.3.2.7 Teste de simulação V2G com 2 módulos

O último teste executado aos módulos de potência antes da integração do controlo na carta de baixo nível foi o teste de simulação V2G. Neste teste foram colocados 2 módulos *back-to-back* (saídas de conectadas). Um dos módulos como fonte de tensão, a simular a bateria do veículo e o outro modulo em modo V2G (inversor). Este teste foi importante para verificarmos o funcionamento e parâmetros de configuração dos módulos, de modo a executar corretamente a descarga do veículo.

Na Figura 84 é possível visualizar a janela de mensagens do *Busmaster* durante o teste de simulação V2G, onde é visível a mensagem de corrente do módulo inversor (mensagem *Info_Batt*). Note-se que neste teste os dois módulos estavam a ser controlados ao mesmo tempo através do mesmo computador (cada módulo encontrava-se configurado com um id diferente de modo a possibilitar a configuração de um como fonte de tensão e outro como inversor).

Time	Tx/Rx	Channel	Msg	ID	Message
16:01:24:8330	Rx	1	s	0x4B1	Info_Batt
		0xC1E	310.200		V
		0xFF54	6536.400		A
		0xFDF0	650080.000		W
		0x0	0.000		W
16:01:24:1290	Rx	1	s	0x5D0	0x5D0
16:01:24:8290	Rx	1	s	0x650	0x650
16:01:24:8310	Rx	1	s	0x1D1	State_Fault
16:01:24:8310	Rx	1	s	0x2D1	Info_Max
16:01:24:8310	Rx	1	s	0x3D1	Info_Power
16:01:24:1310	Rx	1	s	0x1D0	State_Fault
16:01:24:1310	Rx	1	s	0x2D0	Info_Max
16:01:24:1310	Rx	1	s	0x3D0	Info_Power
16:01:24:1320	Rx	1	s	0x4D0	Info_L1
16:01:24:1320	Rx	1	s	0x1B0	Info_L2
16:01:24:1330	Rx	1	s	0x2B0	Info_L3
16:01:24:1330	Rx	1	s	0x3B0	Info_Grid
16:01:24:1330	Rx	1	s	0x4B0	Info_Batt
		0xBBF	300.700		V
		0xB2	17.800		A
		0x217	5350.000		W
		0x0	0.000		W
16:01:24:8370	Rx	1	s	0x4D1	Info_L1

Figura 84 Janela de mensagens Busmaster durante teste de simulação V2G.

A Figura 85 mostra a medição de corrente executada entre o lado DC dos dois módulos, onde é possível verificar um fluxo de corrente existente entre ambos.

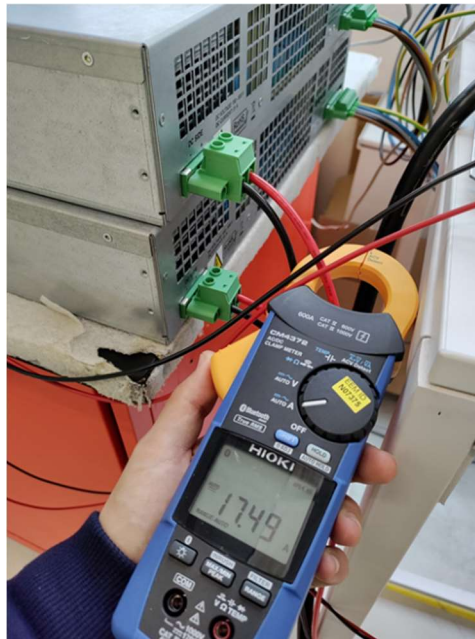


Figura 85 Pinça de corrente durante simulação V2G.

5.3.3 Arquitetura do carregador

A arquitetura do carregador segue a política da empresa, e é em tudo semelhante à arquitetura dos restantes carregadores integrantes do portefólio.

Na Figura 86 é possível observar o diagrama simplificado da arquitetura do carregador.

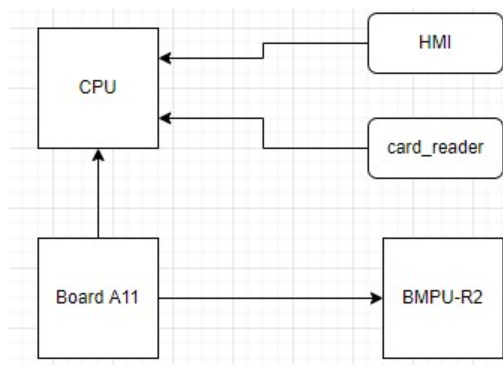


Figura 86 Diagrama simplificado do carregador.

Foi na carta de controlo de baixo nível que se prendeu a maior parte do desenvolvimento e alterações deste carregador face aos restantes. A carta é responsável por manter a comunicação com o veículo durante toda a carga e com o módulo, esta comunicação é feita via CAN_BUS. Todas as funcionalidades de baixo nível, como abertura de contactores, testes de isolamento da

mangueira de carga, e no caso deste carregador o algoritmo do carregamento inteligente são executadas por esta carta.

O CPU é responsável por enviar a ordem de início de carga e validar o cartão apresentado pelo utilizador do carregador, bem como apresentar variadas métricas através da HMI.

Na Figura 87 é possível observar o *setup* de testes que foi utilizado em toda a fase de desenvolvimento do carregador.

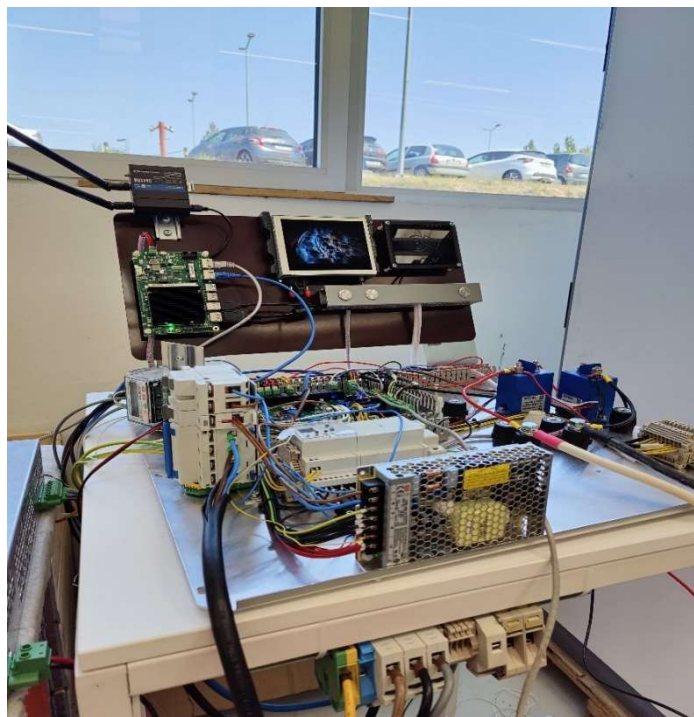


Figura 87 Setup de testes.

5.3.4 Carta de Controlo de baixo nível

A placa de controlo de nível inferior é o componente encarregado de supervisionar as operações essenciais do carregador de veículos elétricos, ou seja, estabelecer comunicações com o veículo e o módulo de potência, gerir os contactores e executar algoritmos inteligentes de carga/descarga. Esta placa integra um microprocessador STM32F7 e é constituída pelos seguintes elementos:

- Microprocessador STM32F7: Atua como núcleo da placa, processando e executando instruções e algoritmos necessários para o funcionamento adequado do carregador.
- 13 saídas de relés: Estas saídas são empregues para gerir dispositivos externos, como contactores, que controlam o fluxo de corrente para o veículo elétrico durante o processo de carga.
- 6 entradas digitais: Estas entradas são utilizadas para receber sinais digitais provenientes de dispositivos externos, como sensores e interruptores, fornecendo informações pertinentes ao microprocessador para tomada de decisões.

- 2 ADCs (Conversores Analógico-Digital): Permitem que a placa processe sinais analógicos, tais como corrente e tensão, convertendo-os em valores digitais para serem utilizados pelo microprocessador.
- 2 portas de comunicação CAN: As portas CAN (*Controller Area Network*) são empregues para estabelecer comunicação com outros dispositivos no carregador e com o veículo elétrico, possibilitando a troca de informações e comandos entre os dispositivos.
- 2 portas de comunicação RS485: São interfaces de comunicação seriais utilizadas para conectar a placa a outros dispositivos externos, como medidores de energia ou sistemas de monitoramento.
- Porta Ethernet: Esta porta possibilita a conexão com uma rede local ou a Internet para comunicação via protocolo Telnet, permitindo a monitorização e controlo remoto do carregador.
- 2 controladores RGB: Estes controladores permitem gerir fitas LED RGB para fins estéticos e de sinalização do carregador. Podem ser configurados para exibir cores e padrões distintos, indicando, por exemplo, o status do carregamento.

Em suma, a placa de controlo de nível inferior desempenha um papel central no carregador de veículos elétricos, sendo responsável por gerir todas as comunicações e controlo dos dispositivos envolvidos no processo de carga e descarga. Através dos seus diversos componentes e interfaces de comunicação, a placa de controlo de nível inferior assegura um carregamento eficiente e seguro para os veículos elétricos.

5.3.5 Carta de gestão da estação (*broker* MQTT)

A placa de gestão da estação desempenha um papel crucial no controlo de alto nível do carregador de veículos elétricos. Operando com uma distribuição Linux, a sua principal função é fornecer instruções à placa de controlo de baixo nível, como iniciar e concluir a carga, entre outras tarefas essenciais.

A comunicação entre a placa de controlo de baixo nível e a placa de gestão da estação é estabelecida através do protocolo de comunicação MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*). Este protocolo, baseado em publicação/assinatura e de natureza leve, foi concebido a pensar em dispositivos com recursos limitados e em redes com largura de banda restrita e alta latência.

Dentre as mensagens mais relevantes transmitidas à placa de alto nível, destacam-se as leituras de potência e energia provenientes dos medidores, o tempo decorrido da sessão de carga e, no caso do carregador V2G (*Vehicle-to-Grid*), o perfil de carga com a potência instantânea desejada, que deve ser enviado para a placa de controlo de baixo nível.

O protocolo MQTT possui um cabeçalho de tamanho reduzido e um *payload* compacto, tornando-o apropriado para dispositivos com recursos limitados. Além disso, oferece suporte a Qualidade de Serviço (QoS) nos níveis 0, 1 e 2, permitindo aos utilizadores selecionarem o nível de garantia de entrega das mensagens. O MQTT utiliza também uma conexão TCP/IP de baixa latência, viabilizando a rápida e fiável ligação entre dispositivos IoT e o *broker* MQTT.

Em suma, a placa de gestão da estação é um componente fundamental no carregador de veículos elétricos, responsável pela supervisão de alto nível e pela comunicação com o *BackOffice*. Ao estabelecer uma comunicação eficiente com a placa de controlo de baixo nível por meio do protocolo MQTT, esta placa garante o correto funcionamento do sistema, possibilitando um carregamento seguro e eficaz.

5.4 Algoritmo *smart charging*

O carregador com capacidade de descarga diverge dos restantes carregadores na medida em que este tem como base um algoritmo de carga inteligente. Este algoritmo tem como principal preocupação as consequências do carregamento em massa na rede elétrica, tendo a capacidade de prestar suporte à rede (*Ancillary services*).

O carregador tem como alvo a utilização doméstica e por isso não existe a necessidade de cargas ultrarrápidas pois sempre que o veículo não esteja a ser utilizado será conectado ao carregador, no entanto, caso o utilizador o deseje é possível desligar o modo V2G e o veículo irá carregar à potência máxima, não sendo deste modo utilizado o algoritmo inteligente.

Na Figura 88 está representada a máquina de estados geral do carregador.

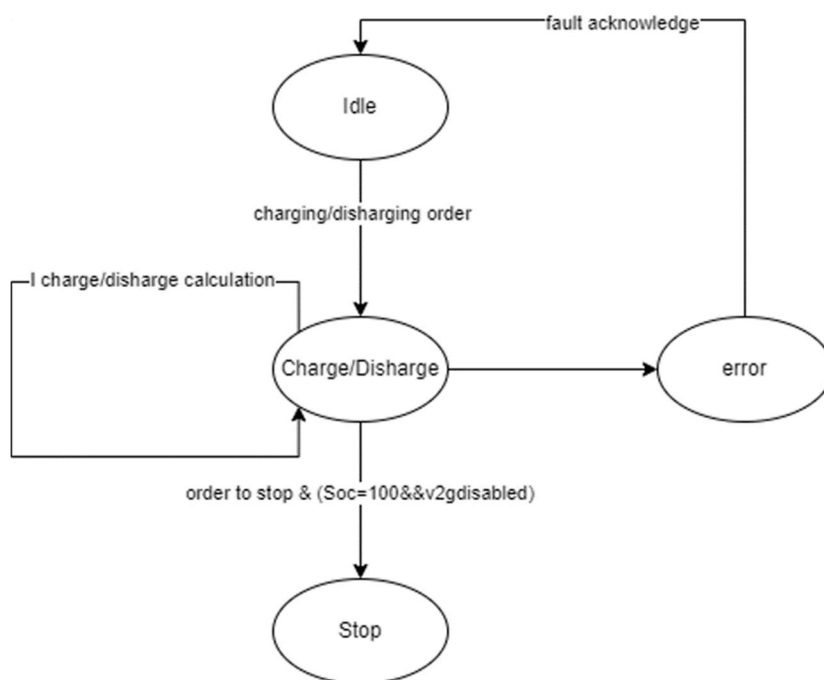


Figura 88 Máquina de estados geral do carregador V2G.

O carregador em estudo terá de ser capaz de decidir se o veículo deve carregar ou descarregar mediante as condições da rede elétrica, o *setpoint* de potência recebido por OCPP e o estado da SoC do veículo, parâmetro este que é definido pelo utilizador.

Note-se que o veículo só irá prestar suporte à rede quando a sua SoC for superior à SoC mínima definida pelo utilizador, até lá a potência de carga será máxima.

Na Figura 89 está representado o fluxograma macro de decisão da potência a aplicar em carga/descarga.

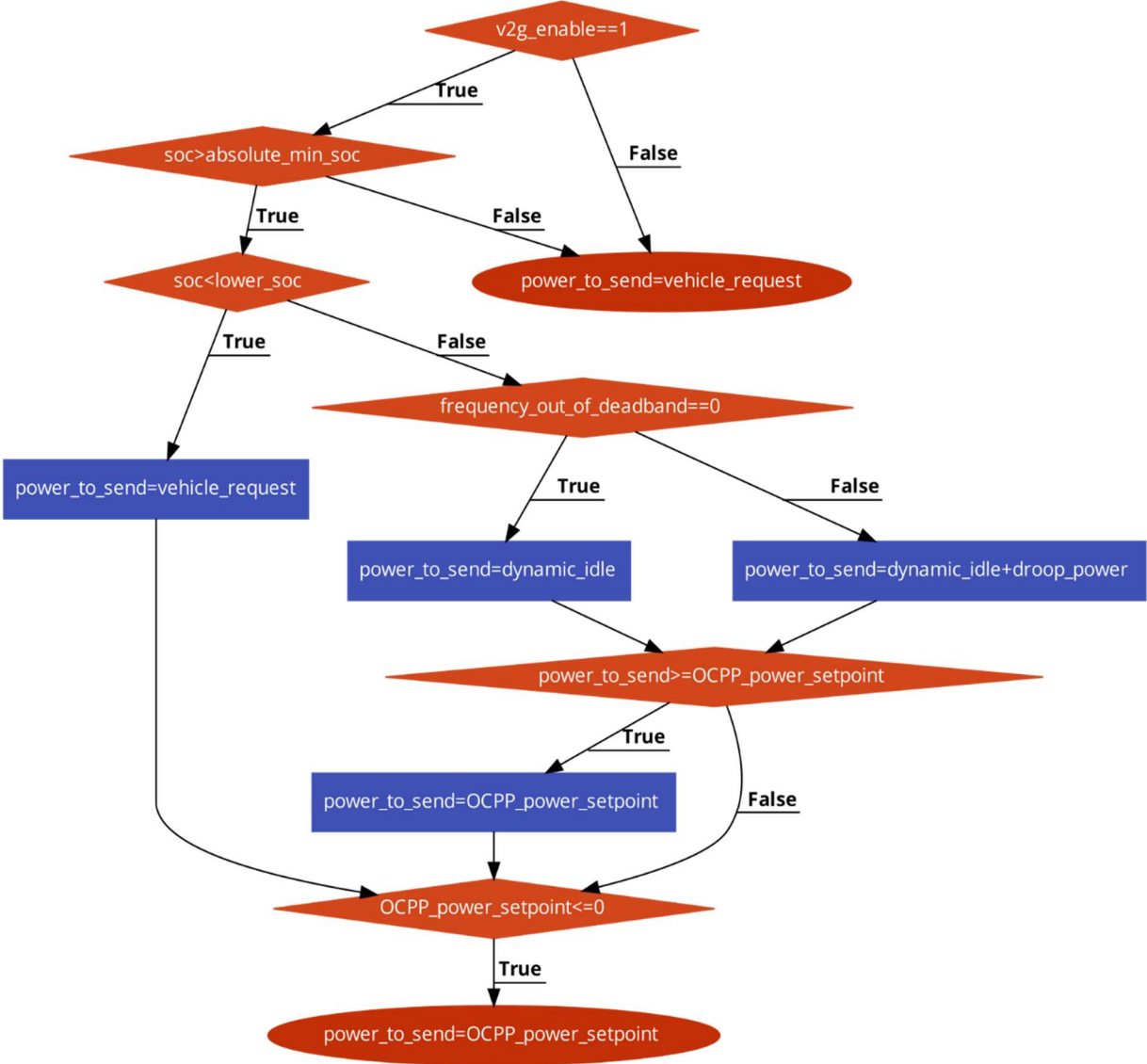


Figura 89 Fluxograma de decisão de potência.

5.4.1 Máquina de estados *Charge/Discharge*

A máquina de estados *Charge/Discharge* é responsável pelo cálculo da corrente de carga e descarga a aplicar ao veículo. Dentro desta máquina de estados correm duas submáquinas de estados, a submáquina responsável pelo controlo da SoC e a submáquina responsável pelo controlo da frequência da rede.

A Figura 90 representa a máquina de estados principal do carregador, e é nela que estão as principais diferenças deste carregador para os restantes.

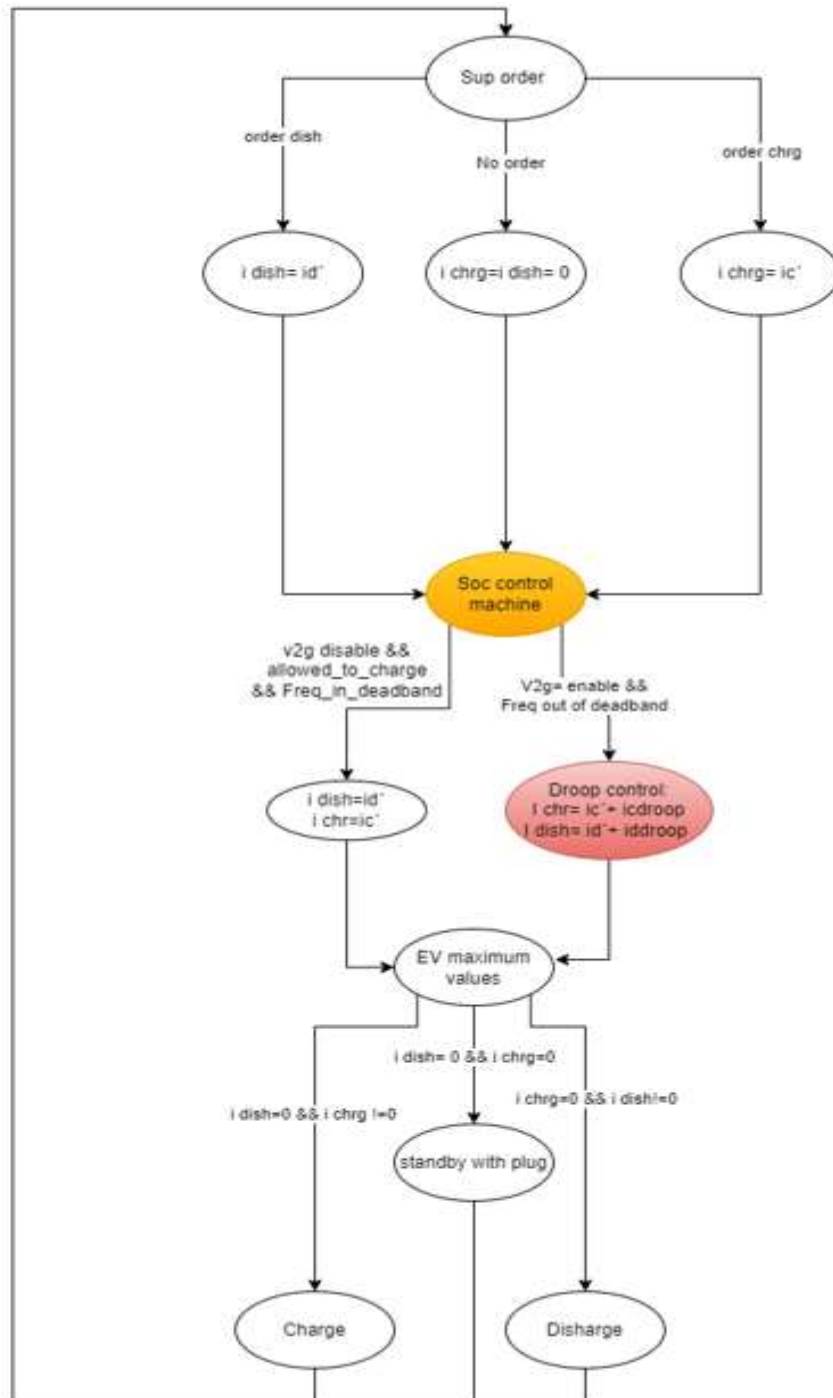


Figura 90 Máquina de estados *charge/discharge*.

5.4.2 Função de controlo da SoC

A máquina de estados do controlo da SoC (Figura 91) é responsável por controlar a ativação das *flags* (*allowed_to_charge* e *allowed_to_discharge*). O carro irá carregar ou descarregar apenas quando lhe é dada ordem e a respetiva *flag* de permissão está ativada, caso contrário a ordem será ignorada e o veículo permanecerá na rotina anterior. Os valores máximo e mínimo da SoC são definidos pelo utilizador.

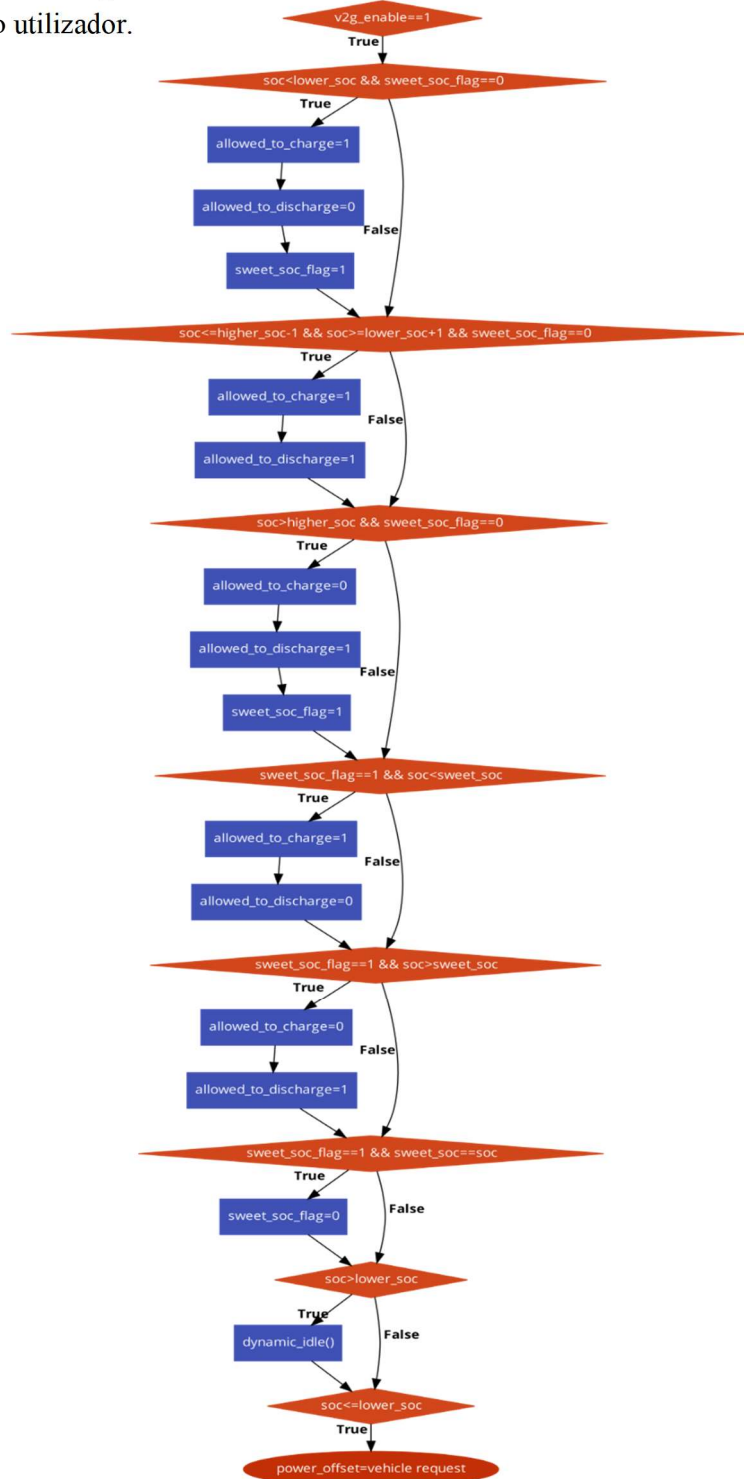


Figura 91 Fluxograma da função de controlo da SOC.

5.4.3 Função de regulação de frequência

Este carregador conta com uma característica de regulação de frequência que lhe permite prestar suporte primário de regulação de frequência.

A regulação de frequência primária significa que quando a frequência da rede (ciclo) se desviar do valor nominal, o sistema de controlo de regulação do gerador na rede controlará automaticamente o aumento (queda de frequência) ou diminuição (aumento de frequência) da potência ativa para limitar as características de variação da rede.

A potência que necessita de ser injetada ou absorvida da rede no modo de regulação de frequência é chamada de (*droop power*), e é igual a:

$$\text{droop power} = \text{frequency error} / K$$

K é uma constante que pode ser calibrada para o declive da resposta de frequência desejada (7 é o valor por defeito).

A função de regulação de frequência standard presente no carregador está representada na Figura 92, e conta com uma banda morta de 600 mHz de 49,7 Hz a 50,3 Hz.

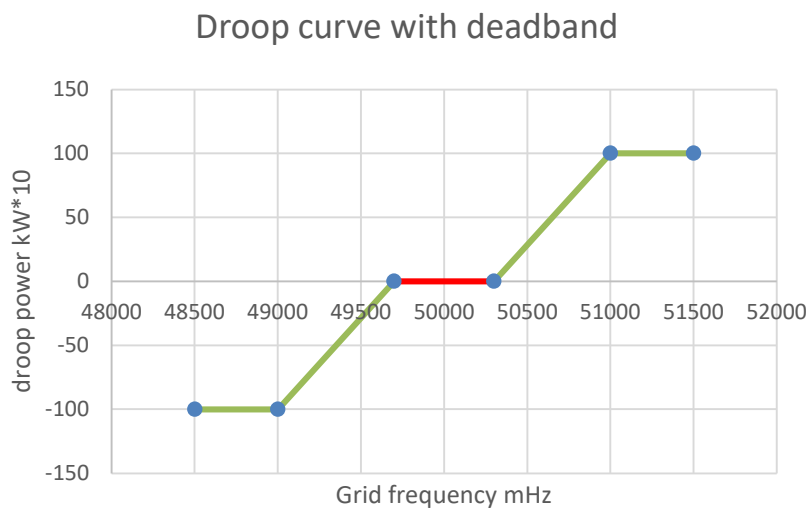


Figura 92 Função de regulação de frequência.

5.4.4 Dynamic idle

O algoritmo inteligente irá correr dentro do estado denominado de *Charge/Discharge*.

O utilizador terá de definir qual a SoC máxima e mínima que pretende manter o seu veículo, e o carregador apenas irá estar permitido a prestar suporte à rede dentro dessa gama. Adicionalmente foi criado um perfil de potência base que o carregador irá utilizar de modo a acelerar o processo de prontidão do veículo ao serviço de suporte, mas minimizando o tempo a que este estará a consumir uma potência elevada da rede. Esta funcionalidade é denominada de *dynamic idle* e tem como base o desvio da SoC real do carro para a SWEET_SOC (que é a mediana da SoC máxima e mínima escolhida pelo utilizador) e encontra-se representado na Figura 93. Se o SoC for superior ao valor médio entre o SoC máximo e o mínimo, o veículo será descarregado a uma potência fixa de 1kW até obter o SoC desejado. Note-se que, após uma diferença de mais de 40% entre o SoC e o *sweet_soc*, a potência de carga será saturada a um valor de 4 kW.

Adicionalmente poderá ser recebido um setpoint de potência OCPP que no caso de ser positivo irá funcionar como um limite máximo, e no caso de ser negativo funcionará como um setpoint real que será sobreposto a todo o algoritmo. Este setpoint será emitido pelo centro de comando responsável pelo posto de carregamento, o objetivo final será coordenar vários carregadores de modo a melhorar a qualidade da distribuição de energia em redes debilitadas.

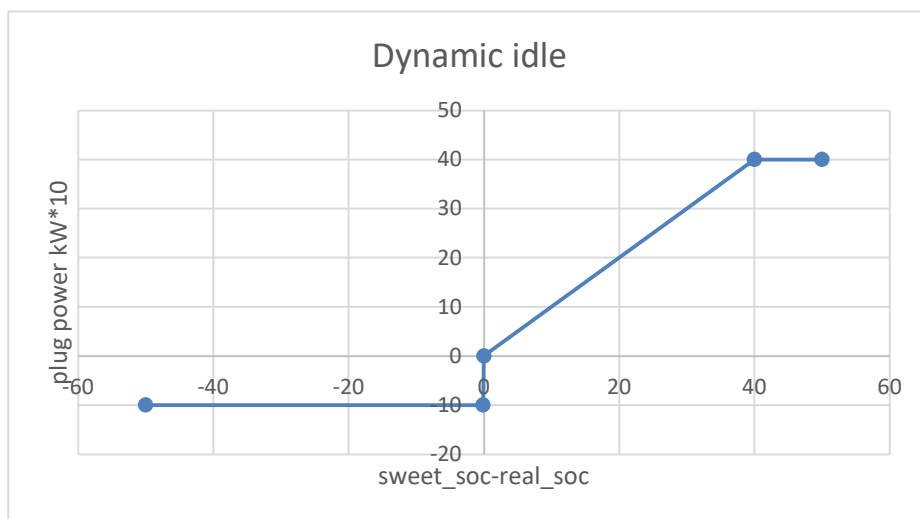


Figura 93 Dynamic idle.

5.5 Testes Executados

A execução dos testes apresentados teve como objetivo a validação das funcionalidades integrantes do carregador em variados cenários. Os testes foram processados com o auxílio de um script em *python* que altera as variáveis de *setpoint* de potência e a frequência da rede lida através do protocolo MQTT. Adicionalmente este script envia os valores de *setpoint* de potência, frequência da rede, SoC do veículo e potência de carga para um ficheiro *xlsx* de modo a possibilitar a análise dos dados recolhidos.

Para a execução dos testes foi utilizado um Nissan Leaf de 2016 que conta com uma bateria de 39 kWh com uma tensão nominal de 360 V.

5.5.1 Carga unidirecional

5.5.1.1 Descrição

A fim de verificar o funcionamento normal do carregador, foi realizado um teste de um Nissan Leaf, de modo a verificar a evolução da potência/tensão/SoC da carga ao longo da sessão, como objetivo de permitir a comparação com o perfil de carga tipificado deste EV.

O teste de carga unidirecional visa testar a capacidade do carregador em teste para carregar o veículo normalmente, sem interferência do algoritmo de carga inteligente e regulação de frequência.

5.5.2 Resultados

Neste teste, o modo V2G estava desabilitado, o que faz com que o carregador se comporte como um carregador unidirecional normal. Espera-se ver uma curva de potência com a mesma forma que num carregador normal escalonado para uma potência máxima de 11 kW.

Na Figura 95 é possível verificar a curva de potência da sessão de carga com a função V2G desativada, onde a corrente foi mantida a 30 A até ser atingido o nível de Soc de 93%. O valor máximo de potência atingiu 11 kW, como esperado.

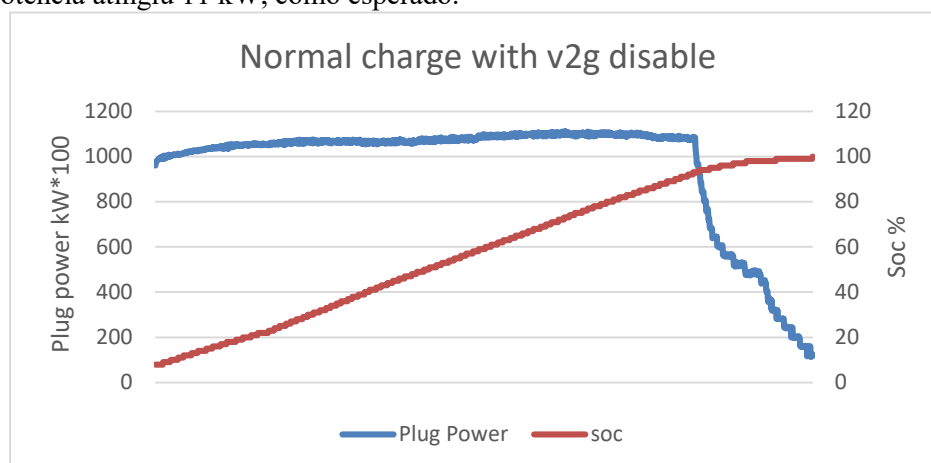


Figura 95 Curva de carga Nissan Leaf no carregador V2G.

5.5.3 Carga bidirecional

5.5.3.1 Descrição

Uma vez que este carregador é um carregador com capacidade bidirecional, é extremamente importante realizar também testes com sessões de carga e descarga.

Neste teste pretende-se, durante um processo de carga, realizar variações do setpoint de potência (simulando um perfil recebido pelo CPMS), até ao máximo permitido, quer em carga como em descarga.

Também deve ser verificado que com SoC inferior a 20% (mínimo SoC para descarga de ordem superior), o pedido de descarga é ignorado, evitando deste modo que o veículo atinja níveis perigosamente baixos de carga.

Note-se que no caso de setpoints de potência, se este for positivo, o carregador interpreta este valor como um limite máximo de potência, podendo trabalhar sempre com potências inferiores ou iguais ao setpoint, enquanto no caso de um valor negativo, supõe-se que o carregador aplica a potência indicada.

5.5.3.2 Resultado

Com o Veículo com SoC inferior a 30% foi realizada uma carga normal sem a função de regulação da frequência ativa.

Quando o valor é positivo, o ponto de regulação de potência funcionará efetivamente como um limite apesar do seu nome, sendo a potência entregue ao veículo decidida pela função *dynamic_idle*, isto pode ser visto na secção A do gráfico presente na Figura 96. Quando o valor é negativo, o ponto de regulação da potência funcionará como um ponto de regulação real.

Como pode ser visto, o valor do setpoint de potência funciona como um máximo enquanto é positivo e funciona como um setpoint quando é negativo, note-se que para uma tomada inferior a 20% o setpoint de descarga foi ignorado, e o carregador ficou em *standby* (secção B).

Na secção C pode ser vista a limitação do setpoint de potência positiva.

Na secção D o setpoint de potência mudou para um valor negativo, contudo, porque a tomada era agora mais de 20%, o carregador iniciou a descarga até atingir 20% da tomada e o carregador iniciou o estado de espera, ignorando o setpoint de potência (secção E).

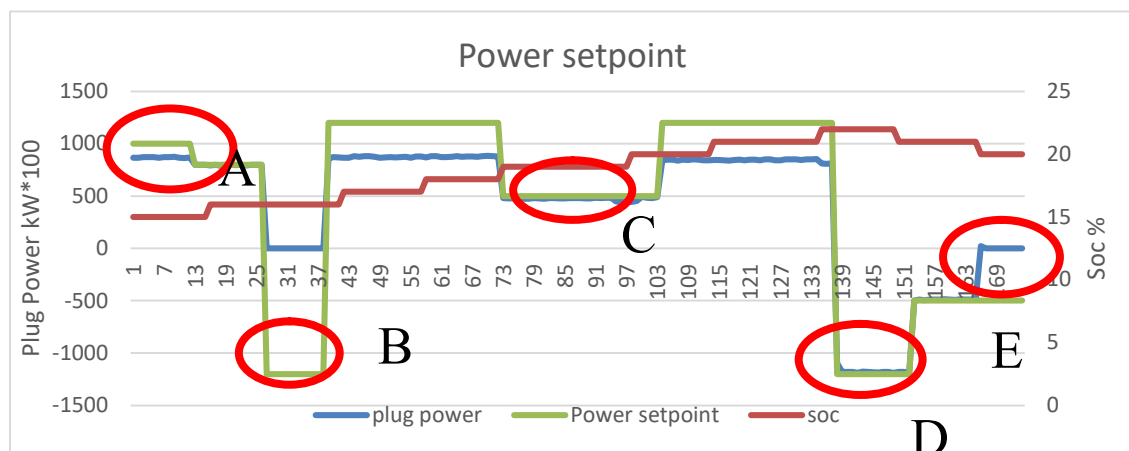


Figura 96 Sessão de teste do setpoint de potência.

5.5.4 Sessão de carga com *dynamic idle* ativo

Como teste, o Nissan Leaf foi utilizado com uma SoC de 3% numa sessão de carga normal em que o carregador tinha a função de regulação de frequência desativada. Para controlar a potência de carregamento, o carregador utilizou a função *dynamic idle*.

Na Figura 97 pode ver-se a potência de carga a diminuir ao longo do tempo enquanto o SoC aumenta.

O principal objetivo desta função é preparar o veículo para estar pronto para participar na regulação de frequência o mais rapidamente possível, sendo ao mesmo tempo conservador em termos de procura energética, o que é um ponto positivo quando instalado em redes com baixa inercia e em horas de ponta.

Note-se que com esta função ativa o carregador tem ainda margem para aumentar a potência de carga no caso de uma sobrefrequência na rede (no caso de a função de regulação de frequência se encontrar ativa).

A sessão representada na Figura 97 conta apenas com zona de carga da sessão, que é a zona que conta com uma potência dinâmica, aplicando a zona de descarga uma potência estática.

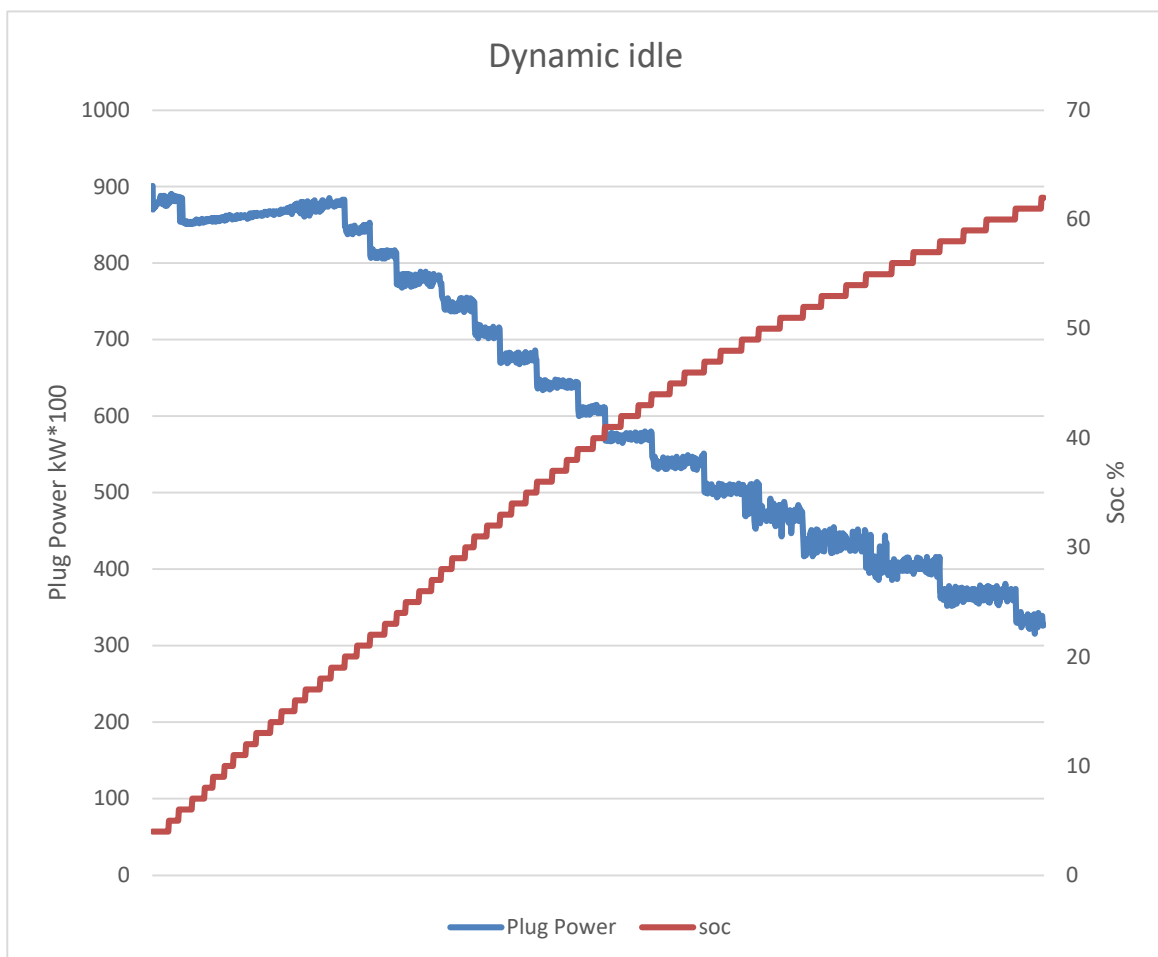


Figura 97 Sessão de carga com *dynamic idle* ativo.

5.5.5 Teste de sobrefrequência

5.5.5.1 Descrição

Para realizar este teste foi introduzido um erro na leitura de frequência de modo a causar uma perturbação fictícia na leitura de frequência da rede.

Espera-se um aumento da potência de carga relacionada com o cenário de sobrefrequência na rede, de modo que o carregador possa contribuir para a regulação da frequência e por consequência carregando a bateria do veículo mais rapidamente.

É também importante testar a banda morta, a saturação da potência e a entrada desta função apenas quando o veículo se encontra dentro da SoC permitida.

5.5.5.2 Resultados

Como esperado, é possível verificar na Figura 98 um aumento da potência de carga, em resposta ao aumento da frequência da rede.

Note-se que o aumento do nível de frequência não foi suficiente para saturar o sistema.

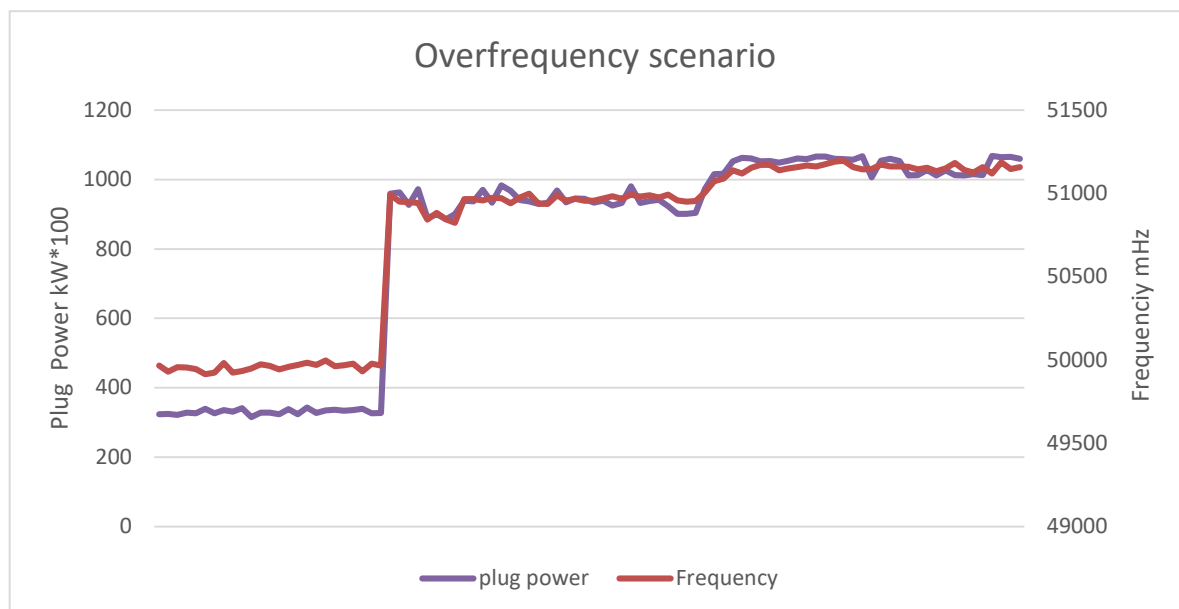


Figura 98 Teste de sobrefrequência.

5.5.6 Teste de subfrequência

5.5.6.1 Descrição

Para realizar este teste foi introduzido um erro na leitura de frequência de modo a causar uma perturbação fictícia na leitura de frequência da rede.

Espera-se uma redução da potência de carga e em alguns casos uma transição para descarga relacionada com o cenário de subfrequência na rede, deste modo a o carregador pode contribuir para a regulação da frequência da rede.

É também importante testar a banda morta, a saturação da potência e a entrada desta função apenas quando o veículo se encontra dentro da SoC permitida.

5.5.6.2 Resultado

Como esperado, é possível verificar na Figura 99 numa primeira fase uma diminuição da potência de carga seguida da transição para descarga, em resposta à diminuição da frequência da rede.

Note-se que a diminuição do nível de frequência não foi suficiente para saturar o sistema.

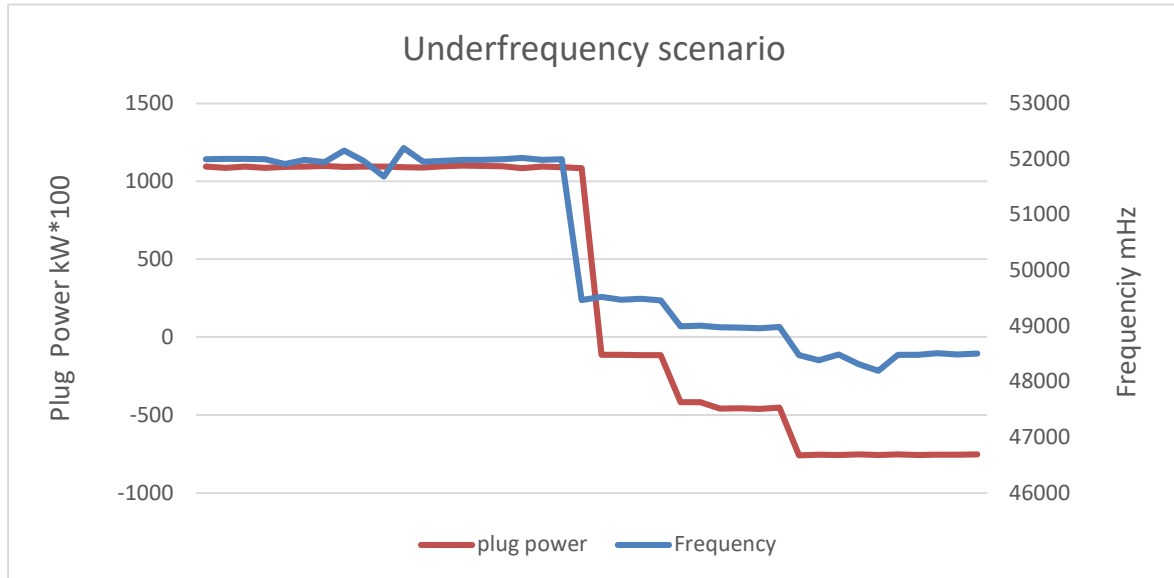


Figura 99 Teste de subfrequência.

5.5.7 Teste da banda morta (regulação de frequência)

5.5.7.1 Descrição

A banda morta é um parâmetro muito importante na característica de regulação de frequência presente no carregador, torna possível que o carregador se comporte normalmente em condições normais da rede, e que entre apenas no modo de regulação de frequência quando é necessário.

5.5.7.2 Resultado

Na Figura 100 pode ser vista a resposta do carregador através de uma gama de frequências de 4000 mHz.

A saturação da potência é limitada a 10 e -10 kW.

Note-se que na banda morta (secção A) ainda há alguma corrente a fluir no sentido do veículo, isto é, devido à função *dynamic idle*, que tinha um valor de 3 kW naquele momento e estava a tentar alcançar a SoC para 76% (por isso todo o gráfico tem um offset).

Note-se que o valor final da potência é o resultado da soma entre a função de regulação de frequência e a função *dynamic idle*.

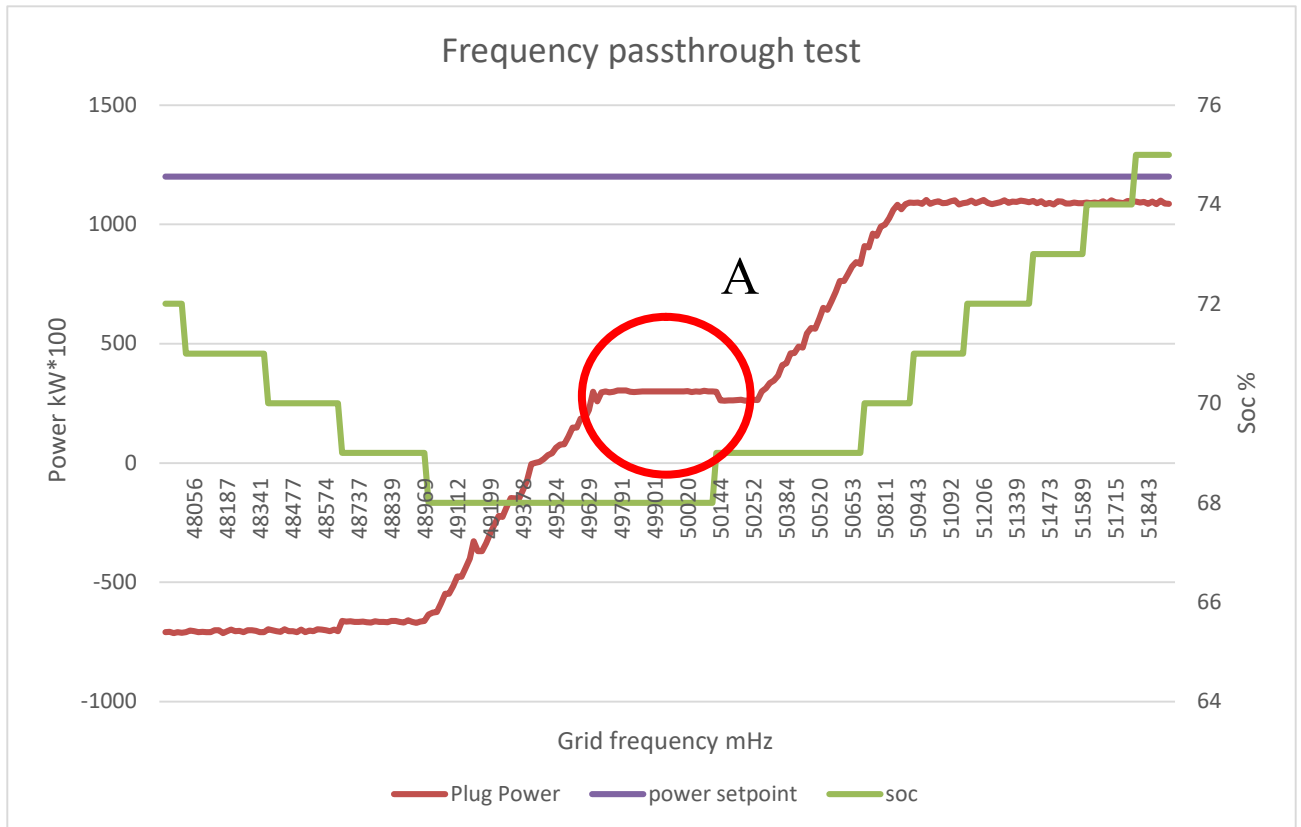


Figura 100 Teste de varrimento de frequência.

5.6 Produto final

5.6.1 Análise do barramento DC

As imagens recolhidas pelo osciloscópio apresentam informações importantes sobre as características do sinal. Estas imagens podem ser utilizadas para avaliar o desempenho do conversor em termos de eficiência energética, qualidade do sinal de saída e outras métricas relevantes.

Na Figura 101 é possível observar a passagem de carga para descarga executada durante a sessão de carga do Nissan Leaf.

O tempo de transição de aproximadamente 6 segundos foi obtido através da implementação de um filtro na saída do *setpoint* de potência, e teve como objetivo tornar a transição carga/descarga mais conservadora devido a uma falha detetada no *firmware* dos módulos de potência.

Note-se que este tempo poderá ser facilmente reduzido através da alteração dos parâmetros do filtro no código, sendo que o objetivo será poder proceder à sua remoção após a atualização dos módulos de potencia com uma corrigida.

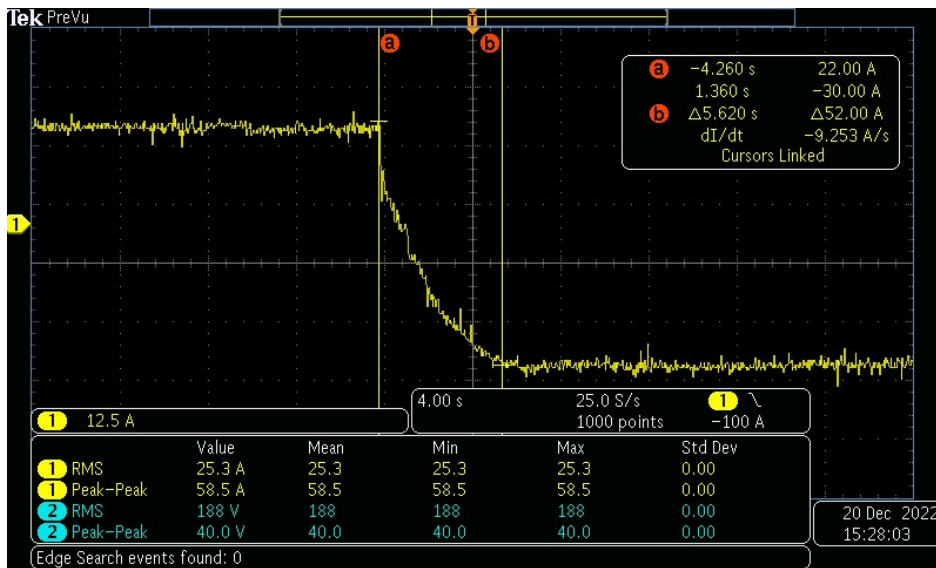


Figura 101 Passagem de carga para descarga do barramento DC.

5.6.2 Osciloscópio lado AC

Na Figura 102 é possível observar a forma de onda recolhida no lado AC do carregador durante a sessão de descarga do Nissan Leaf.

Note-se que a forma de onda é referente a uma das fases, sendo a onda azul relativa à corrente e a amarela relativa à tensão da mesma fase.

O facto de as ondas se encontrarem em oposição de fase é um exemplo comum de injeção de potência ativa na rede.

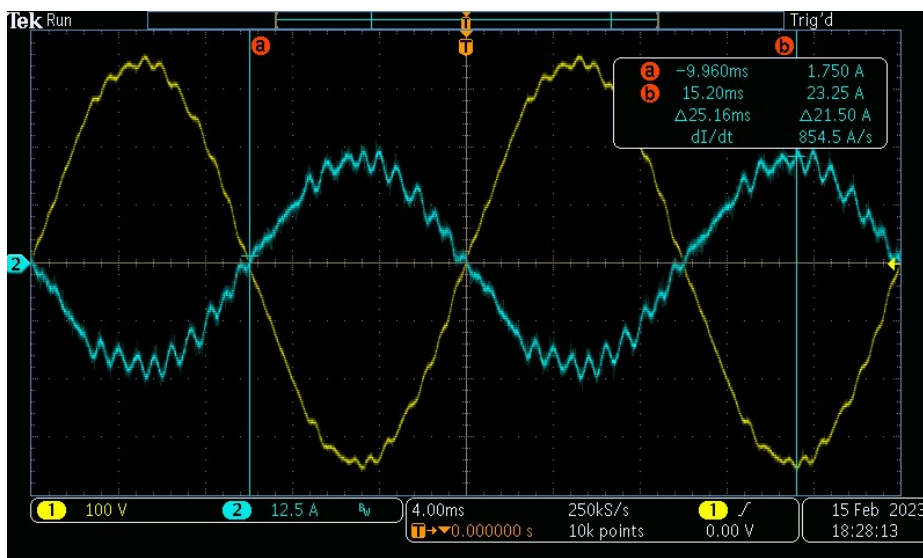


Figura 102 Injeção na rede.

A Figura 103 representa um cenário de carga do veículo, ou seja, a absorção de potência ativa da rede.

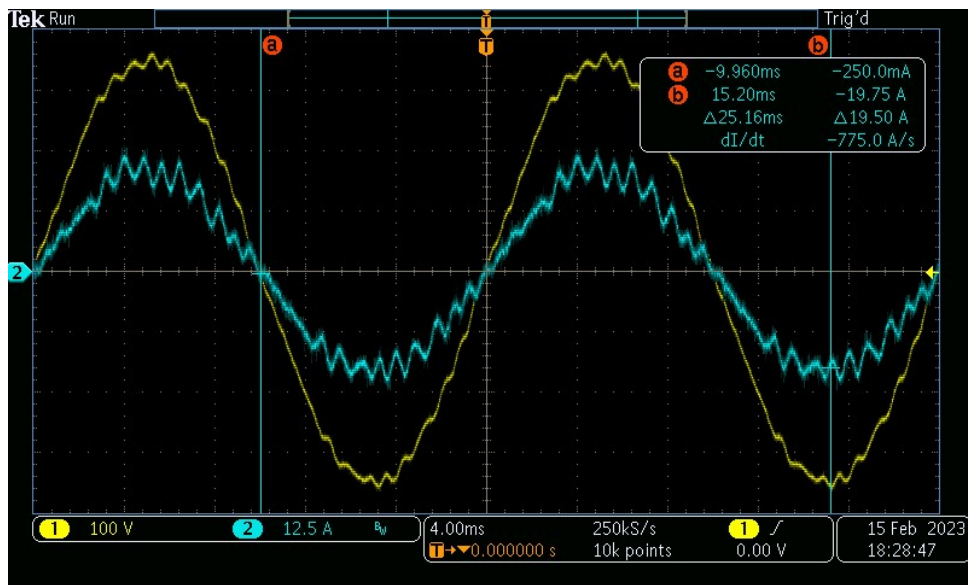


Figura 103 Absorção da rede.

Na Figura 104 por sua vez é possível observar a transição de descarga para carga do veículo durante a sessão. Do lado da rede esta passagem é marcada pela inversão da fase da corrente, passando esta a encontrar-se em fase com a tensão.

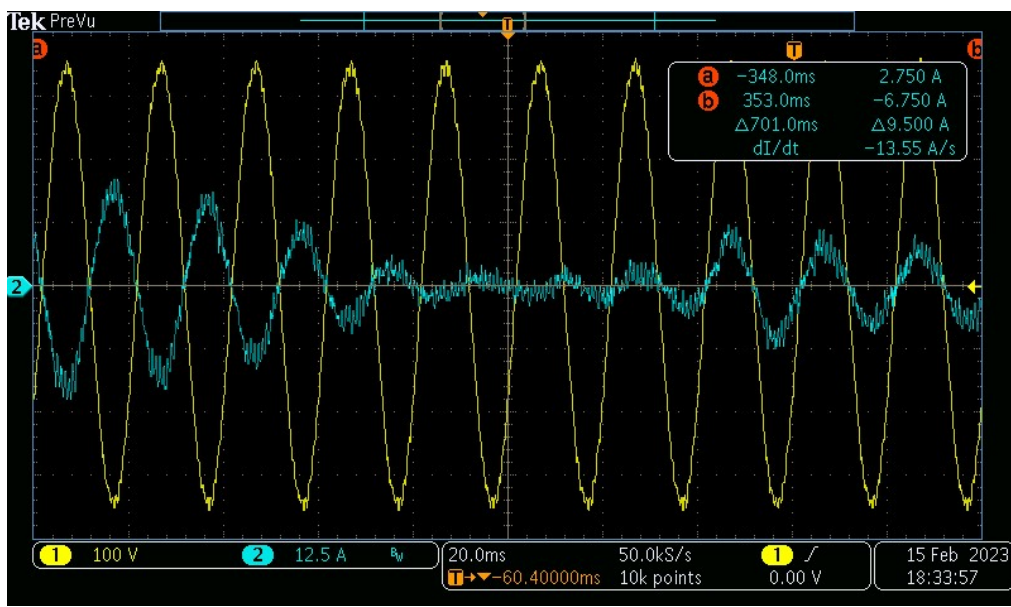


Figura 104 Transição Descarga/Carga do veículo.

Por fim, a Figura 105 representa o momento do lado da rede em que o veículo se encontra em standby, estando neste momento o carregador apenas conectado ao veículo, mas sem carregar.

A corrente parasita visível na imagem do osciloscópio é referente ao controlo da tensão do barramento DC, pois apesar do carregador se encontrar em standby ainda está conectado ao veículo e por isso necessita de mandar a tensão do seu barramento igual à tensão da bateria do veículo.

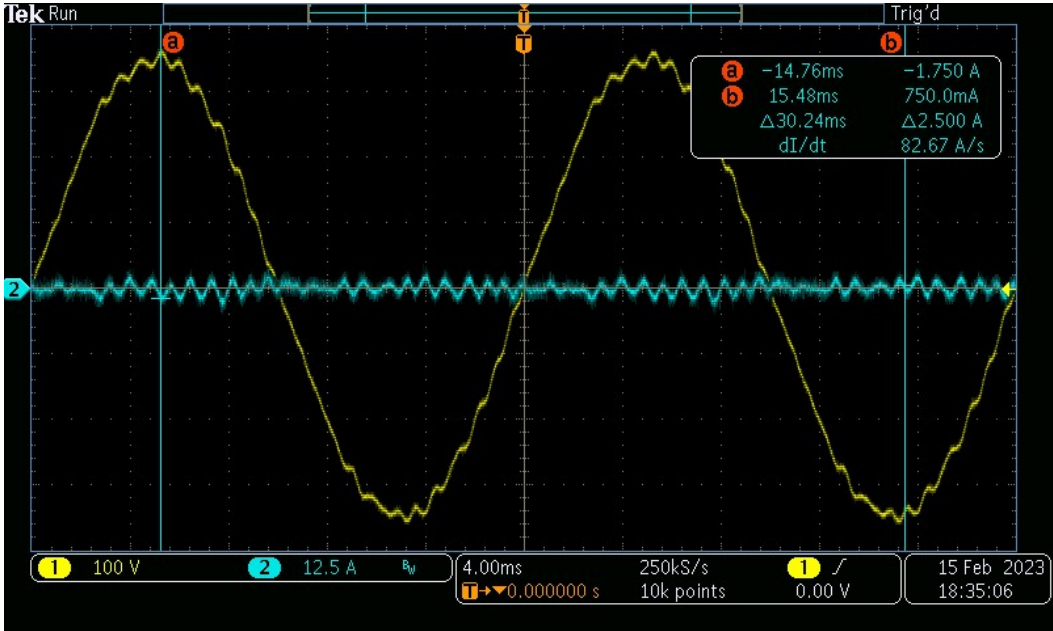


Figura 105 Standby.

6. Conclusões e Sugestões de Trabalho Futuro

6.1 Conclusões

Ao longo desta tese, foi abordado um tema de grande relevância no contexto atual da transição energética: a mobilidade elétrica e sua integração com as *smart-grids*. A busca por soluções de carregamento mais eficientes e sustentáveis para veículos elétricos tem sido uma preocupação constante das empresas e governos em todo o mundo, visando reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar os efeitos das mudanças climáticas.

No capítulo 2, foi apresentado um panorama atual da mobilidade elétrica e das *smart-grids*, abordando as principais tendências e desafios envolvidos na integração dessas tecnologias. Destacou-se, em especial, o potencial do carregamento bidirecional (V2G) como ferramenta para maximizar a eficiência energética, permitindo que os veículos elétricos não apenas consumam energia da rede, mas também a forneçam de volta, contribuindo para o equilíbrio da procura e oferta de energia.

No capítulo 3, foi realizada a simulação e o dimensionamento dos componentes do conversor AC/DC, composto por um *dual active bridge* e uma ponte trifásica, para a alimentação de um carregador V2G. Foram considerados diferentes parâmetros de projeto, como a frequência de comutação, a tensão de saída, a corrente máxima e o fator de potência, visando obter um sistema eficiente e de baixo custo.

No capítulo 4, foi abordada a implementação do conversor *em hardware in loop*, utilizando a RTBox, para validar a simulação realizada anteriormente e verificar o desempenho do sistema em condições reais. Foram realizados testes de desempenho em diferentes cenários, como variações de carga e de frequência, e os resultados obtidos confirmaram a eficiência e robustez do sistema.

Por fim, no capítulo 5, foi apresentado o desenvolvimento de um carregador V2G baseado no conversor AC/DC simulado e implementado em hardware in loop. Foram realizados testes de carga e descarga do veículo elétrico, além da integração do sistema com a rede elétrica, utilizando um sistema de comunicação para permitir o controle remoto do carregador. Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade do uso do conversor AC/DC para o desenvolvimento de um carregador V2G eficiente e confiável.

Em resumo, esta dissertação apresentou uma contribuição significativa para o desenvolvimento de soluções de carregamento mais eficientes e sustentáveis para veículos elétricos, por meio da simulação e implementação em hardware in loop de um conversor AC/DC para carregadores V2G. Os resultados obtidos fornecem uma base sólida para futuras pesquisas e implementações práticas de sistemas de carregamento bidirecional.

6.2 Sugestões de trabalho Futuro

Com base nos resultados e conclusões desta dissertação, propõem-se diversas áreas de investigação e desenvolvimento para trabalhos futuros. Uma das áreas a explorar é a pesquisa e desenvolvimento de algoritmos de controlo avançados que possam aprimorar a eficiência e estabilidade dos carregadores V2G, otimizando a sua integração com as redes inteligentes. Além disso, é pertinente analisar o impacto da implementação em larga escala de carregadores V2G na estabilidade e segurança das redes elétricas, considerando cenários de elevada penetração de veículos elétricos e fontes de energia renovável.

Outra vertente importante consiste em avaliar o desempenho de diferentes tipos de conversores AC/DC, tais como conversores modulares e conversores de múltiplos níveis, no que concerne à eficiência e fiabilidade dos sistemas de carregamento bidirecional. Paralelamente, a aplicação de técnicas de *machine learning* e inteligência artificial na gestão e controlo dos sistemas V2G poderá contribuir para melhorar a capacidade de resposta a eventos e variações na rede elétrica.

A integração de sistemas de armazenamento de energia estacionários, como baterias e supercondensadores, nos carregadores V2G é uma área promissora a ser explorada, com o objetivo de aumentar a flexibilidade e resiliência das redes elétricas. Será também relevante desenvolver estratégias de tarifação e modelos de negócio inovadores que promovam a adoção dos carregadores V2G e incentivem os utilizadores de veículos elétricos a participar ativamente na gestão da rede elétrica.

A análise do impacto dos carregadores V2G no envelhecimento e na vida útil das baterias dos veículos elétricos permitirá o desenvolvimento de soluções que minimizem a degradação e maximizem a durabilidade das mesmas. Adicionalmente, é fundamental estudar a interação entre os carregadores V2G e outras tecnologias emergentes no domínio da mobilidade elétrica, como a carga sem fios e a carga ultra-rápida, de forma a desenvolver soluções integradas e compatíveis com diferentes requisitos de carregamento.

Por fim, a investigação do potencial de integração dos carregadores V2G com sistemas de micro-redes e comunidades energéticas locais poderá fomentar a autossuficiência energética e a resiliência das comunidades perante eventos adversos. A avaliação do impacto socioeconómico e ambiental da implementação dos carregadores V2G em diferentes contextos e regiões permitirá identificar barreiras e oportunidades para a sua adoção e difusão em escala global.

Referências Bibliográficas

- [1] S. F. Tie e C. W. Tan, «A review of energy sources and energy management system in electric vehicles», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20. pp. 82–102, 2013. doi: 10.1016/j.rser.2012.11.077.
- [2] lugenergy, «lugenergy». <https://www.lugenergy.pt/tipos-de-carregamento-4modos/> (acedido 4 de Setembro de 2022).
- [3] A. Ajanovic e R. Haas, «Electric vehicles: solution or new problem?», *Environ Dev Sustain*, vol. 20, pp. 7–22, Dez. 2018, doi: 10.1007/s10668-018-0190-3.
- [4] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *SPEEDAM 2014: International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion: Ischia (Italy), 18th-20th June 2014*.
- [5] L. Yong Dong, «ChaoJi Standard».
- [6] energysage, «energysage», *Pros and cons of electric cars*. <https://www.energysage.com/electric-vehicles/101/pros-and-cons-electric-cars/> (acedido 4 de Setembro de 2022).
- [7] S. U. Khan *et al.*, «Energy management scheme for an EV smart charger V2G/G2V application with an EV power allocation technique and voltage regulation», *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 8, n. 4, Mar. 2018, doi: 10.3390/app8040648.
- [8] S. Vadi, R. Bayindir, A. M. Colak, e E. Hossain, «A review on communication standards and charging topologies of V2G and V2H operation strategies», *Energies*, vol. 12, n. 19. MDPI AG, 30 de Setembro de 2019. doi: 10.3390/en12193748.
- [9] B. Shiva Kumar e K. Sudhakar, «Performance evaluation of 10 MW grid connected solar photovoltaic power plant in India», *Energy Reports*, vol. 1, pp. 184–192, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.egy.2015.10.001.
- [10] X. Kou e F. Li, «P-Q Curve Based Voltage Stability Analysis Considering Wind Power».
- [11] M. N. Mojdehi e P. Ghosh, «An approach to engage EVs for frequency regulation: Aggregator perspective», em *2015 IEEE Conference on Technologies for Sustainability, SusTech 2015*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Out. 2015, pp. 229–233. doi: 10.1109/SusTech.2015.7314351.
- [12] M. Bragard, N. Soltan, S. Thomas, e R. W. de Doncker, «The balance of renewable sources and user demands in grids: Power electronics for modular battery energy storage systems», *IEEE Trans Power Electron*, vol. 25, n. 12, pp. 3049–3056, 2010, doi: 10.1109/TPEL.2010.2085455.
- [13] J. A. P. Lopes, F. J. Soares, e P. M. R. Almeida, «Integration of electric vehicles in the electric power system», *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, n. 1, pp. 168–183, Jan. 2011, doi: 10.1109/JPROC.2010.2066250.

- [14] W. Khan, F. Ahmad, e M. S. Alam, «Fast EV charging station integration with grid ensuring optimal and quality power exchange», *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 22, n. 1, pp. 143–152, Fev. 2019, doi: 10.1016/j.jestch.2018.08.005.
- [15] R. Rana e B. Nybakk Torsater, «Coordinated Voltage Support with Reactive Power from High-power Charging Stations for EVs», em *2021 IEEE Madrid PowerTech, PowerTech 2021 - Conference Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jun. 2021. doi: 10.1109/PowerTech46648.2021.9495041.
- [16] C. Jin, J. Tang, e P. Ghosh, «Optimizing electric vehicle charging: A customer’s perspective», *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 62, n. 7, pp. 2919–2927, 2013, doi: 10.1109/TVT.2013.2251023.
- [17] F. A. Amoroso e G. Cappuccino, «Advantages of efficiency-aware smart charging strategies for PEVs», *Energy Convers Manag*, vol. 54, n. 1, pp. 1–6, Fev. 2012, doi: 10.1016/j.enconman.2011.09.006.
- [18] Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE International Conference on Smart Grid Communications 2014.11.03-06 Venice, e SmartGridComm 2014.11.03-06 Venice, *IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2014 3-6 Nov. 2014, Venice, Italy*.
- [19] T. Rawat e K. R. Niazi, «Comparison of EV smart charging strategies from multiple stakeholders’ perception», *The Journal of Engineering*, vol. 2017, n. 13, pp. 1356–1361, Jan. 2017, doi: 10.1049/joe.2017.0553.
- [20] L. Jian, Z. Yongqiang, e K. Hyoungmi, «The potential and economics of EV smart charging: A case study in Shanghai», *Energy Policy*, vol. 119, pp. 206–214, Ago. 2018, doi: 10.1016/j.enpol.2018.04.037.
- [21] B. K. Sovacool, L. Noel, J. Axsen, e W. Kempton, «The neglected social dimensions to a vehicle-to-grid (V2G) transition: A critical and systematic review», *Environmental Research Letters*, vol. 13, n. 1. Institute of Physics Publishing, 1 de Janeiro de 2018. doi: 10.1088/1748-9326/aa9c6d.
- [22] A. Dik, S. Omer, e R. Boukhanouf, «Electric Vehicles: V2G for Rapid, Safe, and Green EV Penetration», *Energies*, vol. 15, n. 3. MDPI, 1 de Fevereiro de 2022. doi: 10.3390/en15030803.
- [23] E. / Phev e B. B. Charger, «Vehicle-to-grid (V2G) Reactive Power Operation Analysis of the EV/PHEV Bidirectional Battery Charger», 2013. [Em linha]. Disponível em: https://trace.tennessee.edu/utk_graddiss
- [24] U. K. Madawala e D. J. Thrimawithana, «A bidirectional inductive power interface for electric vehicles in V2G systems», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, n. 10, pp. 4789–4796, Out. 2011, doi: 10.1109/TIE.2011.2114312.
- [25] P. Rodríguez, A. Luna, M. Ciobotaru, R. Teodorescu, e F. Blaabjerg, «Advanced Grid Synchronization System for Power Converters under Unbalanced and Distorted Operating Conditions».

- [26] W. Kempton e J. Tomić, «Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy», *J Power Sources*, vol. 144, n. 1, pp. 280–294, Jun. 2005, doi: 10.1016/j.jpowsour.2004.12.022.
- [27] «MARLOS GATTI BOTTARELLI CONVERSORES CC-CC BÁSICOS NÃO-ISOLADOS QUADRÁTICOS DE TRÊS NÍVEIS», 2006.
- [28] F. Tomaz e D. E. Souza, «ANÁLISE DO CONVERSOR ESTÁTICO BUCK-BOOST NÃO ISOLADO ENGENHARIA».
- [29] D. Seltzer, «MODELING AND CONTROL OF THE DUAL ACTIVE BRIDGE SERIES RESONANT CONVERTER», 2011.
- [30] C. Calderon *et al.*, «General analysis of switching modes in a dual active bridge with triple phase shift modulation», *Energies (Basel)*, vol. 11, n. 9, Set. 2018, doi: 10.3390/en11092419.
- [31] J. Beerten e R. Belmans, «Modeling and control of Multi-terminal VSC HVDC systems», em *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2012, pp. 123–130. doi: 10.1016/j.egypro.2012.06.093.
- [32] T. Takesbita e N. Matsiii, «PWM Control and Input Characteristics of Three-phase Multi-Level AC/DC Converter».
- [33] B. P. McGrath e D. G. Holmes, «Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, n. 4, pp. 858–867, Ago. 2002, doi: 10.1109/TIE.2002.801073.
- [34] P. Rodríguez, A. Luna, M. Ciobotaru, R. Teodorescu, e F. Blaabjerg, «Advanced Grid Synchronization System for Power Converters under Unbalanced and Distorted Operating Conditions».
- [35] E. Serban, M. Ordonez, e C. Pondiche, «Voltage and Frequency Grid Support Strategies beyond Standards», *IEEE Trans Power Electron*, vol. 32, n. 1, pp. 298–309, Jan. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2539343.
- [36] M. Schweizer e J. W. Kolar, «Design and implementation of a highly efficient three-level T-type converter for low-voltage applications», *IEEE Trans Power Electron*, vol. 28, n. 2, pp. 899–907, 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2203151.
- [37] J. L. Afonso, C. Couto, J. S. Martins, J. Afonso, e J. Martins, «Active Filters with Control Based on the p-q Theory Development of Electrical Energy Monitoring Systems View project Multi-functional Soil Moisture Probe View project Active Filters with Control Based on the p-q Theory», 2000. [Em linha]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/251506378>
- [38] L. Wang, Z. Qin, T. Slangen, P. Bauer, e T. van Wijk, «Grid Impact of Electric Vehicle Fast Charging Stations: Trends, Standards, Issues and Mitigation Measures - An Overview», *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 2, pp. 56–74, Jan. 2021, doi: 10.1109/ojpel.2021.3054601.
- [39] G. Carrara, S. Gardella, M. Marchesoni, R. Salutari, e G. Sciutto, «A New Multilevel PWM Method: A Theoretical Analysis», 1992.
- [40] J.-H. Suh e C.-H. Choi, «A New Simplified Space-Vector PWM Method for Three-Level Inverters».

- [41] M. P. Kazmierkowski e L. Malesani, «Current Control Techniques for Three-Phase Voltage-Source PWM Converters: A Survey», 1998.
- [42] A. Visioli, «Research Trends for PID Controllers», 2012.
- [43] K. S. Holkar, K. K. Wagh, e L. M. Waghmare, «An Overview of Model Predictive Control», 2010.
- [44] G. Szentirmai, *Electronic filter design handbook*, vol. 70, n. 3. 2008. doi: 10.1109/proc.1982.12308.
- [45] T. L. Skvarenina, *The power electronics handbook*. 2001. doi: 10.5860/choice.40-0320.
- [46] V. T. Ranganathan, *Power electronics*, vol. 33, n. 5. 2008. doi: 10.1201/9780429290619-8.
- [47] rob simpson, «To the Pump or the Plug. Electric Cars, the Way of the Future?», 23 de Novembro de 2018. <https://medium.com/@thatone444/to-the-pump-or-the-plug-electric-cars-the-way-of-the-future-dde1c9044936> (acedido 9 de Setembro de 2022).
- [48] Luis Noal, «conexão automotiva», *Toyota Mirai*, 15 de Janeiro de 2021. <https://www.conexaoautomotivabr.com/2021/01/toyota-mirai-de-segunda-geracao-e.html> (acedido 9 de Setembro de 2022).
- [49] Eric Loveday, «wikipédia», *BMW i8*, 8 de Agosto de 2014. https://pt.wikipedia.org/wiki/BMW_i8 (acedido 9 de Setembro de 2022).
- [50] nio, «nio website». <https://www.nio.com/et5> (acedido 9 de Setembro de 2022).
- [51] EVDB, «EVDB», *NISSAN LEAF*. <https://ev-database.org/car/1657/Nissan-Leaf-eplus> (acedido 4 de Setembro de 2022).
- [52] Hugo Figueira, «clube escape livre», *Skyactiv-X*, 25 de Fevereiro de 2020. <https://www.escapelivre.com/2020/02/skyactiv-x-o-premiado-motor-diesel-movido-a-gasolina/> (acedido 9 de Setembro de 2022).
- [53] P. Lienert, «Tesla Model S», 20 de Fevereiro de 2013. https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_S (acedido 9 de Setembro de 2022).
- [54] FSR, «ÁEUI Florence school of regulation», *Access to Electric Vehicles data for smart charging*, 25 de Fevereiro de 2020. <https://fsr.eui.eu/access-to-electric-vehicles-data-for-smart-charging/> (acedido 9 de Setembro de 2022).
- [55] zhaw, «ZHAW school of engineering», *Vehicle-to-Grid (V2G)*, 23 de Dezembro de 2019. <https://www.zhaw.ch/en/engineering/institutes-centres/ine/smart-city-guide-main-page/description-of-applications/vehicle-to-grid-v2g/> (acedido 9 de Setembro de 2022).
- [56] Nico Lerch, «Gridx», *How V2G and V2H can reach scale*, 4 de Agosto de 2021. <https://www.gridx.ai/blog/how-v2g-v2h-reach-scale> (acedido 9 de Setembro de 2022).
- [57] wallbox, «wallbox», *QUASAR*, 16 de Agosto de 2020. https://wallbox.com/pt_pt/quasar-dc-charger (acedido 9 de Setembro de 2022).
- [58] NOVUS, «NOVUS», *PID Control: Breaking the time barrier*, 22 de Novembro de 2019. https://www.novusautomation.com/site/default.asp?Idioma=1&TroncoID=053663&SecaoID=0&SubsecaoID=0&Template=../artigosnoticias/user_exibir.asp&ID=517073 (acedido 9 de Setembro de 2022).
- [59] Jacques Smuts, «Control notes», *PID Controllers Explained*, 7 de Março de 2011. <https://blog.opticontrols.com/archives/344> (acedido 9 de Setembro de 2022).

