



Dissertação

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica-Energia e Automação

Sistema de carga bidirecional para veículo elétrico

Daniel Gabriel Doroftei

Leiria, novembro de 2014

Resumo

As preocupações com o elevado consumo de combustíveis fósseis e a crescente poluição atmosférica conduziram ao desenvolvimento dos veículos elétricos e dos veículos elétricos híbridos.

O crescimento do parque automóvel elétrico levou à necessidade de considerar a sua integração na rede elétrica, ao nível dos impactos estimados, mas também na sua potencial contribuição para uma gestão inteligente do sistema, funcionando como um buffer da energia produzida, permitindo desacoplar a produção do consumo, e assim melhorar a eficiência global.

Neste trabalho foi efetuado um estudo relacionado com a ligação bidirecional entre os veículos elétricos e a rede elétrica que permitirá o uso das baterias instaladas nos veículos participar nesse apoio à rede, debruçando-se primeiramente sobre o desenvolvimento das baterias que permanecem como elos mais fracos.

Utilizando diferentes ferramentas de simulação e de análise de resultados foi depois efetuado um estudo sobre dois sistemas alternativos capazes de implementar o conceito V2G respeitando as restrições do ponto de vista normativo.

Os resultados obtidos a partir de uma simulação coordenada entre os programas Simulink/Matlab e PSIM permitiram demonstrar o bom funcionamento dos 2 sistemas propostos, permitindo ficar com a convicção que o conversor multinível será capaz de proporcionar os resultados desejados com um menor tempo de resposta.

Palavras-chave: veículos elétricos, conversor AC-DC bidirecional, conversor DC-DC, veículo para rede (V2G).

Abstract

Concerns about the high consumption of fossil fuels and the growing air pollution led to the development of electric vehicles and hybrid electric vehicles.

The growth of the electric vehicle fleet led to the need to consider their integration into the power grid, the level of estimated impacts but also on their potential contribution to the intelligent management system, acting as a buffer energy produced, allowing decouple the production of consumption and thus better overall efficiency.

This work was carried out a study related to the bidirectional link between electric vehicles and the power grid that will allow the use of batteries installed in vehicles participate in this support network, and will focus primarily on the development of batteries that remain weakest links.

Using different simulation tools and results analysis was then carried out a study on two alternative systems capable of implementing the V2G concept respecting the constraints of the regulatory point of view.

The results from a simulation coordinated between Simulink / Matlab and PSIM software allowed demonstrate the proper functioning of the two proposed systems, enabling it to be with the conviction that the multilevel converter will be able to provide the desired results with a shorter response time.

Keywords: electric vehicle, bidirectional AC-DC converter, DC-DC converter, vehicle to grid (V2G).

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, o Professor Doutor Luis Neves, pelos conhecimentos transmitidos ao longo do curso e me ter dado a oportunidade de realizar este trabalho.

À minha família que sempre me estimulou, suportou e esteve sempre presente no decorrer deste percurso, em especial a minha esposa por todos os sacrifícios passados.

Agradeço também aos meus amigos e colegas pelo seu apoio e amizade.

“There is nothing like returning to a place that remains unchanged to find the ways in which you yourself have altered.”

Nelson Mandela

ÍNDICE

Capítulo 1	1
Introdução.....	1
Capítulo 2	5
Os Veículos Eléctricos.....	5
2.1 Definição do Veículo Elétrico	5
2.1.1 Veiculo Elétrico a Baterias	5
2.1.2 Veículo Elétrico Híbrido.....	7
2.1.3 Veículo a Pilha de Combustível	10
2.2 Tipos e métodos de ligação a rede elétrica para carregamento de um veículo elétrico	11
2.3 Requisitos elétricos para carregamento de EV	12
2.4 Injeção de corrente na rede V2G	13
2.5 Impacto na rede da inclusão do conceito de V2G	15
Capítulo 3	17
Sistemas de armazenamento.....	17
3.1 Baterias	17
3.1.1 Constituição geral	18
3.1.2 Processo cíclico de descarga e carga	18
3.1.3 Fatores que afetam o desempenho	19
3.1.3.1 Nível de tensão.....	19
3.1.3.2 Corrente de descarga.....	20
3.1.3.3 Modo de descarga	21
3.1.3.4 Temperatura	22
3.1.3.5 Ciclo de vida	23
3.1.4 Classificação das baterias	23
3.1.4.1 Baterias secundárias ou recarregáveis	24
3.1.4.2 Baterias de ácido chumbo	25
3.1.4.3 Baterias de níquel hidreto metálico.....	26

3.1.4.4 Baterias de alta temperatura.....	27
3.1.4.5 Baterias de íões de lítio	28
3.1.4.6 Baterias de polímeros de Lítio	29
3.1.4.7 Baterias Lítio-enxofre	29
3.1.4.8 Baterias Zinco-ar.....	30
3.1.4.8 Baterias Lítio-ar	30
3.1.5 Modelos elétricos das baterias	32
3.1.5.1 Modelo Equivalente de Thévenin	32
3.1.5.2 Modelo de Impedância.....	34
3.1.5.3 Modelo de Execução.....	34
3.2 Pilha de combustível.....	35
3.3 Sistemas volantes.....	36
3.4 Supercondensadores	37
Capítulo 4	39
Circuitos eletrónicos de potência para ligação bidirecional do EV á rede	39
4.1 Os conversores AC-DC bidirecionais.....	39
4.1.1 Conversor monofásico AC-DC meia ponte PWM	40
4.1.2 Conversor monofásico AC-DC ponte completa PWM.....	41
4.1.3 Conversor monofásico bidirecional AC-DC multinível	43
4.2 Os conversores DC-DC bidirecionais.....	44
4.2.1 Conversor DC-DC com ponte dupla ativa.....	44
4.2.2 Conversor DC-DC (buck-boost) dois quadrantes.....	45
4.3 Técnicas para controlo dos inversores monofásicos.....	46
4.3.1 Modulação por largura de impulso único	47
4.3.2 Modulação por largura de múltiplos impulsos	48
4.3.3 Modulação por largura de impulsos sinusoidal	49
4.3.4 Modulação por largura de impulsos sinusoidal modificada	50
4.3.5 Controle por deslocamento de fase.....	50
4.3.6 Modelação trapezoidal.....	51
4.3.7 Modulação em escada.....	52
4.3.8 Modulação degrau	52
4.3.9 Modulação por injeção de harmónicos	53
Capítulo 5	55

Lista de Figuras

2.1 Possíveis configurações do BEV	6
2.2 Combinações estruturais para a concepção de um HEV	8
2.3 Influência dos EV na característica de carga.....	15
3.1 Operações eletroquímicas de uma célula.....	19
3.2 Características de descarga de uma bateria: perfis de tensão	20
3.3 Característica de descarga de uma bateria.....	21
3.4 Característica de descarga da tensão em função da temperatura para uma corrente constante.	22
3.5 Ciclo de vida em horas em função da temperatura e corrente de descarga	23
3.6 Características de várias tecnologias de baterias.....	24
3.7 Circuito equivalente de Thévenin.....	32
3.8 Modelo de carga e descarga de uma bateria	33
3.9 Aproximação de primeira ordem do modelo de uma bateria	33
3.10 Modelo equivalente para modelo de impedância	34
3.11 Modelo equivalente para modelo de execução.....	35
3.12 Construção básica de um volante de inércia.....	36
3.13 Construção básica de um supercondensador	37
4.1 Topologia de ligação energética bidirecional.....	39
4.2 Ilustração de fluxo de potência bidirecional.....	40
4.3 Conversor AC-DC meia ponte monofásico.....	41
4.4 Conversor AC-DC ponte completa monofásica	42
4.5 Conversor AC-DC de três níveis monofásicos.....	43
4.6 Conversor DC-DC ponte dupla ativa	45
4.7 Conversor DC-DC (abaixador-elevador) dois quadrantes.....	45
4.8 Exemplo de circuito modulador	47
4.9 Modulação por largura de impulso único	48
4.10 Modulação por largura de múltiplos impulsos	48
4.11 Modulação por largura de impulsos sinusoidal – SPWM	49

4.12 Modulação por largura de impulsos sinusoidal modificada	50
4.13 Controle por deslocamento de fase.....	51
4.14 Modelação trapezoidal.....	51
4.15 Modulação escada.....	52
4.16 Modulação degrau	52
4.17 Modulação por injeção de harmónicos	53
5.1 A primeira proposta para o sistema de conversão de potência.....	55
5.2 Malha de controlo do conversor bidirecional ponte completa	56
5.3 A segunda proposta de sistema de carga bidirecional	57
5.4 Modo 1 AC-DC	58
5.5 Modo 2 AC-DC	58
5.6 Modo 3 AC-DC	59
5.7 Modo 4 AC-DC	59
5.8 Modo 5 AC-DC	60
5.9 Modo 6 AC-DC	60
5.10 Malha de controlo do conversor bidirecional multinível.....	60
5.11 Conversor DC-DC Buck-Boost.....	62
5.12 Malha de controlo do conversor Buck-Boost: modo de carga	63
5.13 Malha de controlo do conversor Buck-Boost: modo de descarga.....	63
5.14 Diagrama de vetores para vários modos de operação	64
5.15 Capacidade requerida vs. ripple máximo no barramento DC.....	66
5.16 Circuito equivalente de Thévenin.....	68
6.1 Exemplo de quadro operacional de cooperação entre MATLAB e PSIM	69
6.2 Circuito de potência implementado em PSIM primeira proposta	70
6.3 Estrutura de controlo em Simulink/Matlab para primeira proposta	71
6.4 Malha de controlo do conversor AC-DC ponte completa.....	71
6.5 Circuito de potência do conversor bidirecional AC-DC multinível.....	71
6.6 Estrutura de controlo do conversor bidirecional AC-DC multinível.....	72
6.7 Malha de controlo do conversor bidirecional AC-DC multinível.....	72
6.8 Malha de controlo do conversor bidirecional DC-DC buck-boost.....	72
6.9 Simulação da primeira proposta: modo G2V	74
6.10 Fator de potência primeira proposta: modo G2V	75
6.11 O sinal de corrente da primeira proposta: modo G2V.....	75

6.12 Simulação primeira proposta: modo V2G.....	76
6.13 Fator de potência primeira proposta: modo V2G.....	77
6.14 O sinal de corrente primeira proposta: modo V2G.....	77
6.15 Simulação segunda proposta: modo G2V	78
6.16 Fator de potência segunda proposta: modo G2V	79
6.17 O sinal de corrente segunda proposta: modo V2G.....	79
6.18 Simulação segunda proposta: modo V2G	80
6.19 Fator de potência para segunda proposta: modo V2G.....	81
6.20 O sinal de corrente segunda proposta: modo V2G.....	81

Lista de Tabelas

2.1 Descrição dos diferentes níveis de carregamento.....	12
2.2 Harmónicos máximos de distorção de corrente.....	13
2.3 Compatibilidade entre o V2G e os diferentes tipos de geração.....	15
3.1 Dados específicos para baterias de arranque de acordo com a norma europeia..	26
3.2 Desempenho das baterias NiMH	27
3.3 Desempenho das baterias de alta temperatura.....	27
3.4 Desempenho da bateria Li-íon implementada em diferentes carros.....	28
3.5 Desempenho das baterias LMP implementadas no projeto Bluecar	29
3.6 Desempenho futuro de algumas baterias	31
5.1 Modos de operação para o conversor AC-DC multinível	61
5.2 Padrões de comutação para os diversos modos de operação.....	61
5.3 Discriminação de valores associados para simulação do conversor bidirecional AC-DC de ponte completa	65
5.4 Discriminação de valores associados para simulação do conversor bidirecional DC-DC buck-boost	67

Lista de siglas

AC Alternating Current

AGM Absorbed Glass Mat Batteries

BEV Battery Electric Vehicle

DC Direct Current

EV Electric Vehicle

FCV Fuel Cell Vehicles

FP Fator de Potência

G2V Grid-to-Vehicle

HEV Hybrid Electric Vehicle

ICE Internal Combustion Engine

IGBT Insulated-Gate Bipolar Transistor

Li-ion Iões de Lítio

LieS Lítio-Enxofre

LMP Polímeros de Lítio

NaS Sódio-Enxofre

NiMH Nickel –Metal Hydride Battery

ME Deslocações curtas

MOSFET Metal Oxide Semiconductor-Field-Effect Transistor

PAN poliacrilonitrila

PEV Plug-in electric vehicle

PFCV Plug-in Fuel Cell Vehicles

PHEV Plug-in Hybrid Electric Vehicle

PWM Pulse Width Modulation

SoC State of Charge

SPWM Sinusoidal Pulse Width Modulation

THD Total Harmonic Distortion

V2G Vehicle-to-Grid

VLRA Valve Regulated Acid Battery

A Ampère

C Coulomb

Hz Hertz

t Tempo, em segundos

V Volt

W Watt

Capítulo 1

Introdução

Todos nós usamos a rede elétrica, reconhecemos a sua utilidade e somos conscientes que a nossa vida seria quase impossível sem eletricidade, percebida como uma forma de civilização para o homem moderno.

A energia viaja desde a central elétrica até à casa de cada consumidor por uma rede elétrica. O consumo de energia elétrica necessária num dado instante tem de ser satisfeito por energia produzida nesse mesmo momento dentro de um determinado nível de qualidade pretendida. Este equilíbrio instantâneo entre a oferta e a procura deve-se à quase impossibilidade de usar sistemas de armazenamento implicando um sobredimensionamento do sistema produtor e de transporte, o que se reflete num aumento do custo de energia.

Nos últimos anos, o tema das energias renováveis tem sido pronunciado com elevada regularidade. De facto, têm vindo a ser estabelecidos inúmeros compromissos internacionais que incidem na limitação das emissões dos gases que provocam efeito de estufa. Contrariamente às fontes de energia fósseis, as energias renováveis apresentam-se como uma alternativa de energia limpa, livre e inesgotável mas limitadas em termos da quantidade de energia que é possível extrair em cada momento e, acima de tudo, dotadas de uma grande imprevisibilidade que, à falta de sistemas de armazenamento suficientes, obriga a ter centrais termoelétricas de apoio que assim anulam parte das vantagens que deveriam existir.

Atualmente, o melhor sistema de armazenamento de energia a grande escala, de modo a poder guardar o eventual excesso de energia para usá-lo mais tarde, é a utilização de barragens reversíveis que podem bombear água para montante quando por exemplo existe um excesso de produção eólica porque há muito vento, e depois aproveitar esta água nas suas próprias turbinas hidroelétricas para produzir eletricidade.

O desenvolvimento tecnológico na área da eletrónica de potência tornou possível a interação bidirecional de recursos de baixa potência com a rede elétrica.

Aliando este facto à liberalização do mercado, o aumento do consumo de energia elétrica, a competitividade nos preços da eletricidade e a melhoria na qualidade dos serviços levaram à procura de soluções inovadoras como as redes elétricas inteligentes.

A implementação de políticas de integração de veículo elétrico (EV) que incentivem o seu carregamento durante o período de vazio pode permitir um aumento da segurança dinâmica do sistema. O aumento de carga nas horas de menor consumo permite uma maior penetração de produção renovável, podendo ser utilizada no carregamento dos EV, que de outra forma seria desperdiçada. Além disso, se os EV forem controláveis e responderem a certas condições do sistema, podem contribuir para o aumento da sua segurança dinâmica.

Os objetivos deste trabalho são o estudo de sistemas de carga bidirecional de veículos elétricos, testando através de simulação soluções alternativas que permitam a implementação futura de um sistema experimental.

Esta dissertação é constituída por 7 capítulos. O primeiro e atual capítulo serve como introdução ao documento onde é descrito o contexto em que surge este trabalho e são definidos os objetivos e a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica relativa à temática dos EV. Iniciando-se por uma perspetiva histórica, passando pelas topologias atualmente em voga, abordando-se de seguida a matéria relativa à rede elétrica, nomeadamente, características, requisitos e impacto na rede.

O Capítulo 3 é destinado a apresentar vários sistemas de armazenamento, em especial ao esclarecimento do princípio de funcionamento e dos factores que afectam as baterias recarregáveis em geral. Termina-se o capítulo com a apresentação dos modelos elétricos das baterias.

O quarto capítulo destina-se à apresentação de várias topologias de conversores bidirecionais AC-DC e dos conversores bidirecionais DC-DC como também de apresentar as técnicas para controlo dos inversores monofásicos.

O quinto capítulo destina-se ao estudo realizado sobre dois modelos de sistemas de conversão de potência, nomeadamente, o conversor bidirecional AC-DC multinível e o conversor bidirecional AC-DC de ponte completa.

No Capítulo 6 realiza-se a análise dos resultados, para tal foram utilizados os programas MATLAB/simulink e PSIM em conjunto através da ferramenta “Simcoupler”.

Por último, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões retiradas ao longo do desenvolvimento desta dissertação bem como algumas propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Os Veículos Eléctricos

A história dos veículos eléctricos começou em meados do século XIX com a invenção do motor eléctrico por Michael Faraday em 1821. Entre 1832 e 1839 surgiu o primeiro carro eléctrico construído por Robert Anderson e funcionava com baterias não recarregáveis (Brain, 2011).

Na última década do século XIX, 28% de todos os carros nos Estados Unidos eram eléctricos, mas, diversos obstáculos tais como as limitações associadas às baterias e o rápido desenvolvimento dos veículos com combustão interna (ICE) levaram ao progressivo abandono destes veículos e nem as preocupações associadas às crises petrolíferas dos anos 1970 e 1980 ou a recente atenção dada às alterações climáticas conseguiram ainda alterar este estado de coisas.

2.1 Definição do Veículo Eléctrico

Por definição, um veículo eléctrico (EV) integra um motor eléctrico, que converte energia eléctrica na energia mecânica necessária para tração. A energia é armazenada em baterias químicas, células de combustível, supercondensadores, e / ou sistemas volantes (flywheels) (Ehsani, 2005).

Os veículos eléctricos são caracterizados por serem silenciosos, terem emissões direitas nulas, alto desempenho energético, baixa autonomia, custo elevado, espaço insuficiente para pessoas e mercadoria e por não dependerem dos combustíveis fósseis.

Os diferentes tipos de veículos eléctricos podem ser caracterizados quando ao tipo de mecanismo gerador ou armazenamento de energia eléctrica instalada a bordo.

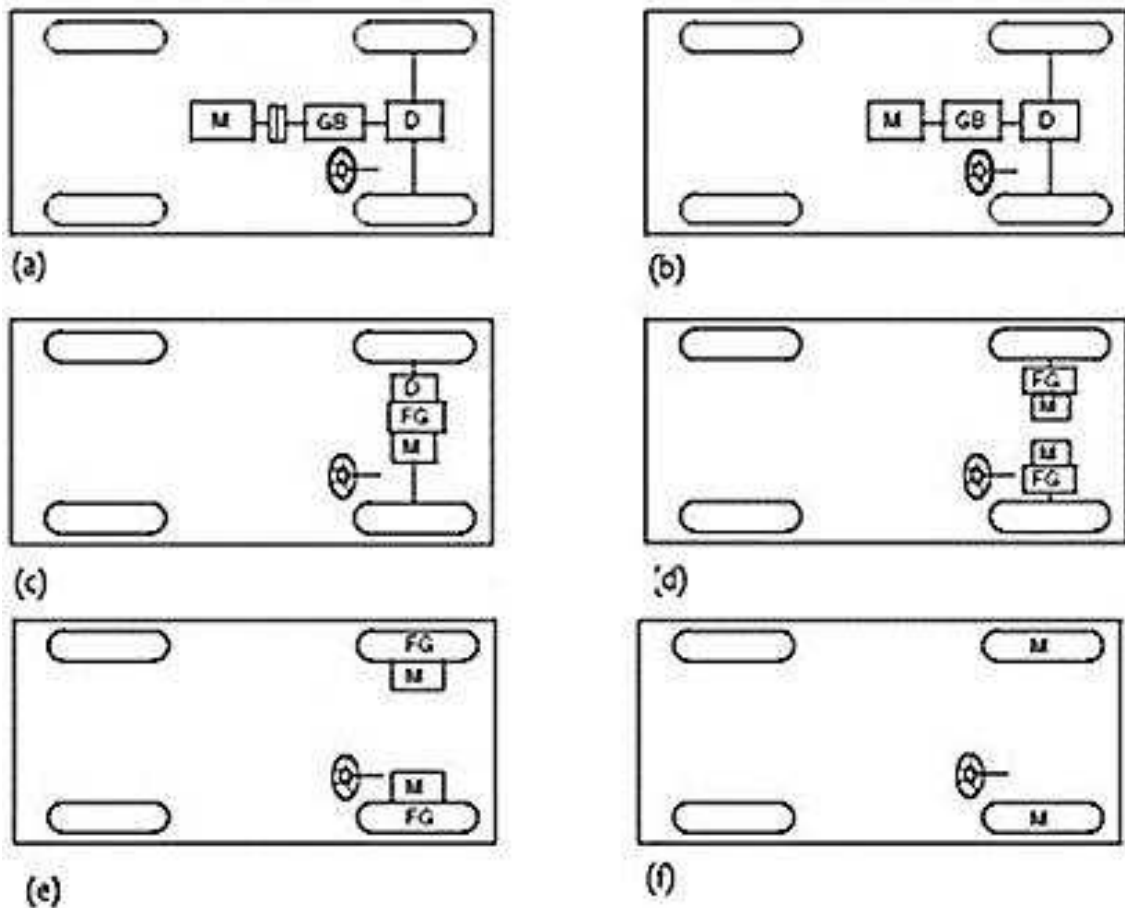
As principais categorias de veículos eléctricos são:

- Veículo Eléctrico a Baterias (BEV)
- Veículo Eléctrico Híbrido (HEV)
- Veículo a Pilha de Combustível

2.1.1 Veículo Elétrico a Baterias

Utiliza a energia elétrica proveniente da rede de distribuição pública para carregar um conjunto de baterias instalado a bordo.

O motor pode ser ligado às rodas de uma forma idêntica ao tradicional motor de combustão interna, através de uma embraiagem, de uma caixa de velocidades com relação variável e de um diferencial (figura 2.1.a) ou com uma relação de velocidades fixa, tornando desnecessária a embraiagem (figura 2.1.b). As características do motor elétrico permitem ainda que seja instalado de forma que o seu veio coincida com o eixo das rodas, mas mantendo uma redução fixa e um diferencial como ilustrado na figura 2.1.c (Ehsani, 2005).



M-motor elétrico, **D**-diferencial, **FG**- engrenagem fixo, **GB** caixa de velocidades

Figura 2.1 Possíveis configurações do BEV (Ehsani 2005).

Por outro lado, também existem soluções em que o papel do diferencial é realizado eletronicamente sendo cada uma das rodas motrizes acionadas por um motor independente.

Na topologia apresentada na figura 2.1.d, a ação do diferencial em curvas pode ser electronicamente disponibilizada por 2 motores eléctricos operando a diferentes velocidades, conduzindo separadamente as duas rodas motrizes, através de uma engrenagem fixa (Ehsani, 2005).

De modo a reduzir o caminho mecânico de transmissão entre o motor eléctrico e as rodas motrizes, na figura 2.1.e, o motor eléctrico é colocado no interior das rodas, associado a uma engrenagem planetária fixa, que reduz a velocidade do motor para a velocidade desejável na roda (Ehsani, 2005).

Eliminando a existência de qualquer engrenagem, na figura 2.1.f, o motor eléctrico é diretamente aplicado às rodas, possuindo um rotor exterior de baixa velocidade. Neste caso, o controlo de velocidade do motor eléctrico é equivalente ao controlo da velocidade das rodas, e consequentemente do veículo (Ehsani, 2005).

2.1.2 Veículo eléctrico híbrido

O veículo eléctrico híbrido (HEV) combina no mesmo veículo duas fontes de energia distintas para fornecimento da energia necessária a tração.

Uma das fontes é o sistema composta por baterias que armazenam a energia eléctrica, utilizada para o funcionamento do motor eléctrico

A outra fonte é o depósito de combustível que alimenta um motor térmico (ICE) que pode acionar diretamente as rodas ou fornecer energia mecânica a um gerador eléctrico que assim contribui para aumentar a autonomia do veículo.

O motor eléctrico aumenta o rendimento do veículo, nomeadamente em baixas rotações onde o motor de combustão tem baixo rendimento. Pode ainda funcionar como gerador em altas rotações, aproveitando a energia cinética que o carro possui e seria desperdiçada em travagens, através de travagem regenerativa (regenerative braking).

Existem quatro tipos combinações estruturais para a concepção de um HEV (Ehsani, 2005):

Sistema Série (figura 2.2.a): A energia cinética proveniente do ICE é convertida através do gerador em energia eléctrica, que pode ser usada para propulsão através do motor que está ligado mecanicamente à transmissão ou para carregar a bateria.

O facto de se ter o motor desacoplado das rodas motrizes tem como vantagens a flexibilidade posicional na sua colocação e a possibilidade de operação em qualquer relação velocidade/binário.

Contudo este sistema apresenta uma eficiência geralmente baixa: energia a partir do motor é convertida por duas vezes (mecânica para elétrica no gerador e elétrica para mecânica no motor de tração); o gerador adiciona peso e custos adicionais; o motor de tração deve ser dimensionado para satisfazer os requisitos máximos uma vez que é o único que assegura a propulsão do veículo.

Sistema Paralelo (figura 2.2.b): O motor ICE e o motor elétrico, podem fornecer potência de propulsão às rodas motrizes, separadamente ou simultaneamente.

O motor elétrico pode também funcionar como gerador para carregamento da bateria quando a potência proveniente do ICE é superior à necessária na transmissão ou em situação de travagem. Uma vez que se evita o o gerador dedicado, esta combinação estrutural é melhor que a combinação estrutural série.

Outras vantagens sobre a montagem em série são que para debitar a mesma potência pode-se usar um menor ICE e menor motor elétrico que operam em conjunto em situações em que a potência máxima seja necessária, ficando depois num ponto de funcionamento mais eficiente para manter a velocidade em viagem (ICE) ou para deslocções curtas (ME).

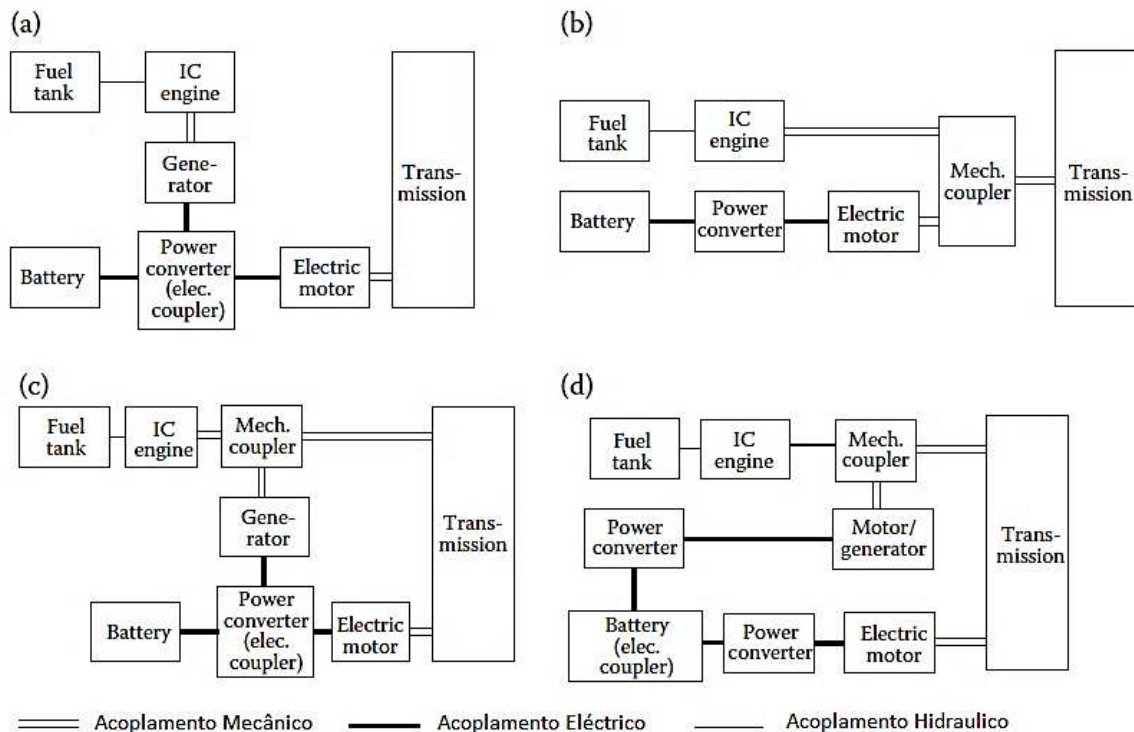


Figura 2.2. Combinações estruturais para a concepção de um HEV (Ehsani, 2005)

Sistema Série – Paralelo (figura 2.2.c): Esta arquitetura incorpora todas as características de ambas as arquiteturas anteriores. Contendo uma ligação mecânica adicional em relação à montagem série e um gerador adicional em relação à montagem paralelo.

Estas características resultam nas vantagens de ambas as arquiteturas onde este novo sistema foi baseado, no entanto é relativamente mais complexa e tem maior custo.

Sistema Complexo (Figura 2.2.d): Este tipo de arquitetura envolve uma configuração complexa que não pode ser enquadrada nas últimas três. É semelhante à configuração série, mas nesta configuração o gerador pode funcionar como motor elétrico o que permite trânsito de potência bidirecional.

Esta versatilidade permite propulsão de três modos diferentes, pelo ICE e pelos dois motores elétricos. A par do sistema série – paralelo este também se destaca por ter uma arquitetura complexa e ser de elevado custo.

Conforme com o nível funcional e de potência do motor elétrico os veículos elétricos híbridos podem ser classificados em três categorias (Chan, 2007):

Micro: Geralmente tem um motor elétrico essencial para o arranque dos ICE e que posteriormente funciona como alternador. Com um motor de aproximadamente 2,5 kW a 12 V, consegue-se melhorar a eficiência energética em 5% a 10% relativamente aos veículos convencionais em situações de “para-arranca”.

Médio: Geralmente tem um motor elétrico incorporado diretamente na transmissão desenhado de forma a ter uma elevada inércia, com cerca de 10-20 kW a 100-200 V e utiliza arquitetura em paralelo.

O conjunto tem um ganho de eficiência energética entre 20% - 30 % relativamente a um veículo convencional, com aumento de custo também entre 20% - 30 % do preço final do veículo.

Completo: Com um motor elétrico de aproximadamente 50 kW a 200-300 V e com arquitetura série - paralela ou complexa, consegue-se melhorar a eficiência energética entre 30% – 40 % de energia em cidade, com aumento também de 30% - 40% do preço final do veículo.

Relativamente ao reabastecimento de energia, o HEV pode ser classificado como (Chan, 2002):

- Reabastecimento na estação de serviço: a maioria dos HEVs presentes no mercado é deste tipo, em que o reabastecimento à base de gasolina é realizado nas estações de serviço.
- “Plug-in Hybrid Electric Vehicle” (PHEV): Neste caso o veículo é maioritariamente reabastecido pela eletricidade da rede elétrica.

2.1.3 Veículo a Pilha de Combustível (FCV)

O princípio de funcionamento da pilha a combustível foi descoberto em 1839 e consiste em reverter a eletrólise da água: consome hidrogénio e oxigénio para os converter em eletricidade e água.

A necessidade de sistemas eficientes e estáveis de energia para satélites e naves espaciais, criaram oportunidades para o desenvolvimento da célula a combustível. Durante as décadas de 50 e 60 a National Aeronautics and Space Administration (NASA), depois de descartar a possibilidade de uso de reatores nucleares por serem de alto risco, as baterias por serem pesadas e de vida curta, e a energia fotovoltaica de difícil manejo para uso em missão espacial, decidiu investir massivamente no desenvolvimento de um sistema compacto de geração de eletricidade, a célula ou pilha de combustível (Ehsani, 2005; Chan, 2007).

Os fabricantes de veículos prometem lançar comercialmente carros movidos a pilha de combustível de hidrogénio em 2015. Um exemplo é a Toyota que apresentou em novembro de 2013 no Salão de Tóquio o FCV Concept, com lançamento previsto para acontecer no ano de 2015, e que utiliza uma versão modificada do sistema híbrido do Prius, com o motor a gasolina a ser substituído por uma célula de combustível e os depósitos a conter hidrogénio em alta pressão em vez do depósito de combustível convencional. Com um rendimento de 3 kW por litro de hidrogénio o FCV da Toyota tem uma autonomia de 500 quilómetros com um depósito de hidrogénio e o reabastecimento demora cerca de 3 minutos (Barrett, 2014).

As desvantagens desta tecnologia consistem na falta de infraestruturas de abastecimento preparadas para este tipo de carros, na dificuldade de armazenamento de hidrogénio e na dificuldade de extração de hidrogénio, que é obtido a partir do gás natural ou a partir da eletrólise da água usando a energia fornecida pela rede (Lave e Maclean, 2001).

2.2 Tipos e métodos de ligação a rede elétrica para carregamento de um veículo elétrico

Existem dois métodos de ligação de um veículo elétrico à rede elétrica para carregamento (Plett, 2004a):

- Condutivo em que a transferência de energia é feita por via de uma ligação física entre veículo e rede elétrica,
- Indutivo em que a transferência de energia é feita através de um acoplamento magnético entre dois enrolamentos, um no veículo e outro ligado à rede.

Devido a apresentar maior eficiência energética, boa eficácia no que diz respeito a segurança, menor complexidade e custo, o método condutivo é o mais adotado pelos fabricantes. Na Europa está definida a norma EN/NP61815 que foi criada em 2003 e revista em Dezembro de 2010 que define como deve ser feito o carregamento de um veículo elétrico e em que condições.

Os tipos de alimentação existentes para o carregamento de baterias distinguem-se em tipo de corrente e número de fases. Assim, existe (Plett, 2004a):

Alimentação monofásica de corrente alternada (AC) feita normalmente por via de tomadas padrão, monofásicas de 16 A, existentes nas habitações ou de tipo “Schuko”.

A norma estabelece ainda que tem de ser garantida a existência de Terra de proteção e de um disjuntor diferencial de elevada sensibilidade.

Alimentação trifásica AC feita por via de um sistema que é constituído por três componentes fundamentais: tomadas e fichas de fornecimento, relé de corte de alimentação e uma funcionalidade de piloto de controlo para segurança adicional.

Alimentação em corrente contínua (DC) feita por via de uma instalação DC externa ligada ao barramento DC do veículo. O carregamento em DC permite o fornecimento de uma corrente mais elevada pelo que o carregamento pode ser feito de forma mais rápida. O ponto de carregamento é constituído por um armário de carregamento e um cabo preso ao armário. Durante o carregamento é o veículo que controla o carregador, através de comunicação no cabo. Assim, não há perigo de o carregador injetar corrente de forma nociva para o veículo.

Os níveis de alimentação distinguem-se pela potência no carregamento e tempo de carregamento. A tabela 2.1 mostra os 3 níveis existentes na Europa (Plett, 2004a).

Níveis de carregamento	Requisito	Potência de carregamento	Tempo aproximado de carga para uma bateria de 35 kWh
Nível 1	Tomadas domésticas comuns	3 kW	12 horas
Nível 2	Carregamento dedicado tomada e cablagem	10-20 kW	2-4 horas
Nível 3	Carregamento rápido	40 kW ou mais	45 minutos ou menos

Tabela 2.1 Descrição dos diferentes níveis de carregamento

2.3 Requisitos elétricos para carregamento de EV

Os requisitos para carregamento de veículos elétricos por via condutiva estão expressos na norma internacional IEC 61851, dos quais se destacam os seguintes (Rao et al. 2003):

- O sistema deve funcionar corretamente com desvios da tensão nominal (IEC 60038) de $\pm 10\%$ e de frequência de $\pm 1\%$ de 50Hz ou 60Hz conforme o caso;
- Deve apresentar medidas de segurança contra sobrecorrentes e sobretensões que respeitem o IEC 60364-4-43 e 60364-4-443;
- Deve apresentar imunidade quanto a descargas eletromagnéticas de acordo com o IEC 61000-4-2;

Deve também apresentar imunidade a:

- Perturbações de baixa frequência conduzidas, quanto a harmônicos de tensão de acordo com IEC 61000-2-2, quedas de tensão de acordo com IEC 61000-4-11 e desequilíbrios de tensão e componente DC;
- Perturbações de alta frequência conduzidas, quanto a picos de correntes transitórias de acordo com IEC 61000-4-4 e picos de tensão de acordo com IEC 61000-4-5;
- Perturbações de radiação eletromagnética de acordo com IEC 61000-4-3

Quanto às emissões eletromagnéticas deve respeitar o IEC 61000, nomeadamente no que diz respeito:

- Às baixas frequências conduzidas de acordo com IEC 61000-3-2;
- Às altas frequências conduzidas de acordo com CISPR 22 e CISPR 16;
- À radiação eletromagnética de acordo com CISPR 22 e CISPR 16.

2.4 Injeção de corrente na rede V2G (Vehicle to Grid)

O crescimento do parque automóvel elétrico é considerado também como uma oportunidade, sendo a sua integração na rede inteligente vista como uma possível forma de auxílio em caso de contingência.

O conceito básico da transmissão de energia do veículo para a rede verifica-se quando os veículos elétricos estão estacionados e ligados à rede. O conjunto das suas baterias poderá funcionar assim como um centro de armazenamento de energia distribuído pela rede, servindo durante a noite para aumentar a procura e beneficiar de um tarifário mais baixo, enquanto durante o dia pode fornecer energia com o objetivo de diminuir os picos de maior consumo e beneficiar de venda de energia a um preço superior aquele a que foi adquirida.

Do ponto de vista técnico do IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) que apresenta também um documento normativo 1547-IEEE, o recurso distribuído deve (IEEE Std 1547, 2003):

- Não perturbar a tensão da rede de distribuição;
- Não afetar o sistema de terra da rede, assim como os seus aparelhos de deteção de falhas;
- Apresentar imunidade a ruído eletromagnético de acordo com o IEEE Std C37.90.2-1995;
- Apresentar imunidade a picos de correntes e tensão de acordo com IEEE Std C62.41.2-2002 ou IEEE Std C37.90.1-2002;
- Ser capaz de lidar com sobretensões de 220% da tensão nominal da rede;
- Não injetar corrente DC maior que 0,5% da corrente máxima de saída;
- Respeitar os limites de injeção de harmónicos na rede, conforme a tabela 2.2 (IEEE Std 1547, 2003).

Individual harmonic order h	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	Total demand distortion (TDD)
Percent (%)	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0

Tabela 2.2 Harmónicos máximos de distorção de corrente

Existem dois fatores que limitam ou podem vir a limitar a potência de transmissão do V2G:

A. Instalação elétrica residencial: As tomadas de um edifício de habitação permitem em geral uma corrente até 16A, uma tensão de 230 V e um fator de segurança de 0,85 (Kempton e Tomić, 2005).

$$P_{lim} = V * I_{max} * F_{seg} \quad (2.1)$$

$$P_{lim} = 230 * 16 * 0.85 \simeq 3,1 \text{ kW}$$

B. Armazenamento das baterias:

A capacidade de descarga ou carga das baterias em termos de potência, é largamente superior à capacidade em termos de energia. Considerando um dado tempo de despacho $T_{despacho}$, o limite de potência P_{V2G} é o quociente entre a energia que pode ser usada (E_{util} , energia disponível)(Plett, 2004b) e o tempo de despacho, multiplicando pelo rendimento do sistema de condicionamento de potência.

$$P_{V2G} = \frac{E_{util}}{T_{despacho}} * \eta_{inv} \quad (2.2)$$

Em que:

P_{V2G} : Potência máxima do V2G [kW];

E_{util} : Energia disponível para uso pela rede [kWh];

$T_{despacho}$: Tempo em que se verifica a descarga para a rede [h];

η_{inv} : Rendimento dos inversores.

Para efeitos de planeamento é necessário estudar a energia que em média não é utilizada para efeitos de condução e que pode ser utilizada para V2G como, por exemplo, a distância média que se pretende percorrer, o rendimento médio de potência em kWh, a energia gerada na locomoção e a possibilidade de recarga durante as paragens da viagem que se pretende.

2.5 Impacto na rede da inclusão do conceito de V2G

Pode-se observar (figura 2.3) a contribuição desta tecnologia no aumento da procura nas horas de menor carga, uniformizando a característica de carga.

Verifica-se igualmente a imparcialidade no aumento de carga nas horas de ponta e inclusive pode ajudar a satisfazer esta procura evitando desta maneira o início de funcionamento de centrais que estejam paradas e consequentemente evitando um maior custo de energia por kWh.

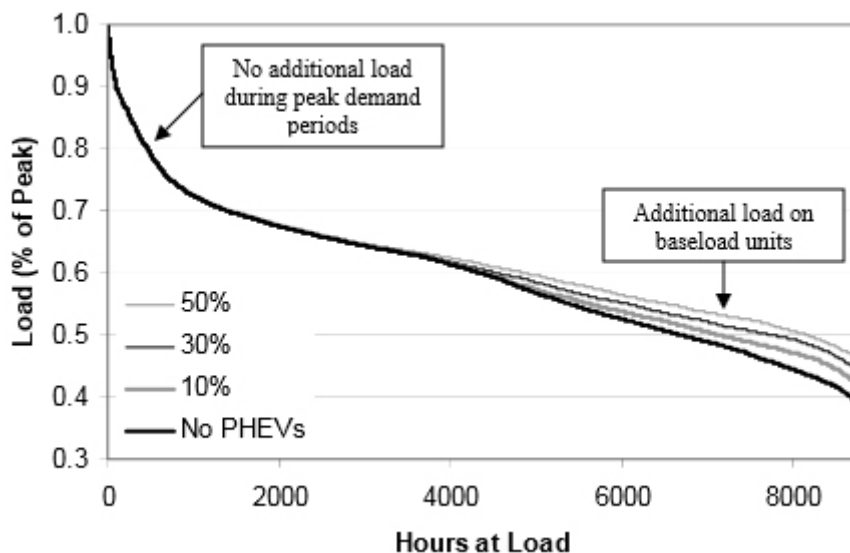


Figura 2.3 Influência dos EV na característica de carga (Denholm e Short, 2006).

Considera-se a utilização dos EV, com a capacidade de descarga na rede, substitutos aceitáveis dos serviços auxiliares como regulação e reserva girante, contudo uma grande frota de veículos deste tipo pode possibilitar a ajuda na geração em períodos de grande demanda (Ponta) ou situações de emergência (Denholm e Short, 2006) .

A análise da integração dos EV nos diferentes mercados de geração são apresentados na tabela 2.3 (Kempton et al. 2001):

Tipo de mercado de Geração	Compatibilidade
Base	Não aconselhado
Ponta	Situações pontuais
Reserva Girante	Competitivo
Regulação	Muito competitivo

Tabela 2.3 - Compatibilidade entre o V2G e os diferentes tipos de geração.

Além de se conseguir equilibrar o diagrama de carga os EV apresentam características típicas tais como (Kempton et al. 2005):

- Geração e carga geograficamente distribuída;
- Custos de inatividade baixa;
- Resposta rápida;
- Custo reduzido por kWh;

As energias renováveis são imprevisíveis e intermitentes sendo a sua disponibilidade e potência de geração fatores aleatórios. Para o sistema elétrico aumentar a dependência destas fontes é necessário ter-se uma maior reserva girante e uma regulação mais eficaz, capacidades que podem ser disponibilizados pelo V2G. Para o efeito consegue-se armazenar potência excedente e aplicar eficientemente no controlo e gestão da rede.

Refere-se ainda que o aumento da frota de veículos e o amadurecimento do V2G podem levar a outros tipos de mercados de energia além dos referidos, desempenhando um papel diferente do inicialmente estipulado, como por exemplo, um papel mais ativo no controlo do nível de geração de ponta.

CAPÍTULO 3

Sistemas de armazenamento

Neste capítulo serão expostos várias sistemas de armazenamento, componentes essenciais para EV mas também para novo paradigma de energia sustentável, permitir resolver o elevado grau de intermitência, pois armazenar a energia elétrica nas horas de vazio, para posteriormente ser utilizada nas horas de pico.

3.1 Baterias

As baterias, inventadas no século XVIII por Alessandro Volta (Vincent e Scrosati, 1997), são dispositivos de armazenamento que utilizam reações de oxido-redução para converter energia química em energia elétrica.

A bateria tem um papel bem definido a desempenhar no sistema eléctrico de um veículo seja convencional, híbrido ou eléctrico. As principais funções da bateria são (Vincent e Scrosati 1997):

- Fornecer energia para fazer funcionar o motor de arranque e prover corrente eléctrica ao sistema de ignição durante o arranque;
- Fornecer energia para fazer funcionar o motor eléctrico de tração no caso dos veículos eléctricos.
- Suprir de energia as lâmpadas dos faróis de estacionamento e outros equipamentos que poderão ser usados enquanto o motor de tração está parado;
- Agir como estabilizador de tensão para o sistema de carga e outros circuitos eléctricos;
- Providenciar corrente quando a procura de energia pelo automóvel exceder a capacidade do sistema de carga (por exemplo o alternador).

3.1.1 Constituição geral

Cada bateria, consoante a capacidade ou tensão de saída pretendida, é constituída por um grupo de células ligadas em série ou em paralelo, ou ambos.

Cada célula funciona com base na transferência de eletrões entre dois eléctrodos de materiais diferentes, possuindo 3 componentes principais:

- 1) Ânodo ou eléctrodo negativo. É o eléctrodo que fornece eletrões ao circuito exterior e em que ocorre a oxidação num processo de descarga. Tem uma boa eficiência como agente redutor, boa condutividade, estabilidade, facilidade de fabricação e baixo valor económico (Linden e Reddy, 2002).
- 2) Cátodo ou eléctrodo positivo. É o eléctrodo que aceita eletrões do circuito eléctrico, e em que ocorre a redução num processo de descarga. Tem uma boa eficiência como agente oxidante é estável quando entra em contacto com o eletrólito (Reddy, 2011).

Na prática, quer no cátodo quer no ânodo, pretende-se materiais sem reatividade, de forma a que as suas propriedades permaneçam inalteráveis, sejam seguros em transporte, abundantes na natureza e de baixo custo.

- 3) Eletrólito ou condutor iónico. Disponibiliza um meio de transferência de carga iónica dentro da célula entre os dois eléctrodos. Este é tipicamente um líquido onde se dissolvem sais ácidos ou básicos para conceber a condutividade iónica (Reddy, 2011).

Existem eletrólitos sólidos que aumentam a durabilidade e consistência das baterias. Contudo, o eletrólito não pode ser condutor pois iria provocar um curto-circuito interno entre os eléctrodos. Por isso na prática usa-se um dispositivo mecânico, designado por separador, para isolar os eléctrodos eletricamente (Reddy, 2011).

3.1.2 Processo cíclico de descarga e carga

Para um processo de descarga em que a célula está ligada a uma carga externa, o ânodo é oxidado e os eletrões fluem do ânodo pela carga até ao cátodo, que é reduzido, figura 3.1 a). Através do eletrólito é realizado o fluxo dos aniões para o ânodo e de e catiões para o cátodo, e assim o circuito é completo (Reddy, 2011).

Para um processo de carga ou de armazenagem a corrente passa a fluir no sentido inverso através de uma fonte contínua externa. O eléctrodo positivo é oxidado e

vai perder os elétrons que são transferidos para o eletrodo negativo de acordo com a figura 3.1. b). Por definição a oxidação sucede no ânodo e a redução sucede no cátodo pelo que os dois eletrodos trocam de lugares em relação à situação de descarga da célula (Reddy, 2011).

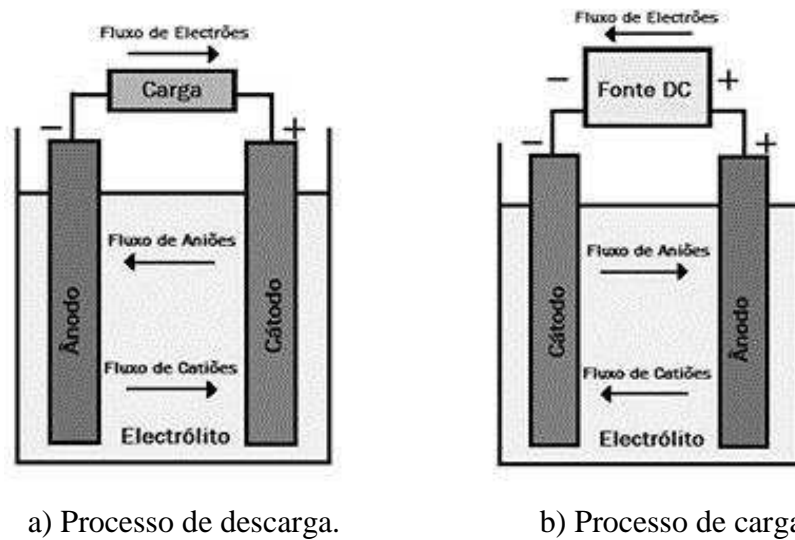


Figura 3.1 Operações eletroquímicas de uma célula

3.1.3 Fatores que afetam o desempenho

Existe vários fatores que influenciam as características operacionais, capacidade e energia fornecida pela bateria.

3.1.3.1 Nível de tensão

As características das reações inerentes a uma bateria estão dependentes dos seguintes níveis de tensão (Reddy, 2011):

- Tensão de operação. Quando uma carga ou carregador é ligada à bateria, a tensão é menor que a tensão em circuito aberto;
- Tensão de circuito aberto ou em vazio. Quando a carga não está ligada à bateria a tensão tem um valor próximo do valor teórico;
- Tensão teórica. A diferença de potencial elétrico que depende dos materiais do ânodo e cátodo;
- Tensão final ou de corte: tensão designada como fim de descarga e que está dependente da aplicação desejada.

As curvas de tensão estão dependentes do sistema eletroquímico, características de montagem e condições de descarga.

. A curva 1 é representativa de uma descarga onde os reagentes e os produtos de reação variaram minimamente até à exaustão.

A curva 2 representa uma descarga em duas etapas, indicando uma mudança no mecanismo das reações e dos materiais ativos.

A curva 3 tem declive negativo quase constante tipicamente resultante da alteração dos materiais ativos, reagentes, resistência interna e mais alguns fatores durante a descarga.

O nível de tensão ideal seria um valor constante e igual ao valor de tensão da bateria completamente carregada (Reddy, 2011).

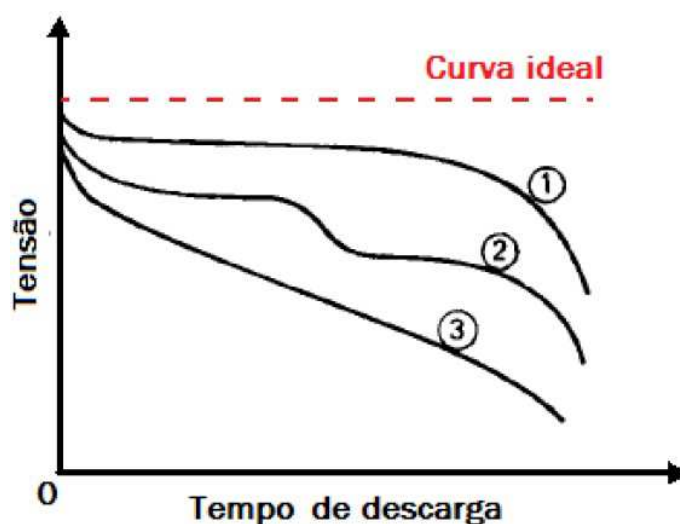


Figura 3.2 Características de descarga de uma bateria: perfis de tensão (Reddy, 2011).

3.1.3.2 Corrente de descarga

O ciclo de vida da uma bateria é reduzido devido ao aumento de corrente de descarga pedida à bateria que implica uma majoração de perdas de joule e de efeitos de polarização. Para conseguir a aproximação dos valores da tensão e da capacidade dos valores teóricos é necessário uma corrente de descarga extremamente baixa, mas longos períodos de descarga podem causar diminuição de capacidade.

Durante o processo de descarga, se a bateria estiver muito próxima do fim da carga consegue-se um aumento de capacidade e um aumento do tempo de serviço a

redução súbita da corrente de descarga. Este processo pode ser observado em figura 3.3, no qual inicialmente se aplica uma corrente de descarga de valor significativo e que depois se vai diminuindo por etapas provocando picos de tensão prolongando o tempo de descarga (Reddy, 2011).

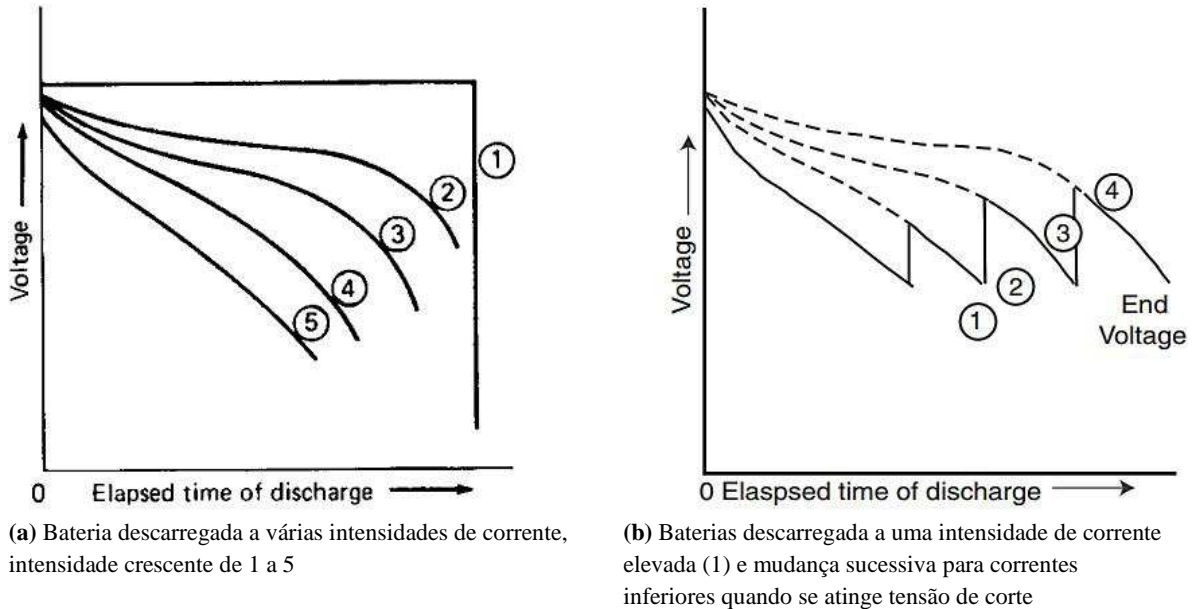


Figura 3.3 Característica de descarga de uma bateria (Reddy, 2011).

É usual utilizar a equação (3.1) para definir qual a diminuição da capacidade da bateria ao longo das sucessivas utilizações, em função da capacidade nominal (Reddy, 2011).

$$M = \frac{I \cdot n}{C_{nominal}} \quad (3.1)$$

Onde,

M= Percentagem de capacidade nominal disponível;

I= Corrente de descarga, [A];

$C_{nominal}$ = Valor nominal da capacidade da bateria, [Ah];

n= Tempo que demora a descarregar a capacidade C da bateria para a corrente I, [h];

3.1.3.3 Modo de descarga

Consoante a escolha do modo de descarga, a bateria vai ter uma resposta diferente. Os três modos básicos pelo qual se pode efetuar uma descarga são (Reddy, 2011):

- Resistência constante: A resistência da carga permanece constante durante o processo de descarga.
- Corrente constante: A corrente permanece constante durante o processo de descarga.
- Potência constante: A corrente aumenta durante a descarga proporcionalmente ao decréscimo da tensão de modo a que o nível de potência da bateria se mantém constante.

3.1.3.4 Temperatura

A temperatura a que a bateria está sujeita durante o processo de descarga influencia o tempo de serviço e a tensão de saída da mesma. Baixas temperaturas resultam na redução da atividade química e no aumento da resistência interna da bateria. Na figura 3.4 observa-se para a mesma corrente de descarga o valor da tensão de saída para várias temperaturas menores do que T_4 (Reddy, 2011). Para as temperaturas menores nota-se um aumento do declive e portanto uma diminuição da tensão de saída com o tempo.

Esta característica altera-se consoante o tipo de baterias mas em geral estas atingem uma melhor performance para temperaturas entre os 20°C e 40°C .

Para temperaturas superiores a atividade química aumenta consideravelmente resultando numa maior rapidez da descarga e diminuindo notavelmente a capacidade. Neste caso pode-se degradar os componentes constituintes da bateria (Reddy, 2011).

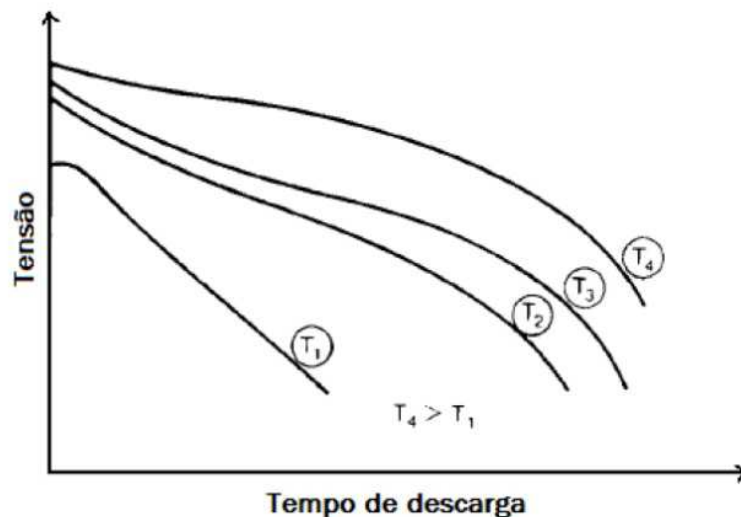


Figura 3.4 Característica de descarga da tensão em função da temperatura para uma corrente constante (Reddy, 2011).

3.1.3.5 Ciclo de vida

O ciclo de vida depende em especial da temperatura e da intensidade da corrente de descarga.

A figura 3.5 reflete a dependência do número de horas de serviço com a intensidade de corrente de descarga para várias temperaturas, em escala logarítmica, em que T_4 representa a temperatura mais elevada (Reddy, 2011).

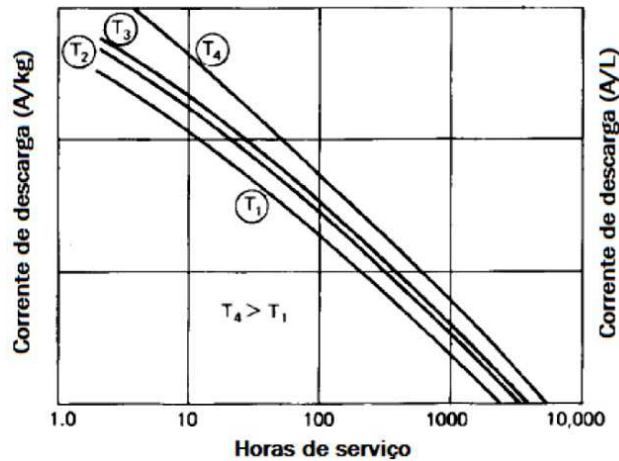


Figura 3.5 Ciclo de vida em horas em função da temperatura e corrente de descarga (Reddy, 2011).

3.1.4 Classificação das baterias

Segundo (Reddy, 2011) as baterias podem ser classificadas em:

- Baterias primárias: que não podem ser recarregáveis devido à destruição de um dos elétrodos, normalmente o negativo, depois da reação química de descarga.
- Baterias secundárias: as reações químicas alteram quimicamente os elétrodos e o eletrólito mas depois de processo de recarga da bateria as propriedades iniciais podem ser restauradas.
- Baterias de combustível: diferem dos outros tipos de baterias pois os materiais ativos não fazem parte integral do dispositivo, sendo alimentados exteriormente para quando necessária a produção de energia.

Só as baterias secundárias e as pilhas de combustível, podem satisfazer as aplicações EV.

3.1.4.1 Baterias secundárias ou recarregáveis

O número de aplicações para uso de baterias e a exigência de uma melhor desempenho tem vindo a aumentar constantemente.

Os critérios para satisfazer os BEV são os seguintes:(Reddy, 2011)

- Elevada densidade energética para uma maior autonomia e redução de volume;
- Elevada densidade de potência para satisfazer a necessidade das acelerações;
- Leveza;
- Capacidade de suportar regimes dinâmicos agressivos, isto é, aceitar ou fornecer elevadas correntes, provenientes de travagens regenerativas ou acelerações bruscas;
- Elevada longevidade;
- Baixa manutenção;
- Baixo custo;
- Segurança mesmo em condições de choque.

As baterias recarregáveis têm menor impacto ambiental do que as baterias primárias, tendo um custo inicial mais elevado, mas podendo ser recarregadas e usadas muitas vezes, têm custo total de uso muito menor.

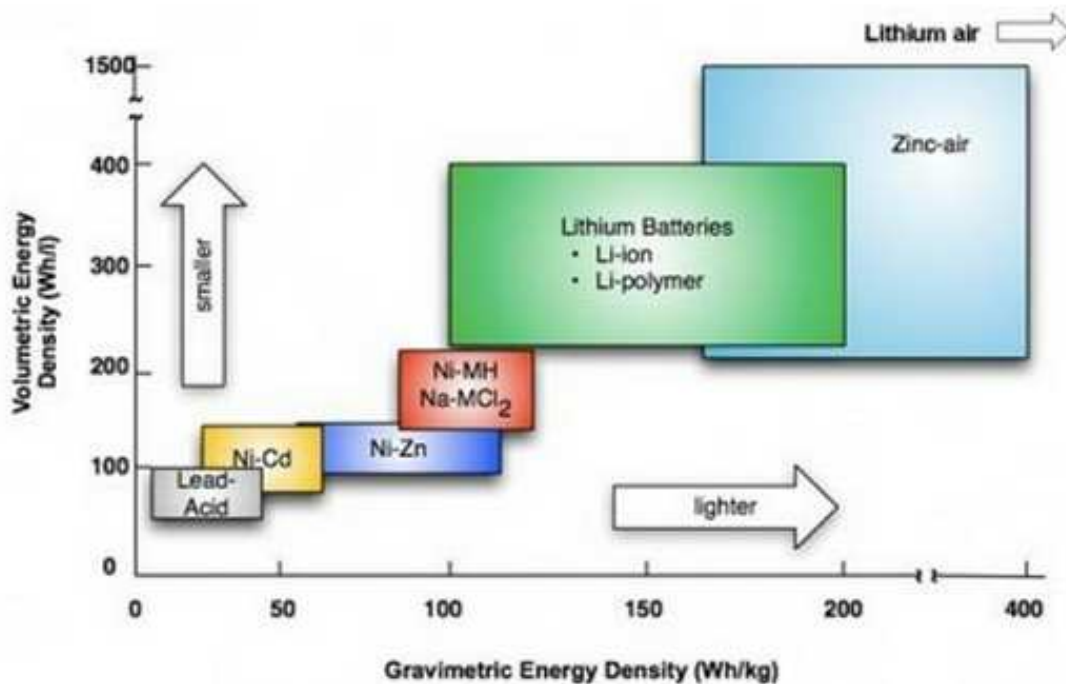


Figura 3.6 Características de várias tecnologias de baterias (NASA, 2011)

3.1.4.2 Baterias de ácido chumbo

Inventada há mais de 150 anos, é uma associação de células ligadas em série, com tensão elétrica individual de cada célula de aproximadamente dois volts. A bateria de chumbo-ácido é constituída por dois elétrodos, um de chumbo esponjoso, e outro de dióxido de chumbo em pó, ambos mergulhados numa solução de ácido sulfúrico com densidade aproximada de 1,28g/mL dentro de uma malha de liga chumbo-antimónio, uma liga mais resistente à corrosão que o chumbo puro.(Pavlov, 2011)

Tem como vantagem a robustez, tolerância a sob recargas, impedância interna baixa e pode fornecer grandes correntes. Tem muitos fornecedores por todo o mundo e baixo custo.

Tem como desvantagem o peso e o volume assim como o perigo de sobreaquecimento durante a carga e a tendência para a decomposição de eletrólito (por exemplo: deve ser armazenada carregada).

Os problemas principais das baterias ácido chumbo em aplicações BEV são: (Pavlov, 2011)

1. As placas negativas não podem aceitar as altas correntes de carga geradas em travagem regenerativa.
2. As baterias não devem operar em estado parcial de carga (SoC), devido à sulfatação rápida das placas negativas.

Dependendo da quantidade e do estado físico do eletrólito, existem dois tipos de construção mais divulgados deste tipo de baterias (Pavlov, 2011):

- *Flooded/wet cell battery*: têm um eletrólito líquido, que evapora e necessita de ser repostado.
- *VLRA (Valve Regulated Acid Battery)*. Nesta tecnologia ainda se distinguem dois tipos:
 - 1) *AGM (Absorbed Glass Mat Batteries)* e
 - 2) *Gel cell batteries*: é a mais usada para tração, contendo um eletrólito gelificado, apresentando como a segurança e a não necessidade de manutenção.

As baterias VLRA com níveis de custo entre 70-110 euros per kWh, são uma opção muito acessível em comparação com outras baterias existentes (Husain, 2011).

No entanto, nas aplicações BEV atuais são limitadas a veículos industriais, tais como, empilhadores e outros veículos de baixa velocidade.

Baterias de ácido chumbo	Energia específica (Wh/kg), 20h, 25°C	Densidade de energia(Wh/L) 20h, 25°C	Densidade de potencia (W/L) 100%SoC; -18°C; 10s >7,5V	Descarga de Potencia específica (Wh/kg)100%SoC; -18°C; 10s >7,5V
Flooded (12V) prismática	46	95	445	215
AGM (12V) prismática	39	95	570	235
AGM (12V) em espiral prismática	35	70	630	315
Gel (12) prismática	34	71	325	115

Tabela 3.1. Dados específicos para baterias de arranque de acordo com a norma europeia 60095-1 (IEC, 2006).

3.1.4.3 Baterias de níquel hidreto metálico (NiMH)

As baterias de níquel-hidreto metálico (Ni-MH) apresentam características operacionais similares às da bateria de níquel cádmio, sendo a principal diferença o uso de hidrogénio absorvido numa liga, na forma de hidreto metálico, como material ativo no elétrodo negativo, ao invés do cádmio utilizado nas baterias de níquel cádmio. O elétrodo de hidreto metálico apresenta uma maior densidade de energia que um elétrodo de cádmio, portanto a massa de material ativo para o elétrodo negativo usado numa bateria de níquel-hidreto metálico pode ser menor, que a usada em baterias de níquel cádmio. (Husain, 2011)

As baterias de níquel hidreto metálico apresentam vantagens de tolerância a sobrecargas e sobre descargas, podem funcionar em carregamento/ descarregamento total com uma impedância interna reduzida e toleram uma gama grande de temperaturas. As desvantagens destas baterias são a taxa de autodescarga muito elevada que podem levar a um deterioramento durante um armazenamento prolongado (Husain, 2011).

Uma boa parte dos veículos híbridos usam baterias de níquel hidreto metálico. No entanto, os requisitos de desempenho das baterias para HEV são bastante inferiores

aos dos BEV, onde é necessário uma energia específica substancialmente maior (150-200 Wh/kg).

Baterias de NiMH	Capacidade de armazenamento (kWh)	Energia específica (Wh/kg)	Potência máxima (W/kg)	Tempo de recarga	Número ciclos de carga	Eff. (%)	Temperatura de serviço (°C)
Nível de sistema	20	50-70	1000-1500	3-6(h)	2000	75	-10 até +50
EV		68	150				
HEV		50	750				
Nível de sistema		30-80	250-1000		1500		

Tabela 3.2 Desempenho das baterias NiMH (Gondelach, 2010)

3.1.4.4 Baterias de alta temperatura

As baterias de alta temperatura ou de “sal fundido” baseiam-se no transporte de íons de sódio entre o cátodo e o ânodo.

Existem duas variantes da bateria de sódio beta (Lu et al. 2010):

1. A bateria sódio-enxofre (NaS) e
2. A bateria Zebra, já utilizada em aplicações BEV.

Devido à alta temperatura de operação interna (entre 300 e 350°C.), o funcionamento das baterias “sal fundido” é independente da temperatura ambiente (Lu et al. 2010). No entanto, a temperatura interna tem de ser mantida elevada, para evitar a solidificação das partes derretidas. A aplicação das baterias ZEBRA só parece ser uma opção se o veículo for usado regularmente (por exemplo, para veículos de transporte comercial e público).

	Capacidade de armazenamento (kWh)	Energia específica (Wh/kg)	Potência máxima (W/kg)	Tempo de recarga	Número ciclos de carga	Eff. (%)	Temperatura de serviço (°C)
NaS		110	150		1000		350
ZEBRA	23	115	180	11 h	1000	90	260-360

Tabela 3.3 Desempenho das baterias de alta temperatura (Gondelach, 2010).

3.1.4.5 Baterias de íons de lítio (Li-ion)

Constituem a opção mais promissora no curto prazo e também é amplamente esperado que a sua posição no mercado se mantenha no médio prazo e, possivelmente, longo prazo.

A principal característica deste tipo de baterias é que em nenhuma altura no processo cíclico de carga/descarga existe qualquer lítio metálico presente. Pelo contrário, os íons de lítio (Li^+) durante os processos de carga e descarga trocam de lugar entre os eléctrodos positivo e negativo através de um material ativo (eletrólito) (Gondelach et al. 2012).

O eléctrodo positivo é tipicamente um óxido metálico com uma estrutura por camadas, como o óxido de cobalto de lítio (LiCoO_2), ou um material com estrutura em túnel, como o óxido de magnésio de lítio (LiMn_2O_4). O eléctrodo negativo é geralmente um material em carbono, com uma estrutura por camadas (Gondelach et al. 2012).

	Material do cátodo	Capacidade de armazenamento (kWh)	Energia específica (Wh/kg)	Potência máxima (W/kg)	Ciclode vida (anos)	Tempo de recarga
Think (EnerDel)		22				
Tesla Roadster	LiCoO_2	55	125	444	7	3,5h
iMiEV		16			10	7h/30min
Leaf	LiMn_2O_4	24				8h/30min
JCS	$\text{Li}(\text{NiCoAl})\text{O}_2$	24	90	210	>12	

Tabela 3.4. Desempenho da bateria Li-íon implementada em diferentes carros (Gondelach, 2010)

A diferença de potencial da célula surge devido à diferença da energia entre os íons de lítio presentes na estrutura cristalina dos eléctrodos.

Existem quatro tipos de eletrólitos que podem ser usados nas baterias de íons de Lítio: eletrólitos líquidos, eletrólitos de gel, eletrólitos de polímeros e eletrólitos de cerâmica. Estes devem oferecer uma boa estabilidade, propriedades de segurança aceitáveis e boa compatibilidade com os materiais dos eléctrodos de modo a otimizar o rendimento dos processos.

3.1.4.6 Baterias de polímeros de Lítio (LMP)

As baterias LMP não têm eletrólito líquido, mas sim películas de polímeros atuando como meio entre o ânodo e o cátodo.

No entanto, a um nível de energia de 100 Wh/kg, a potência específica de 100-150 Wh/kg e um ciclo de vida de menos de 1000 ciclos, as baterias LMP não mostram vantagem de desempenho (ainda) em comparação com baterias Li-ion. Outra desvantagem desta tecnologia é a temperatura de funcionamento, entre 60 e 80°C, desejada para aumentar a condutividade iônica do eletrólito de polímeros (Gondelach et al. 2012).

	Capacidade de armazenamento (kWh)	Energia específica (Wh/kg)	Potência máxima (W/kg)	Tempo de recarga	Tempo de vida (km)	Temperatura interna (°C)	Temperatura de serviço (°C)
Bluecar	30	100	150		200,00 0	60-80	-20 ate +60
(1)	20	100-120	200-250	6-10 h			260-360

(1) [Challenge Biblendum, 2007]

Tabela 3.5. Desempenho das baterias LMP implementadas no projeto Bluecar (Gondelach, 2010)

3.1.4.7 Baterias Lítio-enxofre (LieS)

Uma equipa da Universidade de Stanford (EUA) construiu em 2007 um ânodo a partir de nanofios de silício com capacidade para armazenar 10 vezes mais carga que as baterias de lítio-ion convencionais. Para atingir o potencial máximo do dispositivo é necessário a criação de um cátodo correspondente capaz de armazenar eletrões com densidades de carga similares por isso utilizaram uma recente nano-estrutura de carbono-enxofre e aqueceu-a na presença de lítio n-butyl de modo a formar um cátodo de sulfureto de lítio (McKenna, 2010).

A combinação deste cátodo com o ânodo de silício anteriormente desenvolvido deu origem a uma bateria com uma descarga inicial de 630 Wh/kg de elementos ativos,

o que corresponde a um incremento de aproximadamente 80% da sua densidade energética em relação a baterias comerciais de íões de lítio (McKenna, 2010).

Infelizmente, o nosso desejo por baterias que durem quatro vezes mais vai ter que esperar, já que, graças aos baixos ciclos de recarga (40 – 50, comparado ao 300 – 500 das baterias de íões de lítio) (McKenna, 2010), as novas baterias de Lítio-Enxofre não devem estar prontas para produção tão cedo.

3.1.4.8 Baterias Zinco-ar

As baterias de zinco-ar são de dois tipos: não recarregáveis (pilhas) e as recarregáveis mecanicamente (células de combustível). Estas baterias eletrolíticas que funcionam por meio da oxidação do zinco ao ar atmosférico, possuem altas densidades energéticas e são relativamente fáceis de produzir. O ânodo é formado por uma massa de partículas de zinco, o qual se encontra saturado com um eletrólito, e o oxigénio (O₂) do ar atmosférico reage por sua vez no cátodo de modo a formar íões hidroxilos que migram para a referida pasta de zinco de modo a formar zincato. Isto dá origem à libertação de eletrões que viajam para o cátodo, ao mesmo tempo em que o zincato decai para óxido de zinco e que água regressa ao eletrólito, tanto a água como os hidroxilos do ânodo são reciclados no cátodo, pelo que a primeira não é consumida (Gondelach et al. 2012).

As baterias de zinco-ar possuem características das células de combustível bem como das baterias normais: O zinco é o combustível, a taxa de reação pode ser regulada através da variação do fluxo de ar, e a pasta oxidada à base de zinco/eletrólito pode ser substituída por uma mistura nova (Gondelach et al. 2012).

As grandes vantagens deste tipo de bateria são a sua durabilidade (tempo de descarga), e a densidade energética. Como desvantagem a bateria zinco-ar tem o custo elevado de produção.

3.1.4.9 Baterias Lítio-ar

Em 2009, a IBM lançou uma iniciativa (Battery 500) que visa desenvolver uma bateria capaz de alimentar um veículo por 500 milhas (cerca de 800 quilômetros) (IBM Research, 2013).

Durante a descarga destas baterias os iões positivos de lítio (catiões) fluem do ânodo para o cátodo (constituído normalmente de carbono poroso) através de um eletrólito de modo a reagirem com o gás de oxigénio (O_2), presente no seu interior e formarem óxido de lítio (Li_2O) ou peróxido de lítio (Li_2O_2) (IBM Research, 2013). Este fluxo gera por seu lado a passagem de corrente elétrica na mesma direção através de um circuito elétrico externo.

Quando as baterias estão a ser carregadas a passagem da corrente elétrica desagrega os compostos de forma a libertar novamente o oxigénio e a devolver os iões de lítio ao ânodo.

As baterias de lítio-ar possuem uma maior densidade energética do que as baterias de iões de lítio por possuírem um cátodo mais leve e pelo facto do oxigénio se encontrar livremente disponível no ambiente, não precisando de ser armazenado dentro das mesmas.

Os eletrólitos de gel de polímero usado nestas baterias são feitos de compostos como a poliacrilonitrila (PAN) e o fluoreto de poliovinilideno (PVdF). Os eletrólitos podem ser igualmente líquidos orgânicos, polímeros orgânicos secos, e sólidos inorgânicos (Bruce et al. 2011).

	Energia específica (Wh/kg)	Potência máxima (W/kg)	Eff. (%)	DoD (%)	Custo (€/kWh) em 2010	Ciclo de vida (# ciclos)	Tempo de vida (anos)
Li-ion	200 (150-250)	500 (400-600)	92 (90-95)	80 (70-90)	247 (205-286)	2000 (1,000-3,000)	10 (7-15)
Zebra	160 (130-200)	280 (250-320)	90 (90-95)	80 (70-90)	205 (82-286)	1,000 (1,000-1,500)	15
Li-S	400 (300-500)	300 (200-400)	80 (70-90)	100 (90)	385 (205-411)	1,000 (500-1,000)	7 (5-10)
Zn-ar	250 (150-350)	300	70 (65-80)	80 (70-90)	185 (82-286)	2,000 (1,000-3,000)	7 (5-10)
Li-ar	500 (500-1,000)	300	70 (60-85)	80 (70-90)	411 (247 - 575)	1,000 (500-1,000)	7 (5-10)

Tabela 3.6. Desempenho futuro de algumas baterias (Gondelach 2010).

Estas baterias encontram-se atualmente em investigação na IBM Almaden Research, na Califórnia (IBM Research, 2013). Estando prevista a sua disponibilidade antes de 2020.

3.1.5 Modelos elétricos das baterias

Os modelos elétricos procuram reproduzir o comportamento elétrico das baterias, contabilizando as perdas ôhmicas e perdas de polarização, através de uma rede de elementos base composta por condensadores, resistências e fontes dependentes de tensão e corrente.

3.1.5.1 Modelo Equivalente de Thévenin

O modelo mais básico, representado na figura 3.7, é a série de uma fonte dependente de tensão com uma resistência e com uma malha RC.

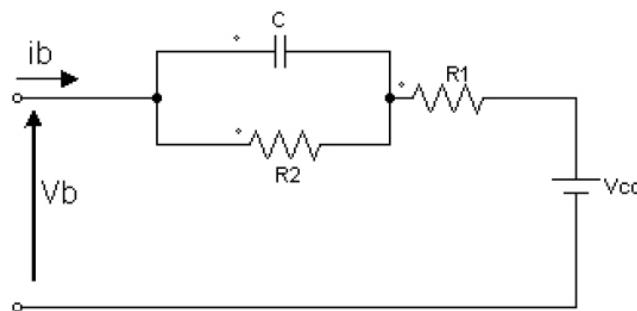


Figura 3.7 Circuito equivalente de Thévenin

O modelo permite o estudo do comportamento da tensão em baterias durante o seu ciclo de vida. V_b representa a tensão em circuito aberto a resistência interna, R_1 e a tensão em sobretensão, dada pela combinação em paralelo da resistência R_2 e do condensador C . Este circuito só nos deixa simular os principais elementos que condicionam o funcionamento das baterias, pois considera-os constantes quando na realidade dependem de (Kroeze e Krein, 2008):

- Capacidade do condensador.
- Estado de carga.
- Taxa de carga e de descarga. Aproximação de primeira ordem do modelo de uma bateria
- Temperatura ambiente.

Existem modelos onde foram adicionadas melhorias de modo a prever a variação da tensão com o estado de carga, mas estes modelos ainda apresentam várias desvantagens. Por exemplo, a referência (Kroeze e Krein, 2008) usa um condensador variável em vez de VOC (SoC) para representar a não linearidade da tensão em circuito aberto. Neste

modelo a simulação torna-se bastante pesada, pelo que se utilizam os seguintes modelos:

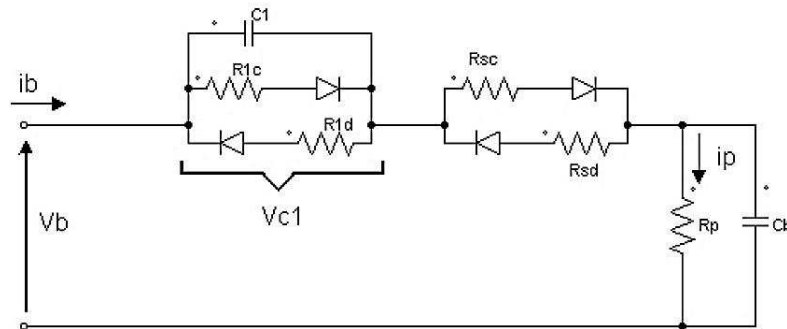


Figura 3.8 Modelo de carga e descarga de uma bateria.

O modelo de carga e descarga de uma bateria apresentado em figura 3.8 é construído com os seguintes componentes: V_{c1} representam as sobretensões, as resistências R_{sc} e R_{sd} a resistência interna e R_p a resistência associada à autodescarga, o condensador C_b simula a capacidade da bateria. Este modelo produz resultados satisfatórios, mas são necessários vários parâmetros que são obtidos através de testes físicos à bateria, o que nem sempre é possível (Kroeze e Krein, 2008).

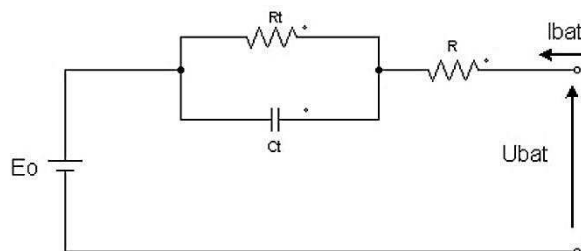


Figura 3.9 Aproximação de primeira ordem do modelo de uma bateria.

O modelo de carga e descarga de uma bateria apresentado em figura 3.9 é o modelo de aproximação de primeira ordem que tem uma tensão de circuito aberto ideal, definida em relação ao estado de carga da bateria, SOC. Esta relação é realizada recorrendo a valores tabelados, a resistência R é à resistência internada bateria, e a malha RC representa a histerese para descrever o comportamento da bateria durante transitórios. Este modelo é mais preciso, mas é necessário determinar C_t e R_t como função da corrente de carga, do SOC e da temperatura. Normalmente utilizam-se estimativas através do método dos mínimos quadrados e a colocação dos resultados em tabelas lidas

durante a simulação, não garantindo a validade dos valores obtidos durante a totalidade do tempo de vida da bateria (Kroeze e Krein, 2008).

3.1.5.2 Modelo de Impedância

Este tipo de modelos (figura 3.10) utiliza o método de espectroscopia da impedância electroquímica (electrochemical impedance spectroscopy - EIS) de modo a obter a impedância complexa para uma gama de frequências AC. Deste modo, é possível criar um modelo equivalente da bateria (Chen e Rincón-Mora, 2006).

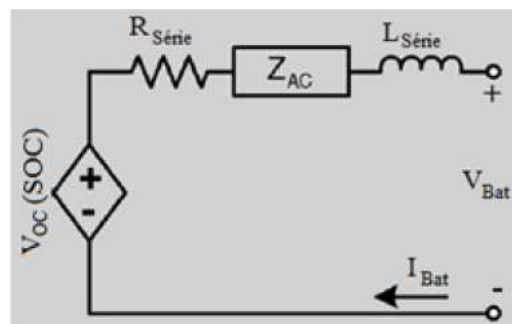


Figura 3.10 Modelo equivalente para modelo de impedância

O princípio geral do método de EIS é baseado na aplicação de um sinal sinusoidal, medindo depois a resposta característica da bateria, que depende da impedância. Esta impedância deve descrever os fenómenos electroquímicos de dupla camada, difusão, transferência de carga, resistência interna e indutância parasita e então usar uma rede complexa equivalente (Z_{AC}) para contabilizar a impedância total de espectros (Chen e Rincón-Mora, 2006).

O processo de ajuste é difícil, complexo e não intuitivo. Além disso, este modelo só funciona para um SOC fixo e para uns determinados parâmetros de temperatura, por isso não se consegue prever a resposta em regime permanente nem o tempo útil de funcionamento da bateria. (Chen e Rincón-Mora, 2006).

3.1.5.3 Modelo de Execução

São modelos desenhados exclusivamente para descrever a evolução da tensão em função do estado de carga para intensidades de corrente constante (Chen e Rincón-Mora, 2006).

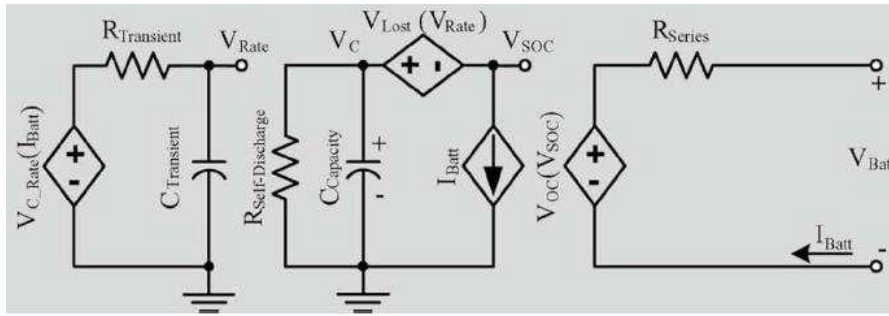


Figura 3.11 Modelo equivalente para modelo de execução

A implementação pode ser realizada em tempo contínuo (utilizando os simuladores SPICE) ou em tempo discreto (utilizando o Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language Code - VHDL) (Chen e Rincón-Mora, 2006). Estas implementações não permitem prever o comportamento em tempo real da bateria nem a tensão de resposta para diferentes correntes de carga com precisão.

3.2 Pilha de combustível

Uma pilha de combustível é um conjunto de células galvânicas na qual a energia química de um combustível é convertida diretamente em energia elétrica através de processos eletroquímicos.

Ao contrário das baterias, a pilha de combustível é um aparelho eletroquímico que gera continuamente energia, em vez de armazenar, enquanto lhe for fornecido hidrogénio. A eficiência da conversão, o funcionamento sem ruído, as emissões praticamente nulas, o rápido reabastecimento e a durabilidade, são algumas das vantagens deste tipo de tecnologia. O hidrogénio parece ser o combustível não poluente ideal, pois apresenta grande densidade de energia e o produto da reação da pilha de combustível é apenas água (Chan, 2007).

A energia específica da pilha de combustível é considerada equivalente à da gasolina, contudo, a sua potência específica é bastante menor, concluindo-se que o desempenho do arranque de um veículo com pilha de combustível seria inferior em comparação com o do veículo convencional. A integração da bateria ou supercondensador com a pilha de combustível podem melhorar o desempenho do arranque do veículo, tornando a realçar que, com múltiplas fontes de energia criteriosamente selecionadas, o desempenho dos veículos pode ser bastante melhorado (Chan, 2002).

Este tipo de tecnologia é visto como uma solução a longo prazo, mas encontra-se ainda numa fase prematura, principalmente devido a todos os problemas associados ao manuseamento do hidrogénio.

De forma a evitar os regimes dinâmicos elevados na bateria é possível ter elementos intermédios como volantes de inércia (Flywheel) e supercondensadores de modo a melhorar a performance do sistema.

3.3 Sistemas volantes (Flywheels)

Os sistemas baseados em volantes de inércia (Flywheel energy storage-FES) funcionam acelerando um rotor a uma velocidade muito alta e armazenando a energia numa massa em rotação. Quando a energia é extraída do sistema, a velocidade de rotação do volante é reduzida como consequência do princípio da conservação de energia (Ehsani, 2005).

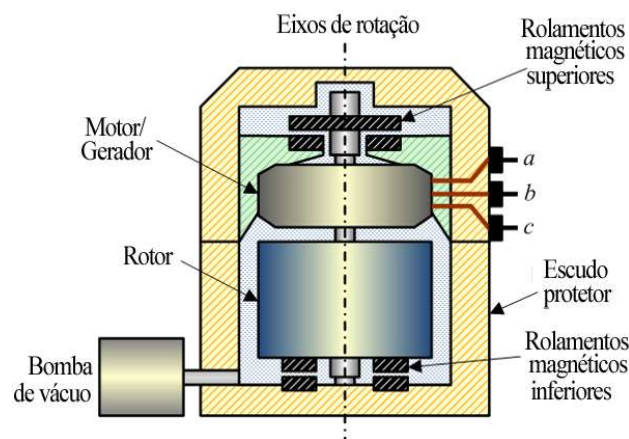


Figura 3.12. Construção básica de um volante de inércia

Vantagens (Ehsani, 2005):

- Impacto ambiental mínimo.
- Capacidade de armazenamento.
- Carregamento rápido.
- Durabilidade.

Desvantagens (Ehsani, 2005):

- Pouca resistência a choques mecânicos.
- Variações na tensão e frequência de saída.
- Efeito giroscópico.
- Segurança.

3.4 Supercondensadores

Devido a frequentes operações de paragem/ arranque (stop/go) dos EV e HEV, o perfil da descarga e da carga dos sistemas de armazenamento de energia é muito variada. A média da energia necessária a partir do armazenamento de energia é muito menor do que o pico da potência, que é de duração relativamente curta, necessária para a aceleração e para subidas das rampas. A relação entre o pico da potência e a potência média pode ser superior a 10:1 (Ehsani, 2005).

A utilização de supercondensadores como armazenamento de energia esteve sempre muito condicionada, devido às limitações existentes na densidade de energia e na gama de capacidades que lhes é característica.

Com os desenvolvimentos tecnológicos surgiram condensadores eletroquímicos (ou de dupla-camada).

O princípio básico de um condensador de dupla camada é ilustrado na figura 3.13. Quando duas varetas de carbono são imersas numa solução de ácido sulfúrico de baixa concentração, separadas uma da outra e carregadas com uma tensão crescente de zero até os 1.5 V, por volta dos 1,2 V uma pequena bolha aparecerá à superfície de ambos os elétrodos. Essas bolhas a uma voltagem acima de 1 V indicam decomposição elétrica de água. Abaixo dessa tensão de decomposição, enquanto a corrente não flui, aparece entre eletródio e o eletrólito a " dupla camada elétrica " que conseguem aliar o pouco volume com densidades de energia e capacidades bastantes mais elevadas que os condensadores usuais (Ehsani, 2005).

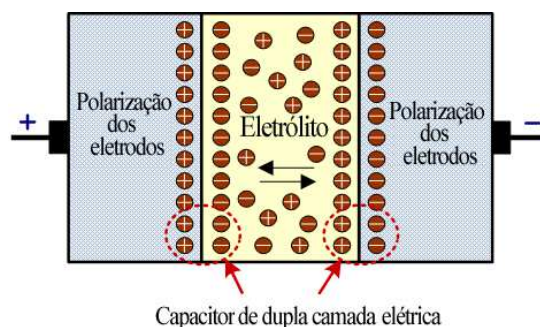


Figura 3.13 Construção básica de um supercondensador

Atualmente, os supercondensadores podem carregar e descarregar quase um número infinito de vezes, tendo um tempo de vida útil muito longo. Permitem correntes de descarga elevadas e os tempos de carga e de descarga são semelhantes e

bastante curtos (30 segundos aproximadamente). São ainda fabricados com materiais não tóxicos, relativamente baratos e apresentam um rendimento bastante elevado. São utilizados nos veículos de propulsão elétrica, como fonte de armazenamento de energia auxiliar ou também como amortecedores de energia elétrica, absorvendo os picos de carga existentes no sistema e prolongando o tempo de vida das baterias devido à menor utilização destas (Ehsani, 2005).

CAPÍTULO 4

Circuitos eletrônicos de potência para ligação bidirecional do EV á rede

Para ligação energética bidirecional entre um veículo e a rede existem vários circuitos eletrônicos de potência. Embora diferentes entre si, seguem normalmente a topologia indicada na figura 4.1, que compreende as seguintes componentes: filtro para componentes de frequência indesejada, retificação da corrente AC através do conversor AC-DC bidirecional e passagem para o nível de tensão do barramento DC do veículo através de um conversor DC-DC bidirecional. As fases indicadas anteriormente são as efetuadas aquando do carregamento da bateria do veículo. Para a passagem de energia das baterias para a rede o processo é invertido. Assim, através do conversor DC-DC bidirecional a tensão passa para o nível indicado para que possa ser ligado ao conversor DC-AC bidirecional. Este realiza o processo de inversão sendo que por fim a corrente AC passa pelo filtro para que seja suavizada e cumpra todos os requisitos de injeção de corrente na rede (Onar et al. 2010a).

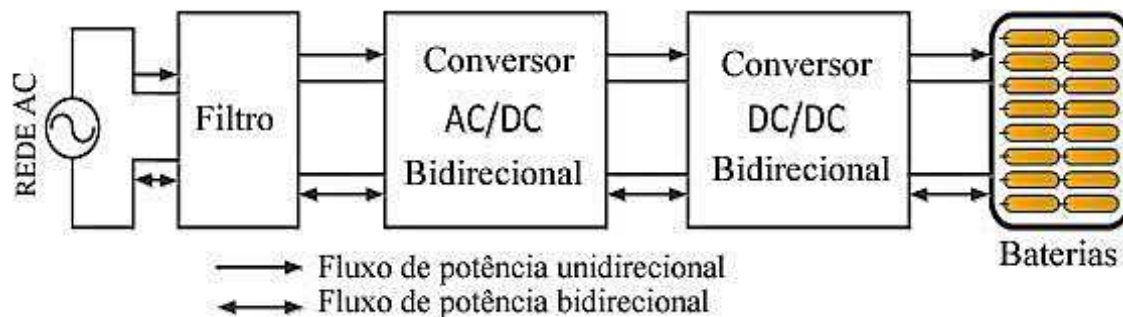


Figura 4.1 Topologia de ligação energética bidirecional

4.1 Os conversores AC-DC bidirecionais

Um conversor AC-DC bidirecional necessita ter um perfil adequado carga-descarga para transferir energia entre a bateria e a rede AC. Um conversor AC-DC com capacidade bidirecional para o fluxo de potência é apresentado na figura 4.2, onde P_{AC} é

definida como a potência ativa que a parte AC recebe e P_{DC} é definida como a energia que a parte DC recebe. O conversor funciona como um retificador quando a energia é transferida a partir da rede AC para fontes de corrente contínua ($P_{AC} < 0$ e $P_{DC} > 0$) e funciona como um inversor quando a energia é transferida a partir de fontes de corrente contínua para rede AC ($P_{AC} > 0$ e $P_{DC} < 0$) (Onar et al. 2010a).

Para realização do fluxo de potência bidirecional em conversores AC-DC, o interruptor de alimentação deve levar a corrente em ambos os sentidos. Geralmente esta meta é realizada com MOSFET (Metal Oxide Semiconductor-Field-Effect Transistor) ou IGBT (Insulated-gate bipolar transistor), em paralelo com um diodo.

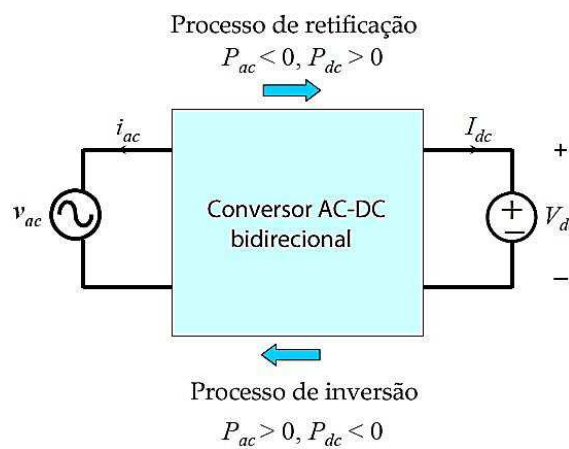


Figura 4.2 Ilustração de fluxo de potência bidirecional

De seguida são apresentadas algumas topologias para a cadeia de conversão monofásica bidirecional.

4.1.1 Conversor monofásico AC-DC meia ponte PWM

Este conversor é constituído por um indutor, uma resistência, dois condensadores e dois semicondutores de potência com diodos internos (Bor-Ren Lin et al.2001).

Para realizar a operação de carregamento das baterias, os interruptores T_1 e T_2 são deixados em aberto. A corrente flui assim somente pelos diodos sendo rectificadas. Quando a tensão AC é positiva, o diodo do interruptor T_1 conduz e o diodo do interruptor T_2 impede a passagem de corrente. É assim ligado o condensador C_1 á fonte AC. Quando a tensão AC é negativa acontece o oposto e o condensador C_2 é ligado á

fonte AC. A amplitude da tensão DC é aproximadamente a amplitude pico a pico da tensão AC (Bor-Ren Lin et al. 2001).

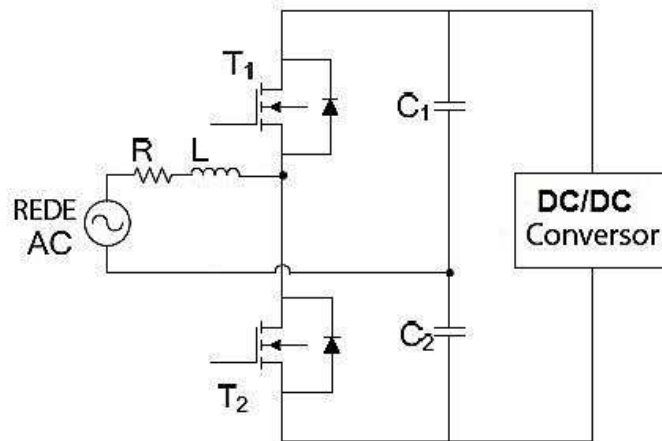


Figura 4.3. Conversor AC-DC meia ponte monofásico

Na operação de injeção de corrente na rede a corrente do lado DC é invertida. Nesta operação os interruptores T_1 e T_2 são comutados a partir de um controlo PWM assegurando-se que não estão em condução ao mesmo tempo. São assim conseguidos valores de tensão de $V_{DC}/2$ e $-V_{DC}/2$. Após a filtragem por parte do filtro LR, esta é aproximadamente sinusoidal e aceitável para injeção na rede (Bor-Ren Lin et al. 2001).

A vantagem da topologia em meia ponte está na simplicidade e no uso de um menor número de semicondutores quando comparado com outras topologias, resultando num menor custo de implementação. Contudo, apresenta desvantagens. Os semicondutores são submetidos a um grande stress e a corrente de saída possui um grande conteúdo harmónico sendo por isso necessário a inclusão de um filtro, resultando num aumento de custo para altas potências (Bor-Ren Lin et al.2001).

4.1.2 Conversor monofásico AC-DC ponte completa PWM

Este conversor na sua versão monofásica é constituído por um indutor uma resistência um condensador e quatro semicondutores com díodos internos (Bor-Ren Lin et al.2001), rearranjados como mostra a figura 4.4.

Para realizar a operação de carregamento das baterias, os interruptores T_1 , T_2 , T_3 e T_4 são deixados em aberto. A corrente flui assim somente pelos díodos sendo retificada. Quando a tensão AC é positiva, os díodos dos interruptores T_1 e T_4 conduzem

e os díodos dos interruptores T_2 e T_3 impedem a passagem de corrente, ligando em paralelo o condensador C á fonte AC. Quando a tensão AC é negativa, acontece o oposto e o condensador C é ligado em paralelo com a fonte AC, mas de forma invertida. A amplitude da tensão DC é aproximadamente a amplitude da tensão AC (Bor-Ren Lin et al. 2001).

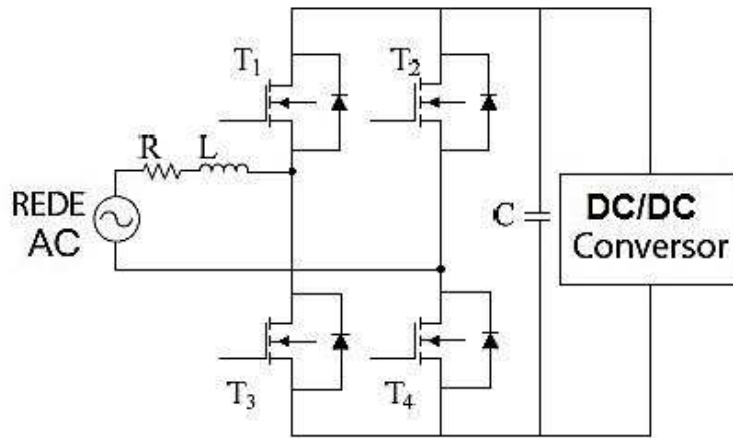


Figura 4.4 Conversor AC-DC ponte completa monofásica

Na operação de injeção de corrente na rede a corrente do lado DC é invertida. Nesta operação os interruptores T_1 e T_4 ou T_2 e T_3 são comutados permitindo assim obter valores de tensão de V_{DC} e $-V_{DC}$ respetivamente. O valor de tensão zero é conseguido através da comutação dos interruptores T_1 e T_2 ou T_3 e T_4 ao mesmo tempo. Assim, através de um controlo em PWM, a sequência certa de tensões é conseguida, sendo que após a filtragem por parte do filtro LR, esta é aproximadamente sinusoidal e aceitável para injeção na rede (Bor-Ren Lin et al. 2001).

As vantagens da topologia em ponte completa estão na utilização de apenas um condensador e no uso de mais dois semicondutores. Este último caso pode ser visto como vantagem uma vez que alivia o stress a que cada semicondutor está sujeito, diminuindo assim o seu custo.

As desvantagens apresentadas são: a apresentação de conteúdo harmónico sendo por isso necessário a inclusão de um filtro; a maior complexidade do controlo PWM e o facto da tensão do barramento DC ter de ser o dobro em relação ao conversor de meia ponte (Bor-Ren Lin et al. 2001).

4.1.3 Conversor monofásico bidirecional AC-DC multinível

Encontrados em diversas aplicações, principalmente na tração de comboios de alta velocidade e facto de terem poucos harmónicos de corrente na entrada, reduzidos requisitos dos semicondutores, capacidade de comutação à frequência fundamental e também a frequências PWM mais elevadas, são cada vez mais aplicados a sistemas de carga de baterias presentes nos EV (Bor-Ren et al. 2001).

Este conversor na sua versão monofásica é constituído por um indutor uma resistência dois condensadores, seis semicondutores de potência com díodos internos e dois díodos rearranjados, (Bor-Ren et al. 2001) como mostra figura 4.5.

Para realizar a operação de carregamento das baterias, todos os interruptores são deixados em aberto, a corrente flui assim somente pelos díodos sendo retificada, quando a tensão AC é positiva o diodo dos interruptores T_1 e T_3 e T_6 conduz é assim ligado o condensador C_1 á fonte AC , quando a tensão AC é negativa acontece o oposto e o condensador C_2 é ligado á fonte AC. A amplitude da tensão DC é aproximadamente a amplitude da tensão AC (Bor-Ren Lin et al. 2001).

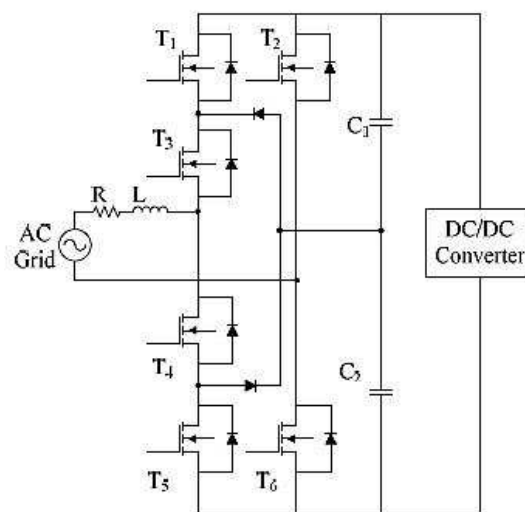


Figura 4.5 Conversor AC-DC de três níveis monofásicos

Na operação de injeção de corrente na rede a corrente do lado DC é invertida. Nesta operação os interruptores T_1 , T_3 e T_6 ou T_2 , T_4 e T_5 são comutados, permitindo obter valores de tensão de V_{DC} e $-V_{DC}$ respetivamente, quando os interruptores T_3 e T_6 ou T_2 e T_4 são comutados permitem obter valores de tensão de $V_{DC}/2$ e $-V_{DC}/2$ respetivamente, também é possível obter o valor de tensão zero, assim através de um

controlo em PWM a sequencia certa de tensões é conseguida sendo que após a filtragem por parte do filtro LR, esta é aproximadamente sinusoidal e aceitável para injeção na rede (Bor-Ren Lin et al. 2001).

4.2 Os conversores DC-DC bidirecionais

Os conversores DC-DC têm por objetivo ajustar um determinado nível de tensão DC num outro, superior ou inferior ao seu valor inicial, sendo igualmente utilizado para controlo/regulação de corrente.

Nos veículos híbridos o conversor DC/DC tem como objectivo converter tensões elevadas provenientes da fonte de energia principal (200-300V) para tensões mais baixas (14-42 V) para alimentar circuitos electrónicos, ou para tensões ainda mais altas (400-600V) para alimentar os motores eléctricos (Han e Divan, 2008).

Há diferentes tipos de conversores DC/DC, com diversos tipos de aplicações.

A distinção mais importante encontra-se no tipo de isolamento. O conversor com isolamento cumpre acima de tudo 2 papéis: isolamento galvânico por questões de segurança e “aumento” da relação entre tensão de saída e tensão de entrada, beneficiando da relação de transformação do transformador de alta frequência usado.

As principais topologias são: buck, buck-boost, cúk, SEPIC e charge pump.

4.2.1 Conversor DC-DC com ponte dupla ativa

Este conversor consiste em duas pontes completas ligadas por um transformador e duas bobinas, como mostra a figura 4.6 (Onar et al. 2010a).

Para realizar a operação de carregamento das baterias, a ponte do lado esquerdo atua como um inversor, enquanto a do lado direito atua como um retificador, a razão de transformação do transformador é definida dependendo dos níveis de tensão do pack de baterias e da saída do conversor AC/DC. Na operação de injeção de corrente na rede, o processo é invertido, a ponte do lado direito atua como inversor enquanto a do lado esquerdo atua como retificador. O transformador a usar é de tamanho reduzido devido ao uso de frequências elevadas nos inversores (Han e Divan, 2008).

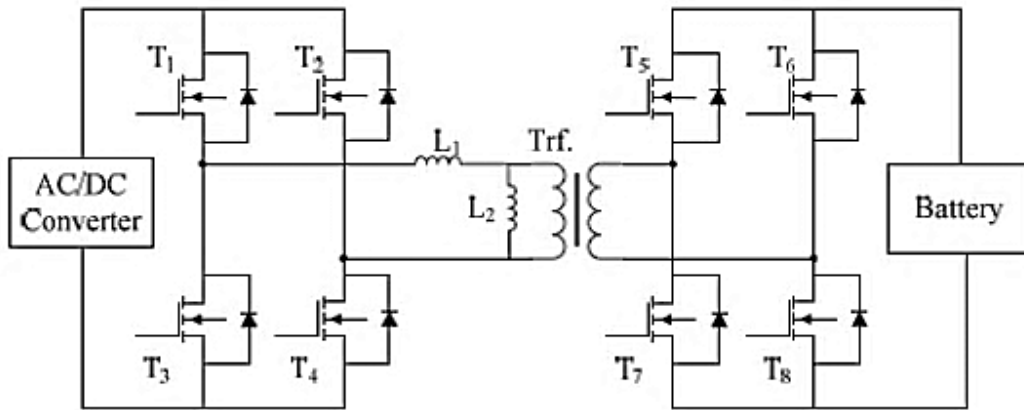


Figura 4.6 Conversor DC-DC ponte dupla ativa

As desvantagens deste conversor estão no elevado custo devido ao número de semicondutores e também no stress a que os componentes estão sujeitos, que é elevado quando a relação de transformação excede 2:1 entre entrada e saída de cada ponte isolada. As vantagens são: a grande densidade de potência e o controlo rápido (Han e Divan, 2008).

4.2.2 Conversor DC-DC (buck-boost) dois quadrantes

Este conversor é constituído por dois indutores um condensador e dois interruptores com díodos internos como mostra a figura 4.7. (Bojrup et al. 2014)

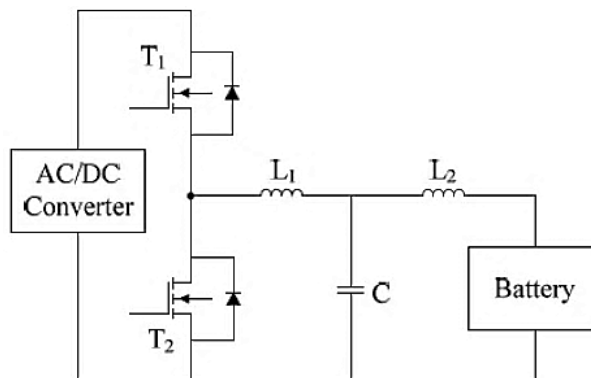


Figura 4.7 Conversor DC-DC (abaixador-elevador) dois quadrantes

Na operação de carregamento das baterias, o conversor funciona como abaixador, neste modo T_2 é deixado em aberto enquanto T_1 é ligado e desligado por intermedio de um sinal de controlo PWM. A taxa de redução de tensão varia com o "duty cycle" do PWM. Assim, se este valer 100% a razão entre entrada e saída é de 1:1. Se for 50% a tensão será 1:0,5 e assim sucessivamente. Na operação de injeção de

corrente na rede, o conversor funciona como elevador. Neste modo T_1 é deixado em aberto enquanto T_2 é ligado e desligado por intermédio de um sinal de controlo PWM, a tensão é elevada pelo fator de $1/(1-D)$ em que D representa o "duty cycle" do PWM (Bojrup et al. 2014).

As desvantagens deste conversor poderão estar nas correntes elevadas a que os componentes podem ser sujeitos, quando comparado com o circuito anterior, o que tende a elevar o seu custo. A vantagem é a utilização de menos componentes e portanto também numa maior simplicidade de controlo. Este tipo de conversor é utilizado em variadas aplicações, como por exemplo, em sistemas elétricos do automóvel.

4.3 Técnicas para controlo dos inversores monofásicos

O desenvolvimento de dispositivos semicondutores de potência de melhor desempenho (transístores bipolares de potência, IGBT, MOSFET, etc.) tem resultado na diminuição da complexidade dos esquemas de controlo.

O controlo destes elementos implica estabelecer os momentos da comutação entre estados de condução/ bloqueio. Uma consequência do modo discreto de funcionamento dos elementos comandados de um inversor, é a distorção das formas de onda de tensão e corrente na entrada e saída, afastando-se da forma sinusoidal. A atenuação dessas oscilações pode ser conseguida por meio de filtros de grandes dimensões e de custo bastante elevado. Para minimizar essas deficiências formam desenvolvidas técnicas mais complexas de controlo, através da modulação da largura de impulso (PWM).

Para a modulação ser obtida é necessário o estabelecimento das seguintes grandezas (Rashid, 1999):

- Sinal de Referência: define a forma pretendida para a saída de um conversor;
- Sinal de Portadora: É um sinal de alta frequência, na ordem de kHz, responsável pela definição da frequência de comutação e pela razão cíclica;
- Modulador: é o circuito responsável por comparar o sinal de referência com a portadora.

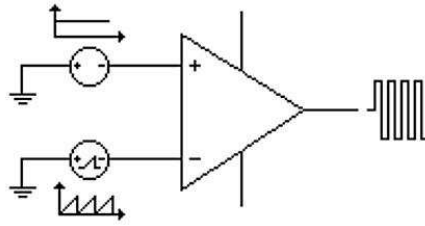


Figura 4.8 Exemplo de circuito modulador

- Geração de Sinal Complementar: é um sinal complementar, necessário quando, por exemplo, existem dois interruptores (semicondutores) configurados em braço e o acionamento dos interruptores é realizado de forma complementar.
- Tempo Morto: é medido desde o instante em que um semicondutor comuta para o seu estado bloqueado até ao instante em que o semicondutor oposto comuta para o seu estado de condução, garantindo o bom funcionamento e segurança do acionamento.

As técnicas normalmente usadas em controlo de tensão/frequência constante, para inversores são (Rashid, 1999):

1. Modulação por largura de impulso único;
2. Modulação por largura de impulsos múltiplos;
3. Modulação por largura de impulso sinusoidal;
4. Modulação por largura de impulso sinusoidal modificada;
5. Controle por deslocamento de fase.

4.3.1 Modulação por largura de impulso único

Neste tipo de modulação existe somente um impulso por semiciclo e a sua largura é variada para controlar a tensão de saída do inversor. A figura 4.9 mostra a geração dos sinais de comando e a tensão de saída do inversor monofásico em ponte completa (Rashid, 1999).

Os sinais de comando são gerados por comparação de um sinal de referência retangular de amplitude A_r com uma onda portadora triangular de amplitude A_c . A frequência fundamental da tensão de saída é determinada da frequência do sinal de referência (Rashid, 1999).

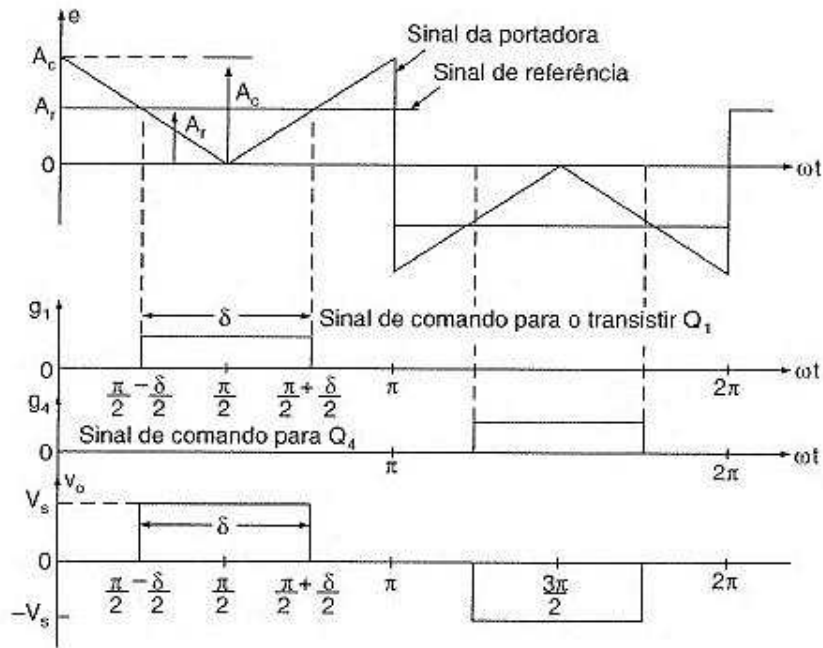


Figura 4.9 Modulação por largura de impulso único (Rashid, 1999).

4.3.2 Modulação por largura de múltiplos impulsos

A geração dos sinais de comando para ligar e desligar os semicondutores, como mostra a figura 4.10 a), é feita por comparação de um sinal de referência com uma onda portadora triangular.

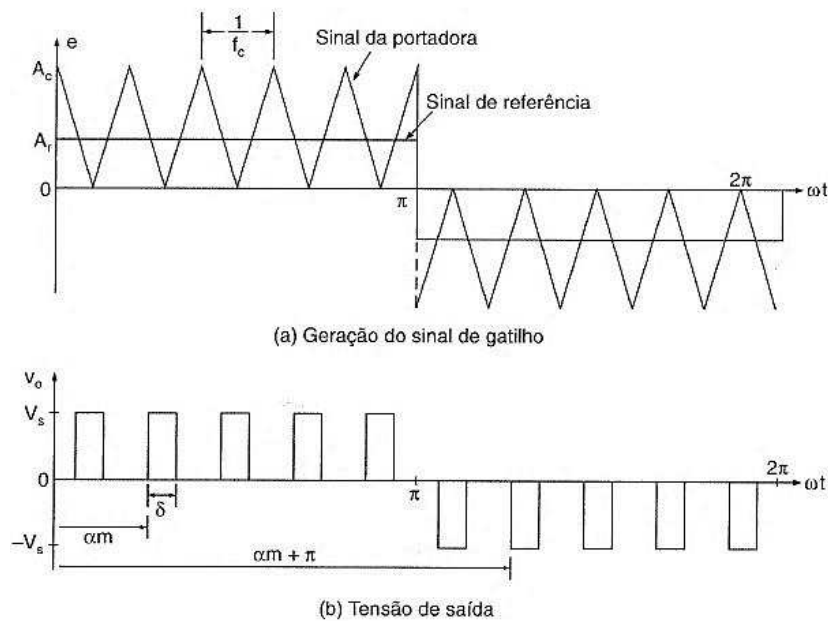


Figura 4.10 Modulação por largura de múltiplos impulsos (Rashid, 1999).

A frequência do sinal de referência estabelece a frequência da saída, f_0 , e a frequência da portadora, f_c , determina o número de impulsos por semiciclo, p . Desta maneira pelo uso de muitos impulsos em cada semiciclo realiza-se uma redução do conteúdo harmónico. O índice de modulação controla a tensão de saída (Rashid, 1999).

4.3.3 Modulação por largura de impulsos sinusoidal – SPWM

Neste tipo de modulação a largura dos pulsos é variada em proporção a uma onda sinusoidal analisada no centro do mesmo impulso. O fator de distorção harmónica é reduzido em relação a outros tipos de modulação como a PWM unipolar e a UPWM. O sinal de comando é gerado por comparação de uma onda sinusoidal com uma onda triangular (Rashid, 1999), como mostra a figura 4.11.

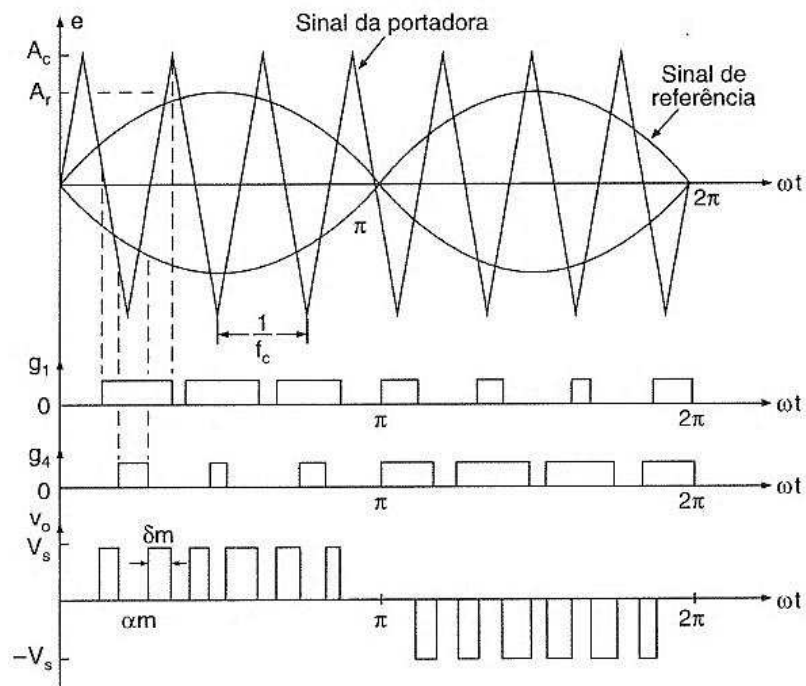


Figura 4.11 Modulação por largura de impulsos sinusoidal – SPWM (Rashid, 1999).

A frequência do sinal de referência determina a frequência de saída do inversor enquanto a sua amplitude máxima controla o índice de modulação que por sua vez controla a tensão eficaz de saída. O número de impulsos por semicírculo depende da frequência da portadora.

4.3.4 Modulação por largura de impulsos sinusoidal modificada

Como na modulação apresentada anteriormente, SPWM, a largura dos impulsos que são mais próximos do valor máximo de uma senoide não mudam significativamente com a variação do índice de modulação, esta técnica pode ser modificada tal que a onda portadora seja aplicada durante o primeiro e ultimo intervalos por semicírculo como mostra a figura 4.12, por exemplo, 0° a 60° e 120° a 180° . A este tipo de modulação damos o nome de modulação por largura de pulsos sinusoidal modificada MSPWM. Com este método e em relação ao anterior, a componente fundamental é aumentada e as características harmônicas melhoradas. Também são diminuídos o número de comutações dos semicondutores e portanto as perdas de comutação (Rashid, 1999).

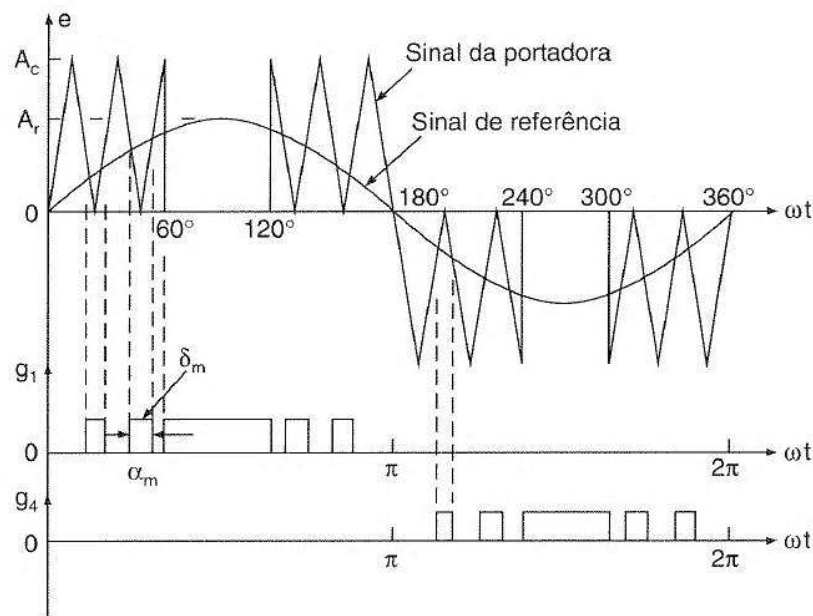


Figura 4.12 Modulação por largura de impulsos sinusoidal modificada (Rashid, 1999).

4.3.5 Controle por deslocamento de fase

Um inversor monofásico em ponte completa pode ser percebido como a adição de dois inversores de meia ponte. Um defasamento de 180° produz uma tensão de saída, como mostra a figura 4.13 c), enquanto um ângulo de atraso β produz uma saída, como mostra a figura 4.14 e) (Rashid, 1999).

Este tipo de controle é especificamente útil para aplicações de alta potência, requerendo um grande número de transístores em paralelo.

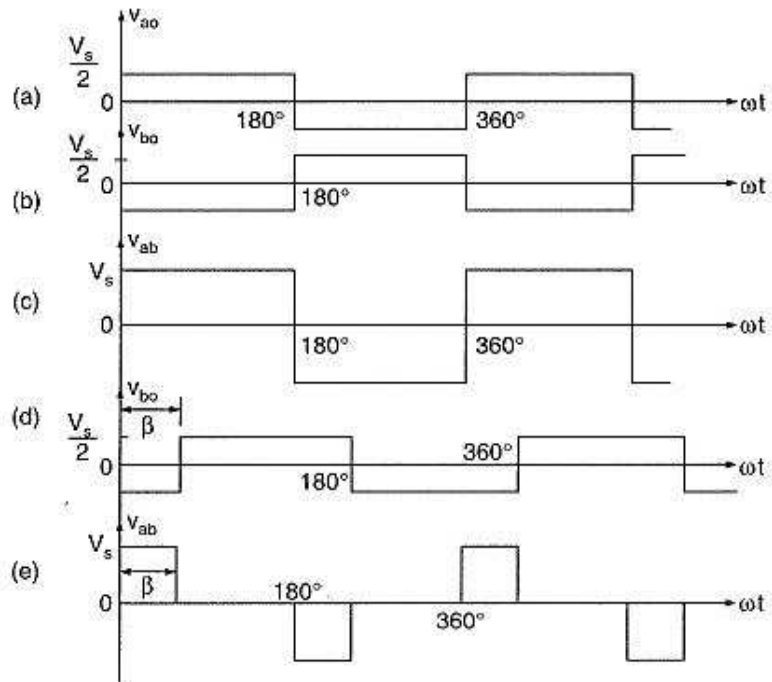


Figura 4.13 Controle por deslocamento de fase (Rashid, 1999).

Há porém outras técnicas de controlo avançadas que apresentam um melhor desempenho quando comparadas com a SPWM, nomeadamente (Rashid, 1999):

4.3.6 Modelação trapezoidal

Nesta técnica os sinais de comando são gerados por comparação de uma onda triangular com uma onda modulante trapezoidal (Rashid, 1999), como mostra a figura 4.14. Este tipo de modulação contém harmónicos de baixa ordem.

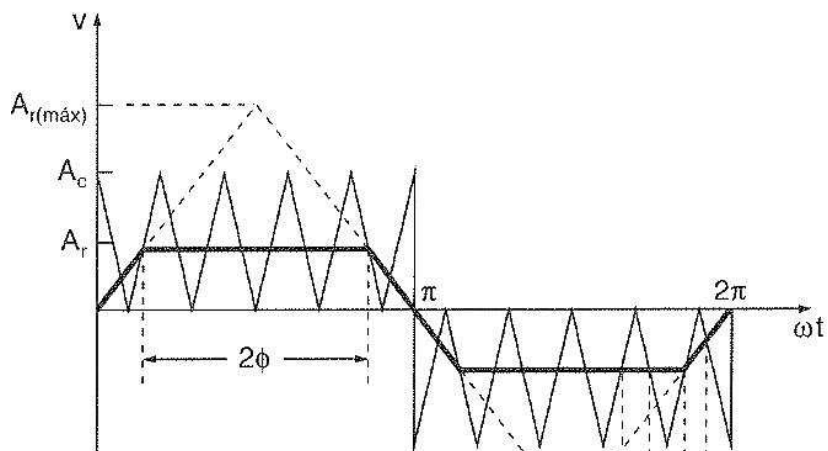


Figura 4.14 Modelação trapezoidal (Rashid, 1999).

4.3.7 Modulação em escada

Nesta técnica a onda modulante tem o formato de escada como mostra a figura 4.15. Os níveis dos patamares são calculados para eliminar determinados harmônicos, fornecendo alta qualidade da tensão de saída (Rashid, 1999).

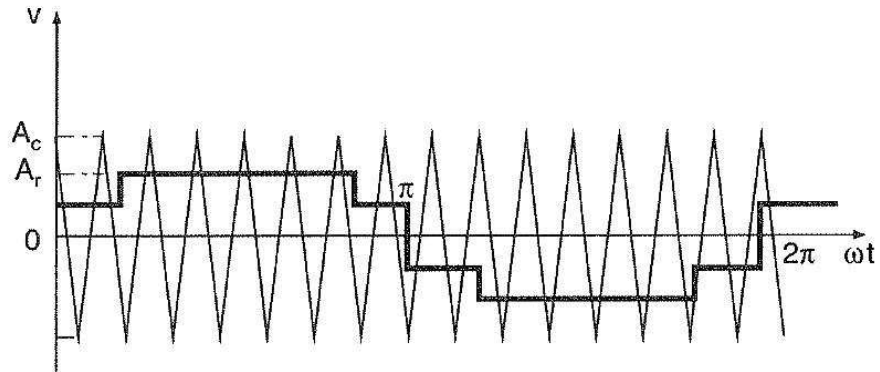


Figura 4.15 Modulação em escada (Rashid, 1999).

4.3.8 Modulação degrau

Nesta técnica a onda modulante tem o formato de degrau como mostra a figura 4.16, esta onda não é uma amostra de uma onda sinusoidal, é dividida em intervalos específicos e cada um deles é controlado individualmente para controlar a componente fundamental e para eliminar determinados harmônicos. Esta técnica fornece baixa distorção (Rashid, 1999).

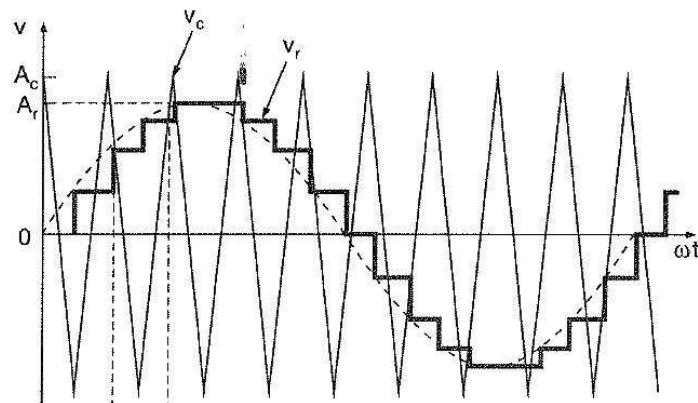


Figura 4.16 Modulação degrau (Rashid, 1999).

4.3.9 Modulação por injeção de harmónicos

Nesta técnica o sinal modulante é gerado por injeção de harmónicos seleccionados para a onda sinusoidal como mostra a figura 4.17. Com esta técnica o período no estado, ligado dos semicondutores é menor quando comparado com as outras técnicas (Rashid, 1999).

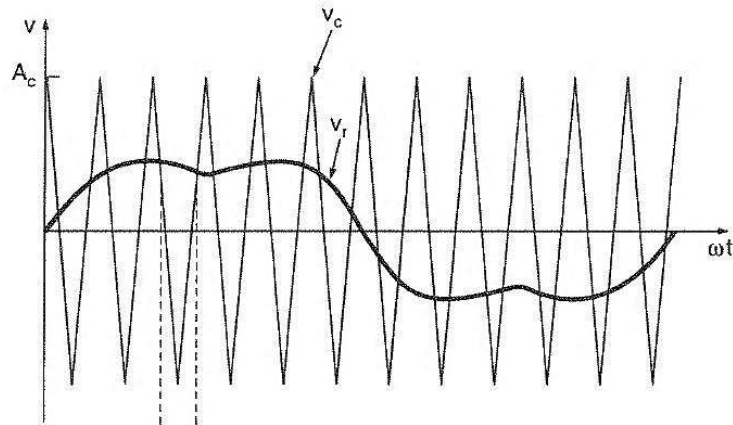


Figura 4.17 Modulação por injeção de harmónicos (Rashid, 1999).

CAPÍTULO 5

Circuitos propostos para o sistema de carga bidirecional

O quinto capítulo tem por objetivo mostrar o estudo realizado sobre dois modelos de sistemas de conversão de potência, nomeadamente, o conversor bidirecional AC-DC multinível e o conversor bidirecional AC-DC de ponte completa.

Ambos os conversores funcionarão em parceria com o conversor DC-DC Buck-Boost de 2 quadrantes.

5.1 Topologias e modos de funcionamento

5.1.1 Conversor bidirecional AC-DC de ponte completa

A primeira proposta de sistema de carga bidirecional é composta por conversor ponte completa AC-DC no lado esquerdo e um conversor DC-DC Buck-Boost à direita, como mostra a figura 5.1.

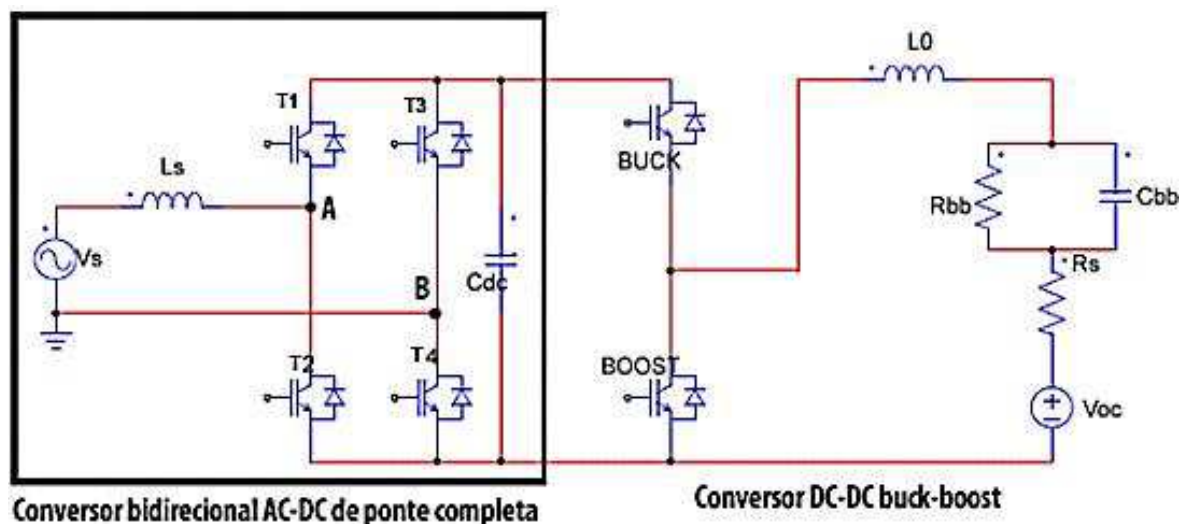


Figura 5.1 A primeira proposta para o sistema de conversão de potência

O circuito do conversor ponte completa AC-DC é composto pela bobina de entrada que tem por objetivo assegurar o nível de potência do barramento DC, por 4

interruptores controlados (e respectivos díodos internos), e por 1 condensador (Verma et al.2011).

No modo de carga, os interruptores $T_1 - T_4$ encontram-se em aberto e os respectivos díodos internos funcionam como um retificador de ponte completa. Ao longo do semiciclo positivo da rede os díodos internos de T1 e T2 conduzem. Por outro lado, durante o semiciclo negativo da rede são os díodos internos de T3 e T4 que entram em condução (Verma et al. 2011).

No modo de descarga a estratégia de controlo do conversor AC-DC ponte completa bidirecional, utiliza a esquema de comutação unipolar em que a onda portadora de forma triangular é comparado com dois sinais de referência, um sinal positivo e outro negativo (Verma et al. 2011).

5.1.1.1 Controlo do conversor bidirecional AC-DC de ponte completa

O sinal de erro proveniente da diferença entre o valor de tensão desejado no barramento DC (V_{ref}) e a tensão real que se regista no referido barramento (V_{DC}) dá entrada no bloco PI para controlo da tensão, obtendo-se na sua saída um sinal de referência que é multiplicado pelo valor absoluto da tensão da rede. Determina-se assim o nível de tensão necessário e obtém-se também a referência de corrente.

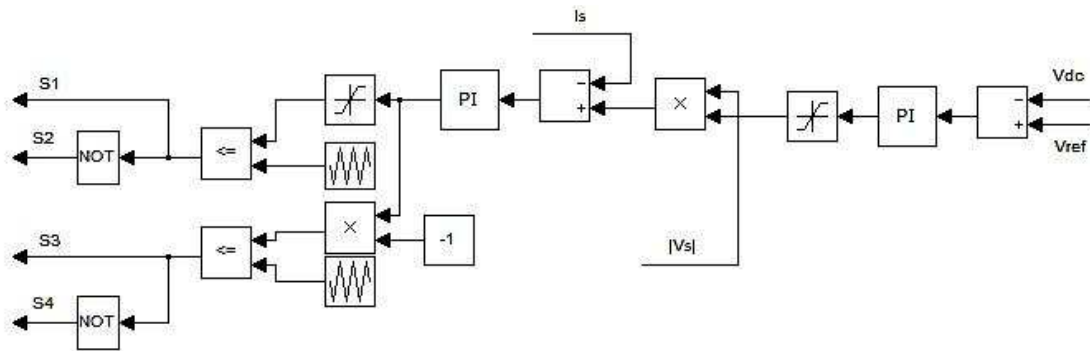


Figura 5.2 Malha de controlo do conversor bidirecional ponte completa

A diferença entre este último sinal e o sinal de corrente fornecido pelo sensor de corrente da rede origina um novo sinal de erro entregue a um segundo bloco PI para controlo da corrente. O sinal da saída deste PI é dividido num sinal positivo (para o semiciclo positivo) e outro negativo (para o semiciclo negativo) e cada um é comparado com um sinal triangular de frequência fixa de 10kHz. A tensão de saída varia entre 0 e V_{DC} ou entre 0 e $-V_{DC}$ (Verma et al. 2011).

5.1.2 Conversor bidirecional AC-DC multinível

A segunda proposta de sistema de carga bidirecional é composta de um conversor multinível AC-DC no lado esquerdo e um conversor DC-DC Buck-Boost à direita, como mostra a figura 5.3.

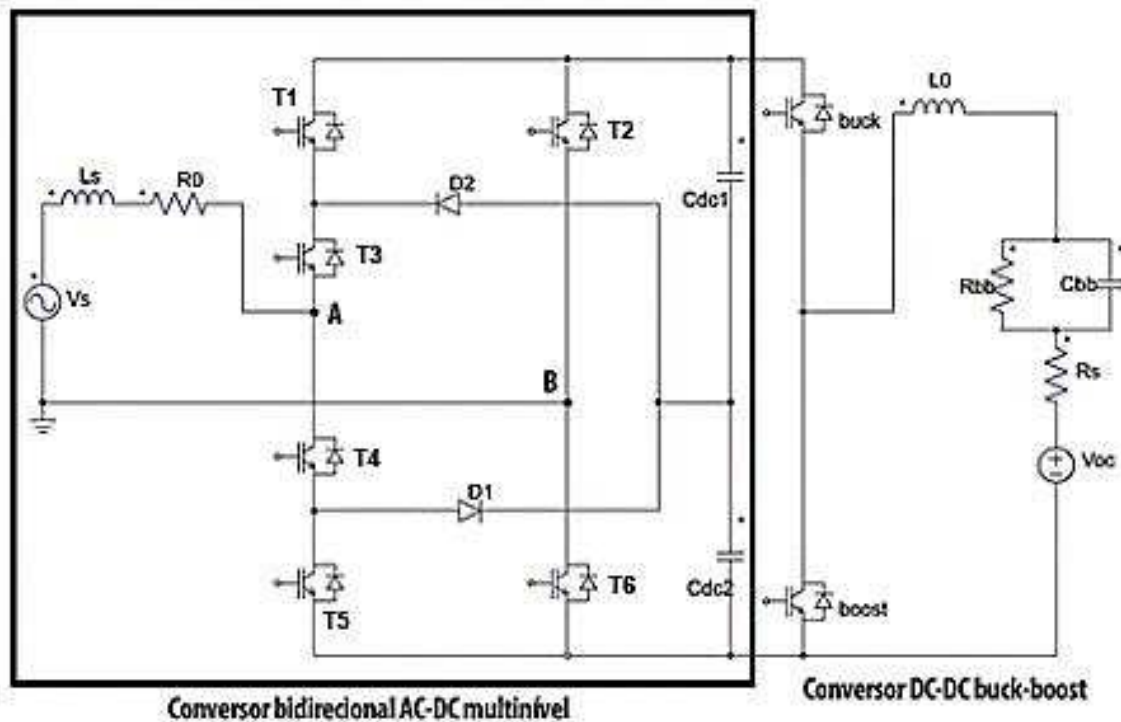


Figura 5.3 A segunda proposta de sistema de carga bidirecional

A topologia do conversor multinível AC-DC é composta pela bobina de entrada e respectiva resistência interna, por 6 interruptores controlados (e respectivos díodos internos), 2 díodos independentes e por 2 condensadores de valores iguais que fazem parte do barramento DC.

No modo de carga, os interruptores $T_1 - T_6$ encontram-se em aberto e os respectivos díodos internos funcionam como um retificador ponte completa. Ao longo do semiciclo positivo da rede são os díodos internos de T_1, T_3 e T_6 entram em condução enquanto durante o semiciclo negativo da rede os díodos internos de T_2, T_4 e T_5 que entram em condução (Onar et al. 2010).

No modo de descarga, consoante a estratégia de controlo aplicada, é possível comutar os 6 interruptores através de 6 modos de comutação possíveis ou seja, 3 formas distintas por cada semiciclo da tensão de entrada (Onar et al. 2010).

No modo 1 de comutação AC-DC (figura 5.4), os interruptores T_1, T_3 e T_6 estão ligados a tensão V_{DC} é aplicada através de L_1, R_1 . Desta forma, tanto C_1 e C_2 são carregadas ou descarregadas no mesmo tempo enquanto a corrente entregue ou fornecida pela rede diminui devido à tensão negativa aplicada aos terminais de L_1 (Onar et al. 2010).

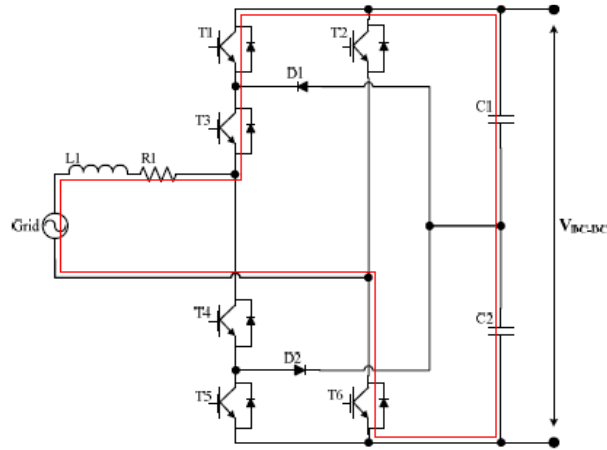


Figura 5.4 Modo 1 AC-DC (Onar et al. 2010).

No modo 2 de comutação AC-DC (figura 5.5) aplica-se uma tensão $-V_{DC}$ através de L_1, R_1 e da rede para carregar ou descarregar os C_1 e C_2 , no mesmo tempo.

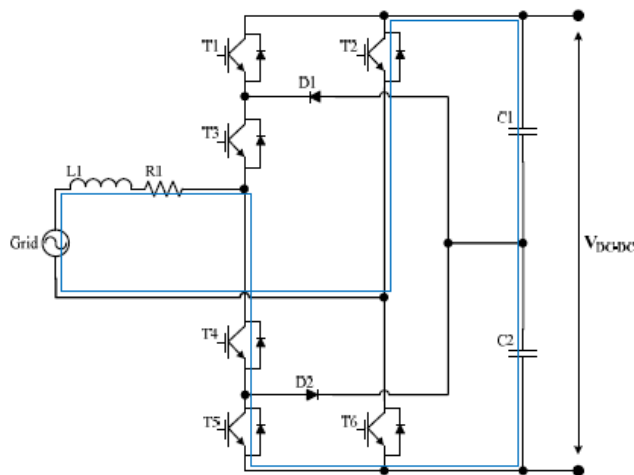


Figura 5.5 Modo 2 AC-DC (Onar et al. 2010).

Por outras palavras, o modo 2 funciona como o modo 1, mas para tensões da rede negativas em vez de tensões positivas (Onar et al. 2010).

Durante o modo 3 de comutação AC-DC (figura 5.6), a tensão V_{C2} é aplicada através R_1, L_1 e da rede comutando os interruptores T_3, T_4 e T_6 para posição ON. Dado que C_1 e C_2 são idênticos, a tensão no nó intermedio é cerca de metade da V_{DC} .

A corrente entregue à rede aumenta ou diminui consoante a relação entre V_{Rede} e V_{C2} (Onar et al.2010).

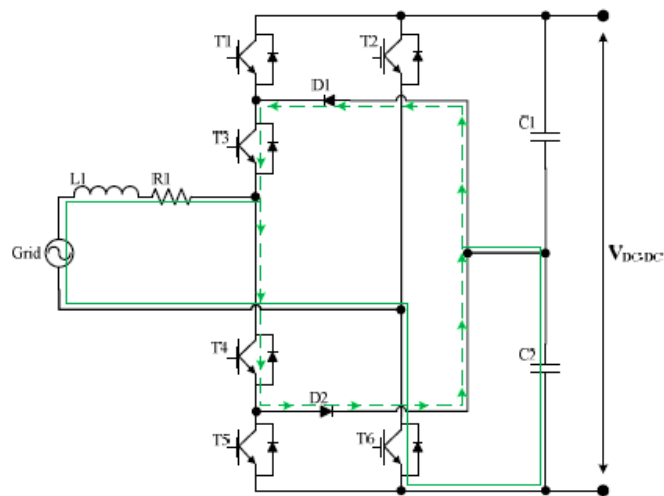


Figura 5.6 Modo 3 AC-DC (Onar et al. 2010)

No modo 4 AC-DC (figura 5.7) comuta-se os interruptores T_2, T_3 e T_4 o que corresponde a aplicar uma tensão $-V_{C2}$ através de R_1, L_1 e da rede. A corrente entregue à rede aumenta ou diminui consoante a relação entre V_{Rede} e V_{C1} (Onar et al. 2010).

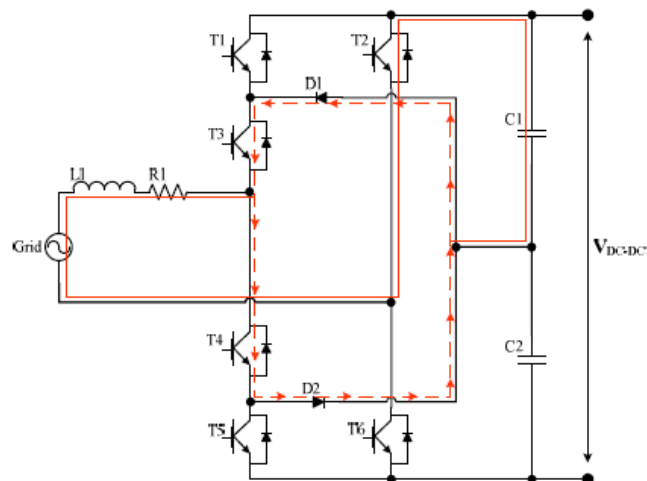


Figura 5.7 Modo 4 AC-DC (Onar et al. 2010)

No modos 5 e 6 AC-DC (figura 5.8 e figura 5.9), comutam-se os interruptores T_1, T_2 e T_3 ou T_4, T_5 e T_6 . Em ambos modos a tensão entre os pontos A e B é de 0V resultando num aumento ou diminuição da corrente recebida ou fornecida pela rede, dependendo do valor de tensão da mesma (Onar et al. 2010).

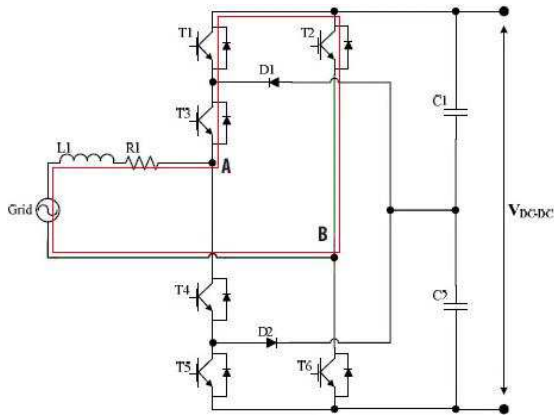


Figura 5.8 Modo 5 AC-DC

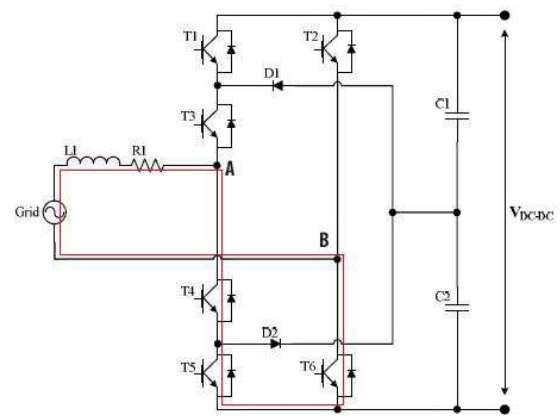


Figura 5.9 Modo 6 AC-DC

5.1.2.1 Controlo do conversor bidirecional AC-DC multinível

O controlo sugerido para este conversor baseia-se na geração de 3 sinais X, Y, Z de valor booleano, sinais necessários na realização dos 6 modos de operação pela comutação dos T1-T6 (Onar et al. 2010).

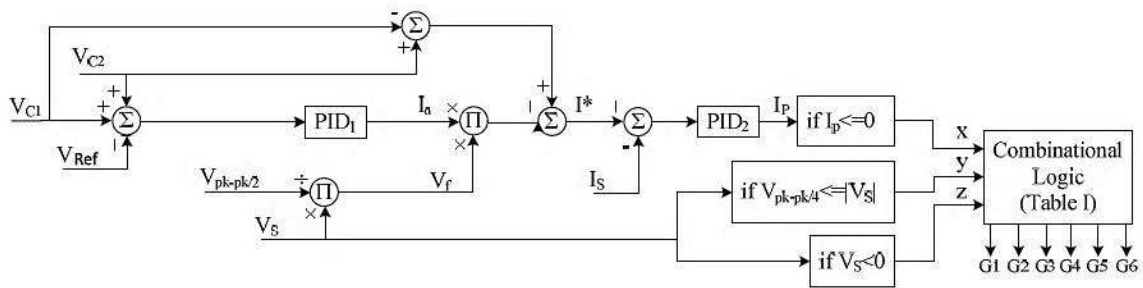


Figura 5.10 Malha de controlo do conversor bidirecional multinível.

O sinal X respeita a equação 5.1 (Onar et al. 2010):

$$[V_{REF} - (V_{C1} + V_{C2})] * \frac{V_s}{V_{PP}/2} - (V_{C2} + V_{C1}) - I_s \leq 0 \quad (5.1)$$

A diferença entre o valor da tensão desejada no barramento DC (V_{REF}) e a tensão real que se regista no referido barramento ($V_{C1} + V_{C2}$) corresponde a um sinal de erro que vai ser a entrada para o bloco PID1.

O sinal obtido na saída deste bloco é multiplicado por um sinal de amplitude unitária e com a mesma frequência da tensão de entrada. A diferença entre o resultado desta multiplicação e o desequilíbrio das tensões nos condensadores do barramento DC ($V_{C2} - V_{C1}$), corresponde à referência de corrente, agora com forma sinusoidal. Neste ponto é possível também controlar o desfaseamento entre o valor de tensão e corrente da rede.

A diferença entre esta referência e a corrente da rede, medida através de um sensor corresponde a um novo sinal de erro entregue a um segundo PID, resultando num valor booleano, designado por X.

O sinal Y respeita à equação (5.2), (Onar et al. 2010):

$$\frac{V_{pp}}{4} \leq |V_s| \quad (5.2)$$

Esta equação corresponde à necessidade de comparar a amplitude da tensão da rede com ¼ do valor pico-a-pico pré-definido.

O sinal Z respeita a equação seguinte (Onar et al. 2010):

$$V_s < 0 \quad (5.3)$$

Paralelamente com a geração dos sinais booleanos X e Y é gerado um terceiro sinal Z que estabelece em que semiciclo em que se encontra o sinal de tensão da rede V_s .

As combinações possíveis entre os sinais X,Y e Z são apresentados na tabela 5.1 (Bor-Ren Lin et al. 2001):

x	y	z	Mode	Voltage
0	0	0	6	0
0	0	1	3	$(V_{DC-DC})/2$
0	1	0	3	$(V_{DC-DC})/2$
0	1	1	1	V_{DC-DC}
1	0	0	4	$-(V_{DC-DC})/2$
1	0	1	5	0
1	1	0	2	$-V_{DC-DC}$
1	1	1	4	$-(V_{DC-DC})/2$

Tabela 5.1. Modos de operação para o conversor AC-DC multinível.

A tabela seguinte apresenta os padrões de comutação que permitem obter os diversos níveis de tensão característicos dos conversores multinível e os respetivos níveis de tensão associados (Bor-Ren Lin et al. 2001):

Mode	G1	G2	G3	G4	G5	G6	Voltage
1	1	0	1	0	0	1	V_{DC-DC}
2	0	1	0	1	1	0	$-V_{DC-DC}$
3	0	0	1	1	0	1	$(V_{DC-DC})/2$
4	0	1	1	1	0	0	$-(V_{DC-DC})/2$
5	1	1	1	0	0	0	0
6	0	0	0	1	1	1	0

Tabela 5.2. Padrões de comutação para os diversos modos de operação.

5.1.3 Conversor DC-DC buck-boost

A utilização do mesmo conversor em parceria com o conversor bidirecional AC-DC multinível ou com o conversor bidirecional AC-DC ponte completa é motivada pela vantagem deste circuito nomeadamente na facilidade de realizar o seu controlo, fazendo dele uma solução muito pertinente, de baixo custo e com uma concepção bastante compacta.

Os conversores DC-DC têm por objetivo ajustar um determinado nível de tensão DC num outro, superior ou inferior ao seu valor inicial, sendo igualmente utilizado para controlo/regulação de corrente. Este caso particular combina as funções de um conversor elevador (Boost mode) e de um conversor abaixador de tensão (Buck mode) utilizando neste caso uma técnica de controlo de PWM. Quando se desejar efetuar o trânsito de potência no sentido das baterias, ou seja carregá-las, o conversor funciona no modo Buck. Caso se deseje fornecer energia para a rede, este opera no modo Boost. Na figura 5.11 exibe-se o circuito do conversor DC-DC selecionado (Verma et al. 2011).

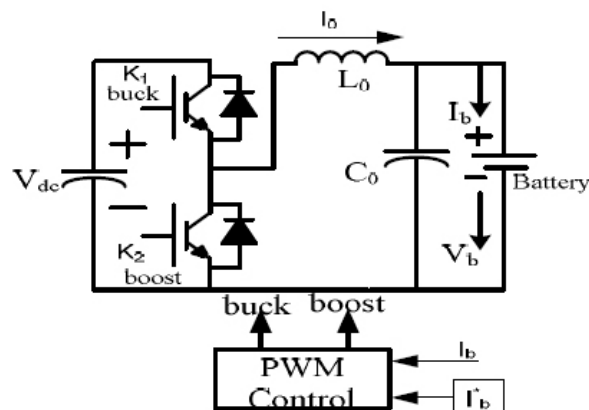


Figura 5.11 Conversor DC-DC Buck-Boost (Verma et al. 2011).

5.1.3.1 Controlo do conversor Buck-Boost

O sinal de erro proveniente da diferença entre o valor de corrente desejado (I_{ref}) e a corrente real que se regista nos terminais do *pack* de baterias (I_{bat}) dá entrada no bloco PI utilizado para controlar a corrente. Na saída do PI obtém-se um sinal de referência que vai ser comparada com uma onda portadora de característica triangular, posteriormente direcionado para o interruptor controlado correspondente ao modo buck (Verma et al. 2011).

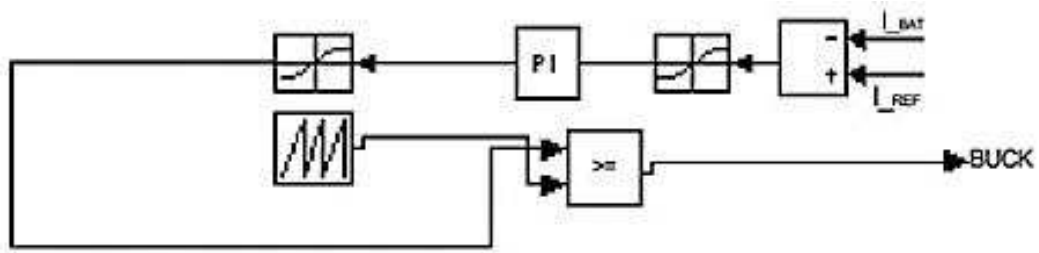


Figura 5.12 Malha de controlo do conversor Buck-Boost: modo de carga
(Verma et al. 2011).

No modo de descarga, a malha de controlo segue a mesma lógica, diferindo apenas a forma de onda portadora de característica triangular.

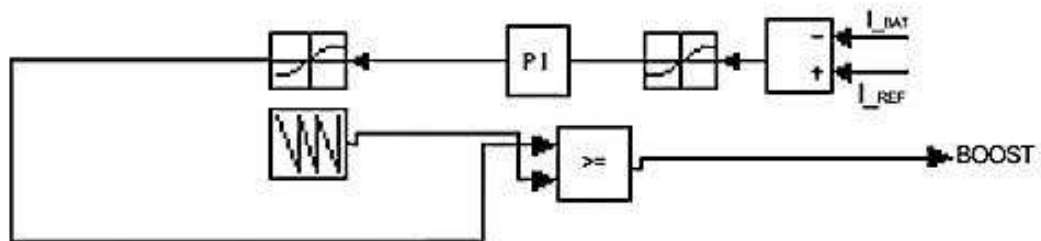


Figura 5.13 Malha de controlo do conversor Buck-Boost: modo de descarga
(Verma et al.2011).

5.2 Análise matemática do funcionamento dos conversores

O trânsito de potência da rede para as baterias corresponde ao modo de carga, denominando-se o inverso por descarga. A tensão originária da rede apresenta uma característica sinusoidal e pode ser representada segundo a equação (5.4).

$$V_s(t) = \sqrt{2} \times V_s \times \sin(\omega t) \quad (5.4)$$

Na equação anterior, $v_s(t)$ corresponde ao valor instantâneo da tensão da rede e V_s ao respetivo valor eficaz.

A componente fundamental da tensão no conversor AC é dada por equação (5.5):

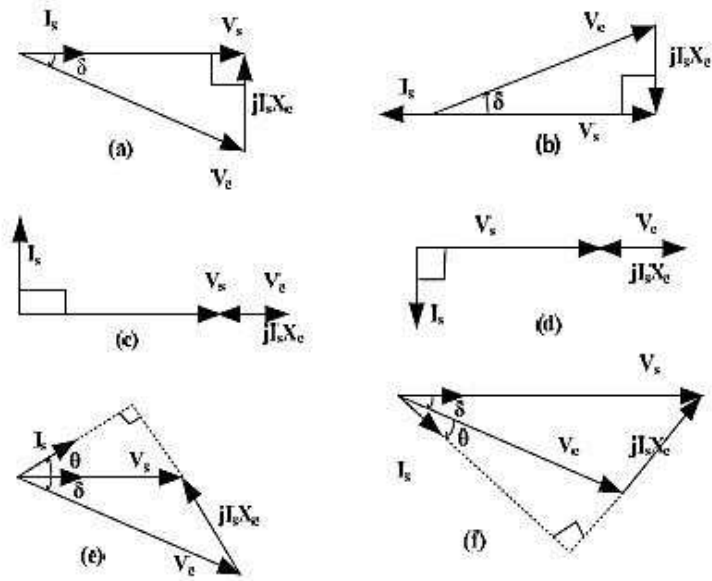
$$v_c(t) = \sqrt{2} \times V_c \times \sin(\omega t - \delta) \quad (5.5)$$

Na equação anterior, o V_c corresponde ao valor eficaz da componente fundamental relativa à tensão do conversor, $v_c(t)$ e δ é o ângulo entre V_s e V_c .

O valor da corrente é dado pela equação (5.6):

$$i_s(t) = \sqrt{2} \times I_s \times \sin(\omega t - \theta) \quad (5.6)$$

Na equação 5.6 θ é o ângulo entre $i_s(t)$ e $v_c(t)$.



a) Modo de carga b) Modo de descarga c) Modo indutivo d) Modo capacitivo e) Modo carregamento e capacitivo f) Modo carregamento e indutivo

Figura 5.14 Diagrama de vetores para vários modos de operação:

Segundo (Kisacikoglu et al. 2010) é fornecida uma potência ativa ao conversor quando $v_c(t)$ se encontra desfasada de $v_s(t)$, figura 5.14a), ocorrendo o inverso quando $v_s(t)$ se desfasa de $v_c(t)$, figura 5.14b).

A direção do fluxo de potência reativa é determinada através do ângulo θ . Ou seja, se θ é positivo, a potência reativa é enviada para a rede, e se θ é negativo, a potência reativa é fornecida da rede para o conversor (Kisacikoglu et al. 2010).

Outros modos de operação, como indutivo e capacitivo, são mostrados nas figuras 5.14c)-f).

5.3 Dimensionamentos

Os dois circuitos propostos para simulação são constituídos por vários elementos passivos. Como tal é necessário realizar o adequado dimensionamento tendo em conta as características pretendidas para os protótipos. Além disso, é necessário seleccionar, justificadamente, os semicondutores que serão utilizados como interruptores controlados.

5.3.1 Elementos passivos do conversor bidirecional AC-DC de ponte completa

O conversor bidirecional AC-DC é composto pela bobina de ligação do conversor à rede, que tem por objetivo assegurar o nível de potência do barramento DC, e por um condensador.

Para o circuito em questão são consideradas as condições da tabela 5.3.

Parâmetro	Valor
Potência nominal, P	3kW
Tensão da rede, V_s	230V
Frequência da rede, f	50Hz
Frequência de comutação, f_{sw}	20kHz

Tabela 5.3 Discriminação de valores associados para simulação do conversor bidirecional AC-DC de ponte completa

Para este conversor o índice de modulação, m , é de aproximadamente 0.9, $m = \frac{\sqrt{2} * V_s}{V_{DC}}$, e tem impacto no dimensionamento da indutância de ligação à rede.

Dimensionamento da indutância

$$V_c = \frac{m * V_{dc}}{\sqrt{2}} = \frac{0.9 * 400}{\sqrt{2}} = 254.6 \text{ [V]} \quad (5.7)$$

A relação entre a componente fundamental, V_c , tensão da fonte de alimentação, V_s , o valor rms da corrente da rede, I_s e a reactância indutiva é representada pela relação 5.8 (Verma et al. 2011):

$$V_c = \sqrt{V_s^2 + (I_s^2 * X_l^2)} \quad (5.8)$$

O valor rms da corrente da rede obtém-se através de relação entre potência do conversor, P, e a tensão da rede:

$$I_s = \frac{P}{V_s} = \frac{3000}{230} = 13.04 \text{ [A]} \quad (5.9)$$

A reactância indutiva, X_l , pode-se expressar da seguinte forma:

$$\begin{cases} X_L = 2\pi fL \\ \omega = 2\pi f = 314 \text{ [radian/sec]} \end{cases} \quad (5.10)$$

Substituindo os valores obtidos da V_c , V_s , I_s e X_L na equação 5.8, obtemos o valor da indutância, L :

$$254.59 = \sqrt{230^2 + (13.04^2 * 314 * L^2)} \Rightarrow L \approx 3 \text{ [mH]} \quad (5.11)$$

Dimensionamento do condensador:

Conforme a figura 5.15 que apresenta a relação entre capacidade requerida e o ripple máximo no barramento DC, pode concluir-se que para conseguir um ripple inferior a 5%, torna-se necessário um aumento considerável do tamanho dos condensadores. Por esta razão, por norma, utiliza-se valores de ripple na ordem dos 5% a 10%, aceitando para dimensionamento de condensador o valor de 5%.

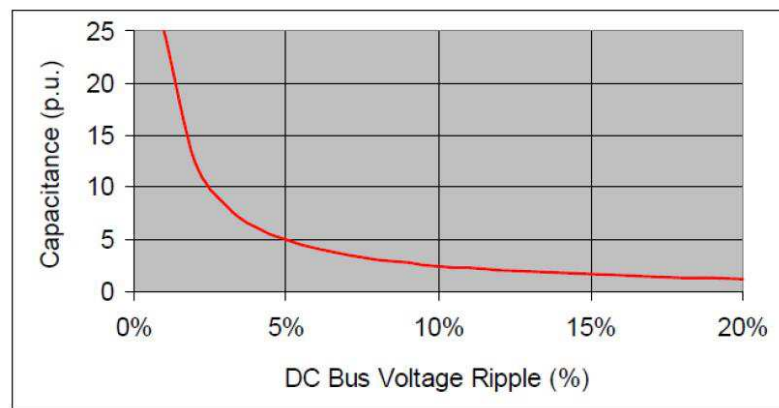


Figura 5.15 Capacidade requerida vs. ripple máximo no barramento DC.

A equação que nos permite dimensionar os condensadores é representada por:

$$C_{DC} = \frac{\max(\Delta_{qn})}{\%V_{ripple} \times V_{DC}} \quad (5.12)$$

Em que:

Δ_{qn} = Variação de carga dependente dos valores à entrada e à saída do conversor num determinado período, considerando $\max(\Delta_{qn}) = 0.06C$;

O condensador deverá ter uma capacidade mínima de:

$$C_{DC} = \frac{0,06}{0,05 \times 400} = 3000 \text{ [\mu F]} \quad (5.13)$$

5.3.2 Elementos passivos do conversor bidirecional AC-DC multinível

Para o dimensionamento dos elementos passivos do conversor bidirecional AC-DC multinível aceite-se os mesmos valores dos elementos do circuito do conversor AC-DC de ponte completa.

Como tal é necessário especificar:

- O valor da resistência da bobina é desprezável, portanto o valor da impedância é: $L=3$ mH
- Considerando que os condensadores do barramento DC apresentam características equivalentes, ou seja $C1 = C2=1500$ μ F;
- A tensão imposta pelo conversor corresponderá a $V_{DC}/2$, assim neste caso cada condensador deverá suportar pelo menos 200V aos seus terminais.

5.3.3 Elementos passivos do conversor bidirecional DC-DC buck boost

No caso do conversor DC-DC, pretende-se determinar o valor da bobina denominada por L_0 . Para dimensionamento em questão são consideradas as condições da tabela 5.4.

Parâmetro	Valor
Potência nominal, P	3kW
Tensão da entrada	400V
Tensão aos terminais dos packs de baterias	120V
Frequência de comutação, f_{sw}	50kHz

Tabela 5.4 Discriminação de valores associados para simulação conversor bidirecional DC-DC buck-boost

$$f_{sw} = \frac{1}{2*P*L} \left(\frac{1}{\frac{1}{V_{DC}} + \frac{1}{V_b}} \right) \quad (5.14)$$

Na equação anterior, V_{DC} corresponde ao tensão de entrada no conversor DC-DC buck-boost, V_b corresponde ao tensão aos terminais dos packs de baterias, P é a potencia do conversor e o f_{sw} é a frequência de comutação dos semiconductores.

Substituindo em equação 5.14 por valores apresentados na tabela 5.4 podemos determinar o valor da impedância, $L_0=2,1e^{-3}$ [H].

5.3.4 Dimensionamento da bateria e determinação dos elementos do modelo

Sabendo que aos terminais de entrada deste conversor é disponibilizada uma potência de 3 kW, limitados a 16A, pretende-se estabelecer uma tensão no referido barramento equivalente a 400V. Com bases nestes valores pretende-se carregar até 136 V (V_{ocmax}) e descarregar até 106 V (V_{ocmin}) um *pack* de baterias de ácido chumbo com uma potência de 1.2 kW para 12 horas (Verma et al. 2011).

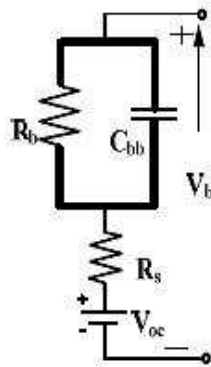


Figura 5.16 Circuito equivalente de Thevénin (Verma et al. 2011)

Conforme (Ceraolo, 2000), sabendo os valores das resistências R_s , de valor desprezável (0.01Ω) e o valor de resistência R_b ($10k\Omega$) podemos determinar o valor do condensador C_{bb} :

$$C_{bb} = (kWh * 3600 * 1000) / \{0.5(V_{ocmax}^2 - V_{ocmin}^2)\} =$$

$$= (1.2 * 12 * 3600 * 1000) / \{0.5(136^2 - 106^2)\} = 14281 \text{ [F]} \quad (5.15)$$

CAPÍTULO 6

Teste e validação dos sistemas propostos

6.1 Software utilizado

A parte de simulação dos sistemas escolhidos pode ser dividida em duas partes, uma utilizando o software PowerSim (PSIM) versão 9.0. para realização da parte que integra a simulação respeitante ao circuito de potência, e outra utilizando o ambiente Simulink do software MATLAB r2012a para realização da simulação da parte que integra o controlo. A escolha destes softwares para simulação é justificada pelo acesso á funcionalidade SimCoupler que permite a interação entre os ambientes de simulação.

A existência desta funcionalidade torna possível a interligação do PowerSim que de facto é um software vocacionado para simulações de circuitos de potência com um excelente desempenho em termos de tempos de simulação, consumo de recursos da máquina e de aproximações nos resultados, com o Simulink do MATLAB, um ambiente de programação/simulação intuitivo, que possui uma vasta biblioteca de funções implementadas e com exemplos práticos e explicações detalhadas.



Figura 6.1 Exemplo de quadro operacional de cooperação entre MATLAB e PSIM

Na realização de qualquer simulação há a necessidade de especificar parâmetros de simulação que não são mais do que o nível de aproximação à realidade.

No caso do software PSIM é necessário especificar o passo de simulação. Este deve ser escolhido de acordo com a dinâmica temporal do processo a simular.

No caso do software MATLAB o passo de simulação tem de ser igual ao do software PSIM a fim de ser viável a utilização da ferramenta SimCoupler.

Do ponto de vista da simulação destes conversores, a dinâmica temporal fica dependente do período de comutação dos semicondutores. É necessário assegurar que o processo de controlo é executado num tempo menor que o período de comutação dos semicondutores. Para cumprir estes requisitos definiu-se um passo de simulação muito menor, de valor igual a $1\mu\text{s}$ ($1 \cdot 10^{-6}$).

No software MATLAB há ainda a possibilidade de escolha de um solver para a computação das diferentes equações que definem o modelo, neste caso foi escolhido o solver ode 23tb (stiff/TR-BDF2) em modo discreto.

6.2 Ambiente de simulação

Com base no que foi referido no tópico anterior, optou-se por juntar numa só simulação o melhor das duas aplicações. No PSIM é simulada toda a parte de potência do conversor, assim com a aquisição de grandezas necessárias ao controlo.

O circuito de potência para o conversor bidirecional AC-DC de ponte completa em parceria com o conversor bidirecional buck-boost implementado em PSIM é o observado na figura 6.2.

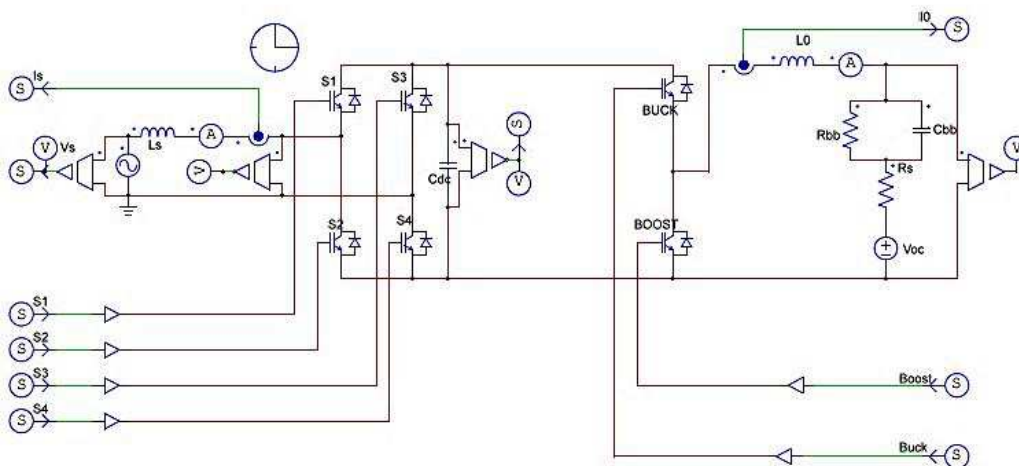


Figura 6.2 Circuito de potência do conversor bidirecional AC-DC de ponte completa

A figura 6.3 apresenta a estrutura de controlo implementada em Simulink, sendo esta constituída por 3 blocos, nomeadamente, o bloco associado ao conversor AC-DC ponte completa, o bloco associado ao conversor DC-DC e por fim o bloco que permite a

iteração com o PSIM.

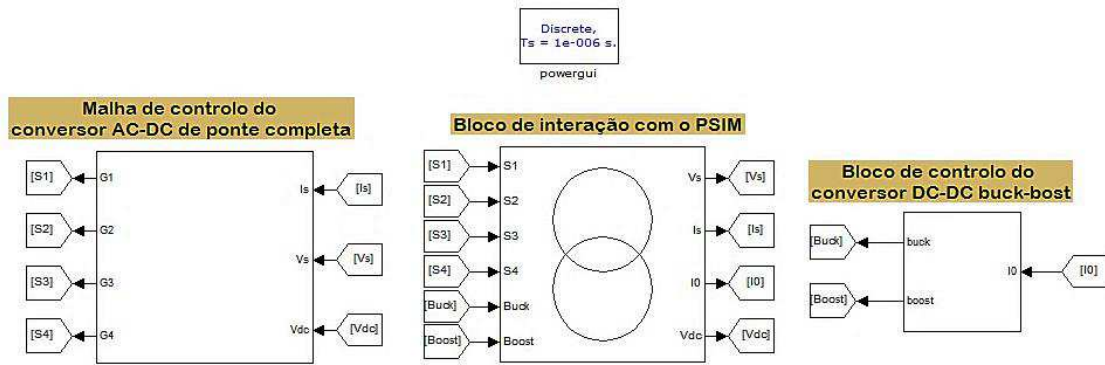


Figura 6.3 Estrutura de controlo do conversor bidirecional AC-DC de ponte completa

De seguida mostra-se em detalhe o bloco associado ao conversor bidirecional AC-DC de ponte completa:

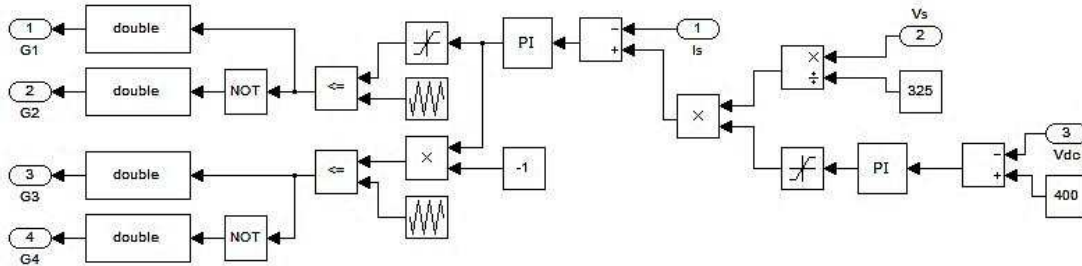


Figura 6.4 Malha de controlo do conversor AC-DC ponte completa

O circuito de potência para o conversor bidirecional AC-DC multinível em parceria com o conversor bidirecional buck-boost implementado em PSIM é observado na figura 6.5.

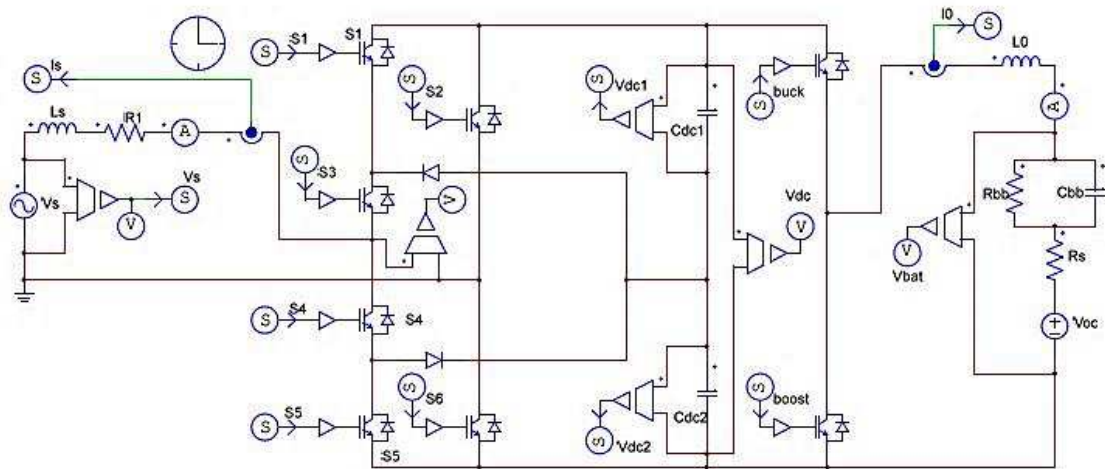


Figura 6.5 Circuito de potência do conversor bidirecional AC-DC multinível

A figura 6.6 apresenta a estrutura de controlo implementada em Simulink, também constituída por 3 blocos, nomeadamente, o bloco associado ao conversor AC-DC multinível, o bloco associado ao conversor DC-DC e por fim o bloco que permite a interação com o PSIM.

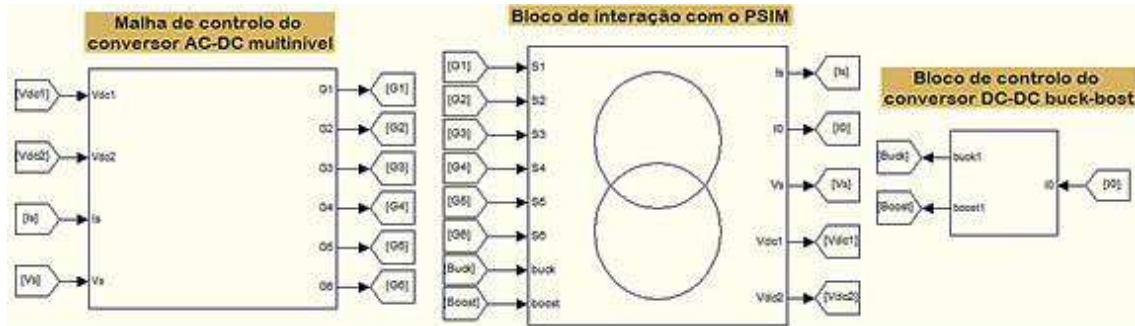


Figura 6.6 Estrutura de controlo do conversor bidirecional AC-DC multinível

De seguida mostra-se em detalhe os blocos associados ao conversor bidirecional AC-DC multinível e do conversor bidirecional DC-DC.

- Bloco de controlo do conversor bidirecional AC-DC multinível:

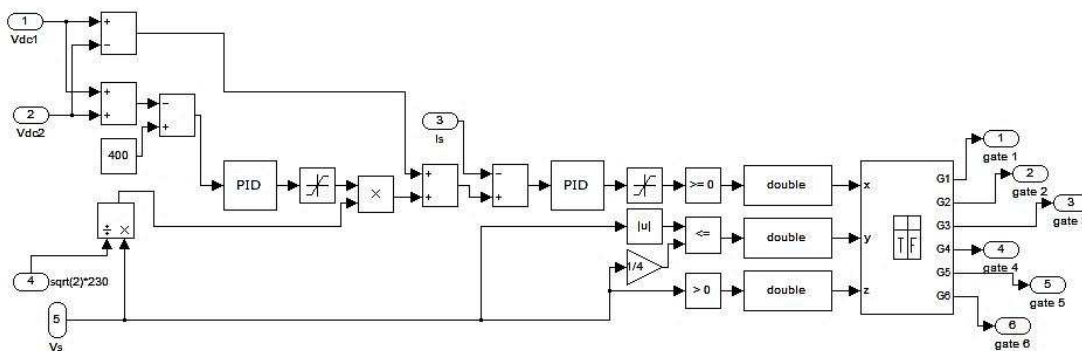


Figura 6.7 Malha de controlo do conversor bidirecional AC-DC multinível

- Bloco de controlo do conversor bidirecional DC-DC buck-boost:

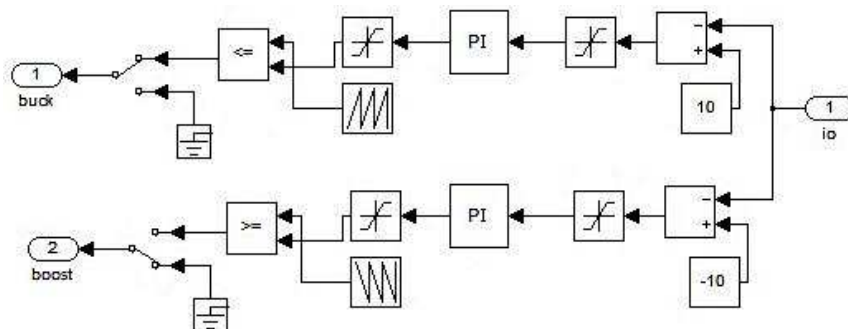


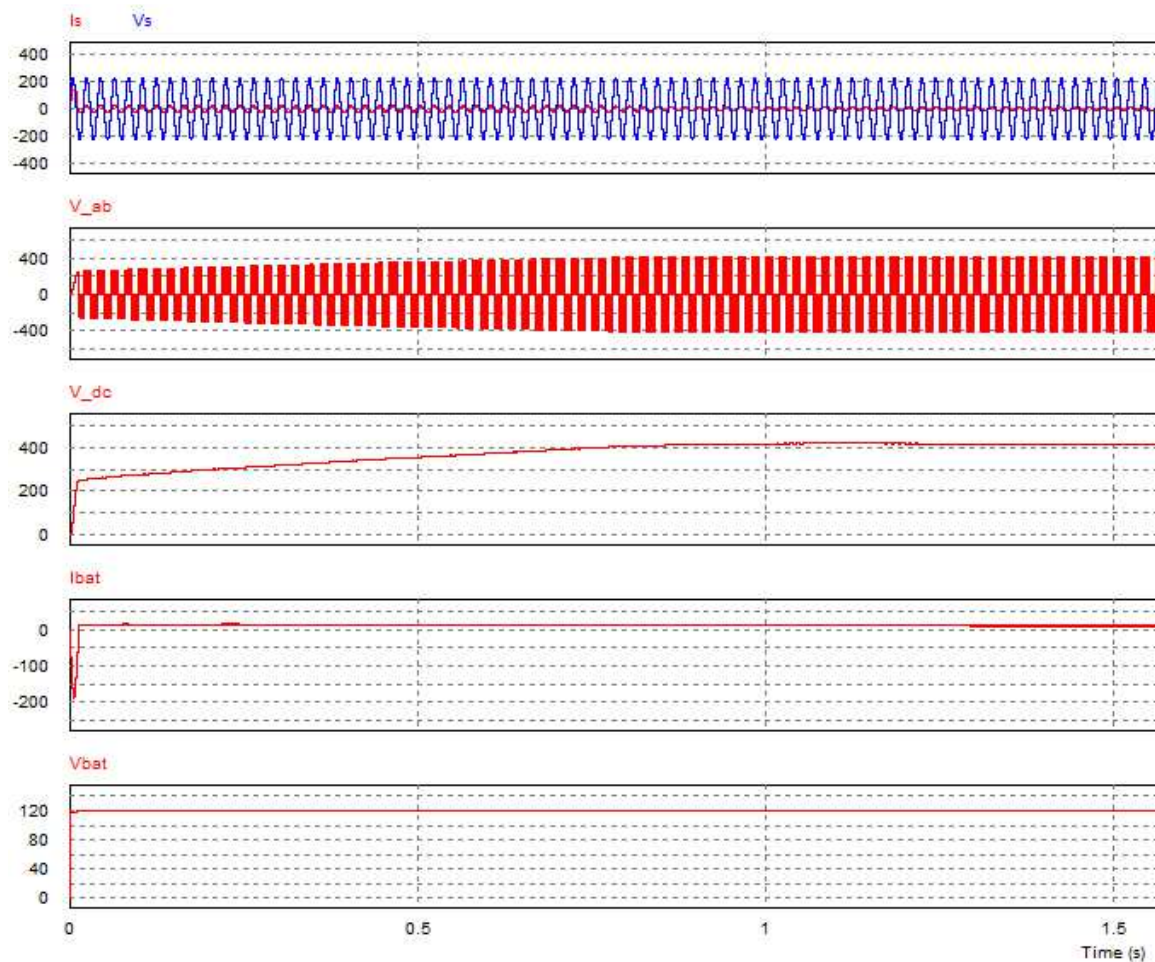
Figura 6.8 Malha de controlo do conversor bidirecional DC-DC buck-boost

6.3 Resultados e análise dos resultados

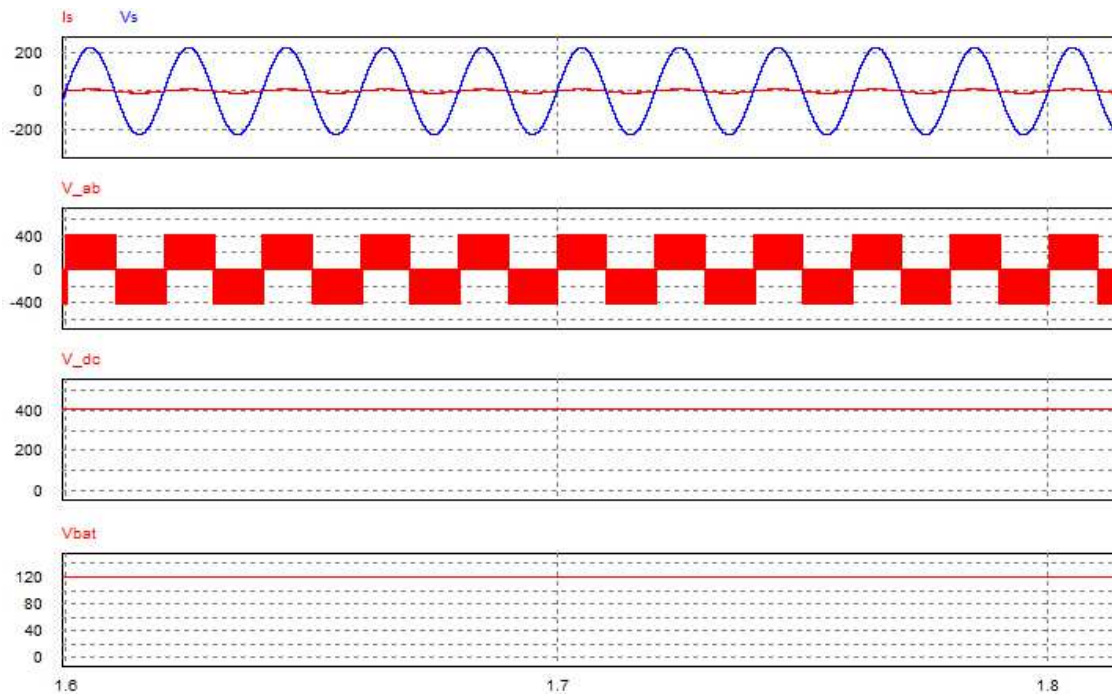
A análise dos resultados permitem perceber algumas características do funcionamento dos conversores simulados.

Assim, é fundamental obter os valores de THD para a corrente e do fator de potência (PF), do conversor em regime permanente. A obtenção destes parâmetros foi obtida com recurso à ferramenta *powergui* do MATLAB e do PSIM respetivamente.

Os resultados e a análise dos resultados para o conversor bidirecional AC-DC de ponte completa /conversor bidirecional DC-DC buck-boost para o modo G2V são apresentados na seguinte:



a)) Simulação do conversor AC-DC ponte completa: regime transitório



b)) Simulação do conversor AC-DC ponte completa: regime permanente

Figura 6.9 Simulação da primeira proposta: modo G2V

Em que:

- Os sinais azul e o vermelho, que se encontram no topo da cada figura 6.9 a) e b), representam, a tensão e a corrente na entrada do conversor.
- O segundo sinal corresponde ao valor de tensão imposta pelo conversor aos terminais da rede (V_{ab}).
- O terceiro sinal é representativo do valor da tensão no barramento DC.
- O quarto sinal representa a corrente de carga (I_{bat}) e por fim,
- O último sinal corresponde ao valor de tensão aos terminais dos packs de baterias (V_{bat}).

Observa-se que durante o regime transitório, devido ao facto que neste período os condensadores se encontram totalmente descarregados, ocorre um pico de corrente na rede.

Uma vez que se trata do modo de carga, a obtenção de um fator de potência unitário é obtido segundo um sinal de corrente da rede totalmente em fase com o de tensão.

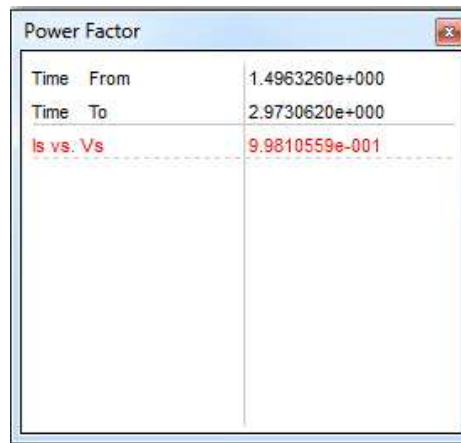


Figura 6.10 Fator de potência primeira proposta: modo G2V

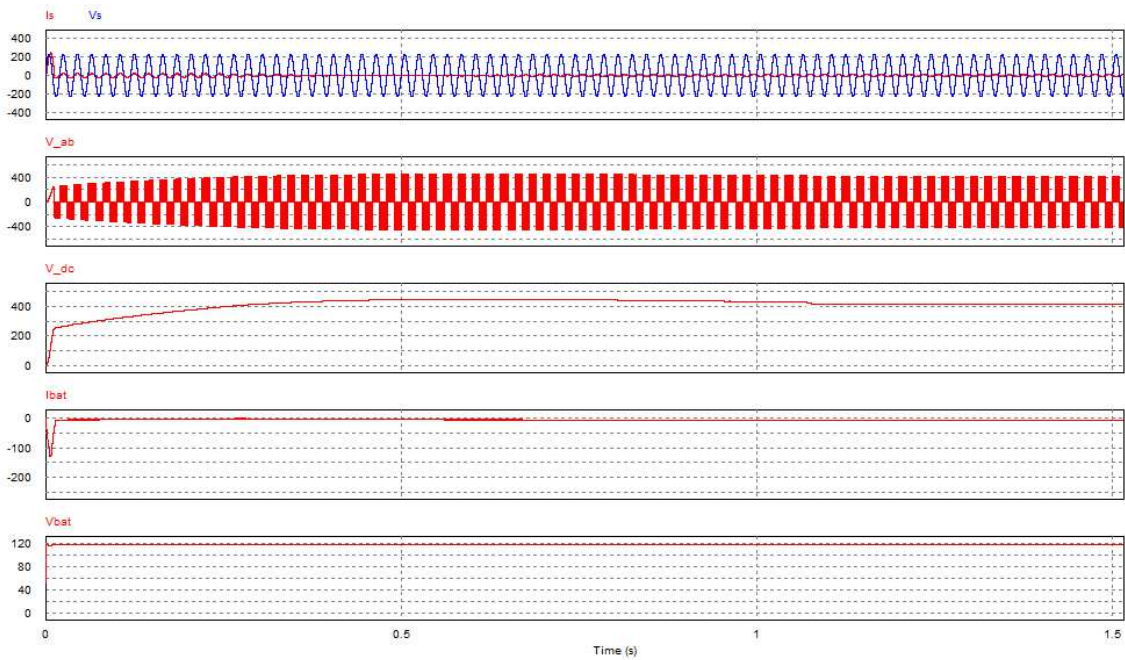
A figura 6.10 permite verificar que o PF do conversor é maior que 0.99, no funcionamento em regime permanente, com referência de corrente reativa igual a zero. Este fato permite verificar o funcionamento do conversor dentro dos limites estabelecidos nos padrões internacionais.



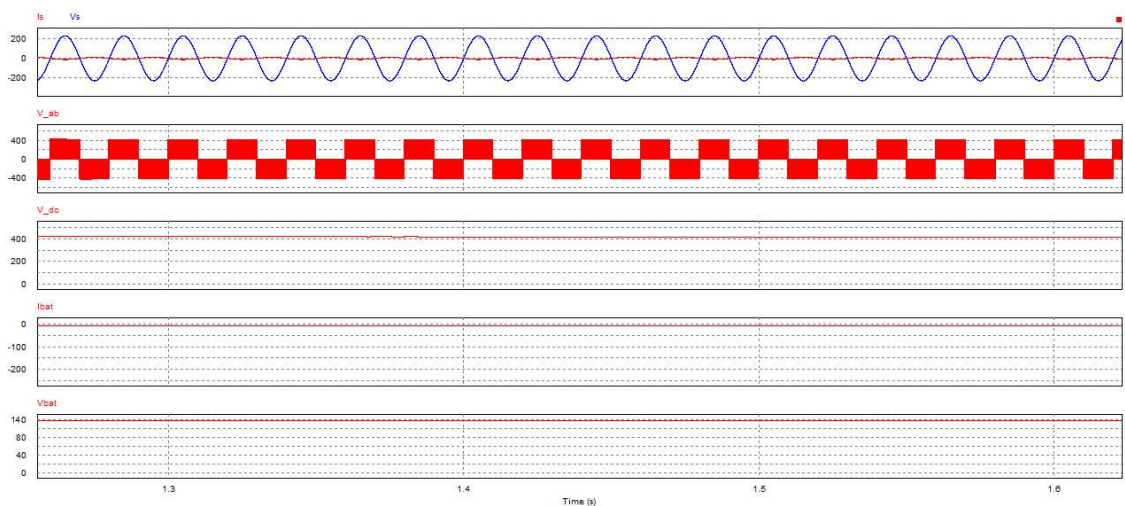
Figura 6.11 O sinal de corrente da primeira proposta: modo G2V

Na figura 6.11 apresenta-se o sinal de corrente do pack de baterias, com um valor médio de 10A e com um ripple inferior a 1 A.

Os resultados e a análise dos resultados para o conversor bidirecional AC-DC de ponte completa /conversor bidirecional DC-DC buck-boost para o modo V2G são apresentados na seguinte:



a) Simulação do conversor AC-DC ponte completa: regime transitório



b) Simulação do conversor AC-DC ponte completa: regime permanente

Figura 6.12 Simulação da primeira proposta: modo V2G

Em que:

- Os sinais azul e o vermelho, que se encontra no topo da figura 6.12 a) e b), representam, a tensão e a corrente na entrada do conversor.
- O segundo sinal corresponde ao valor de tensão imposta pelo conversor aos terminais da rede (V_{ab}).
- O terceiro sinal é representativo do valor da tensão no barramento DC.
- O quarto sinal representa a corrente de descarga (I_{bat}) e por fim,

- O último sinal corresponde ao valor de tensão aos terminais dos packs de baterias (Vbat).

Visto que se trata do modo de injeção de corrente na rede, para tal é necessário que o sinal de corrente venha desfasado 180° do de tensão, garantindo-se assim o requisito de um fator de potência unitário.

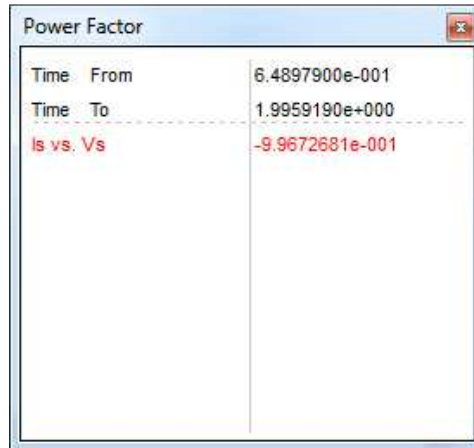


Figura 6.13 Fator de potência primeira proposta: modo V2G

Verifica-se garantia de um fator de potência de valor -0,996, para característica de desfaseamento referida entre o sinal de corrente e tensão, figura 6.13.

Para se visualizar o trânsito de potência das baterias para a rede, o conversor deverá impor um valor de corrente negativo com uma amplitude média e constante de 10A. A figura seguinte apresenta o sinal de corrente enviado para barramento DC.

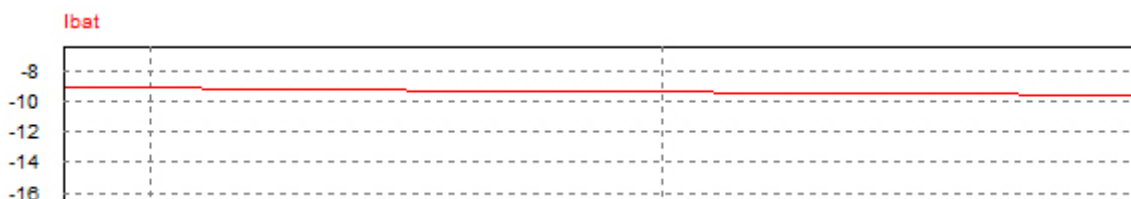
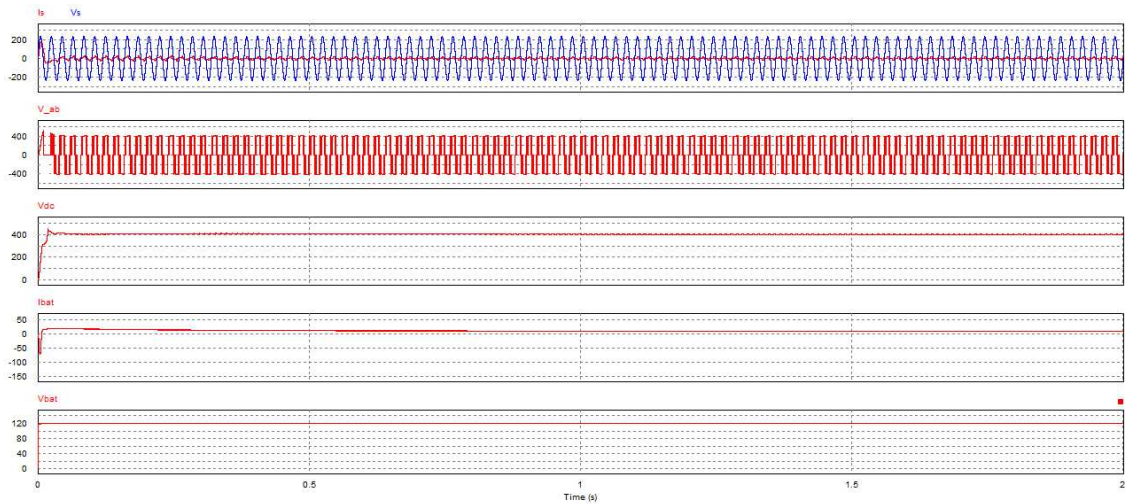


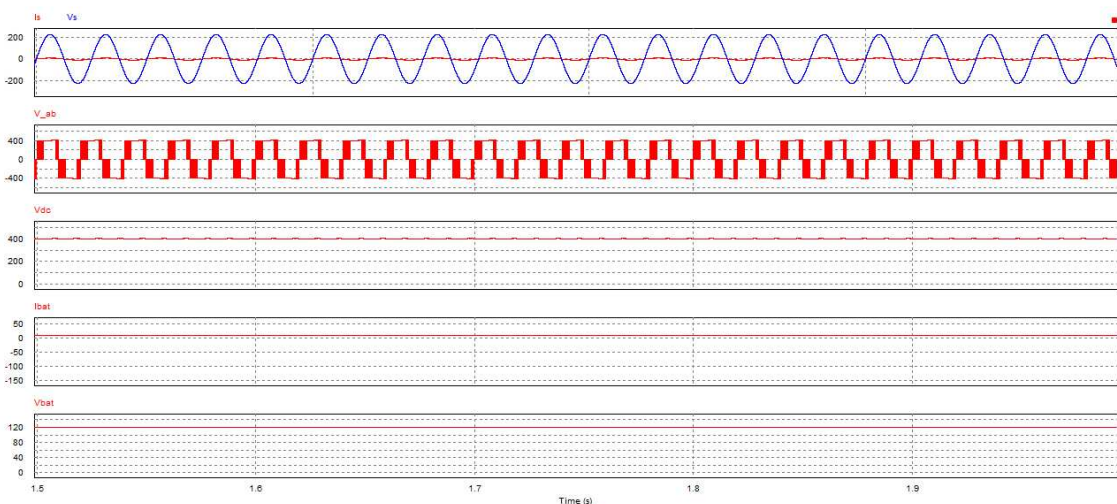
Figura 6.14 O sinal de corrente primeira proposta: modo V2G

Mais uma vez, verifica-se que os resultados obtidos em simulação vão ao encontro do que é pretendido, uma vez que os requisitos impostos para o sinal de corrente são cumpridos. Não se estabeleceu um limite mínimo de tensão, no entanto a malha de controlo encontra-se habilitada para tal, bastando que o utilizador defina a respetiva referência de tensão mínima no bloco definido para o efeito.

Os resultados e a análise dos resultados para o conversor bidirecional AC-DC multinível /conversor bidirecional DC-DC buck-boost para o modo G2V são apresentados na seguinte:



a) Simulação do conversor AC-DC multinível: regime transitório



b) Simulação do conversor AC-DC multinível: regime permanente

Figura 6.15 Simulação da segunda proposta: modo G2V

Em que:

- Os sinais azul e o vermelho, que se encontram no topo da cada figura 6.15 a) e b), representam, a tensão e a corrente na entrada do conversor.
- O segundo sinal corresponde ao valor de tensão imposta pelo conversor aos terminais da rede (V_{ab}).
- O terceiro sinal é representativo do valor da tensão no barramento DC.

- O quarto sinal representa a corrente de carga (I_{bat}) e por fim, o último sinal corresponde ao valor de tensão aos terminais dos packs de baterias (V_{bat}).

Verifica-se, como na simulação do precedente circuito, que durante o regime transitório ocorre um pico de corrente na rede, devido ao facto que neste período os condensadores necessitam de “corrente extra” para estabelecerem o nível de tensão pretendido.

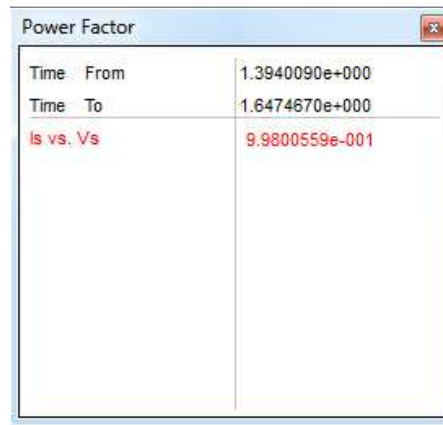


Figura 6.16 Fator de potência segunda proposta: modo G2V

No funcionamento em regime permanente, verifica-se o funcionamento do conversor dentro dos limites estabelecidos nos padrões internacionais. A figura 6.16 permite verificar que o PF do conversor é maior que 0.998.

Na figura 6.17 apresenta-se o sinal de corrente do pack de baterias, com um valor médio de 10A e com um ripple inferior a 1 A.

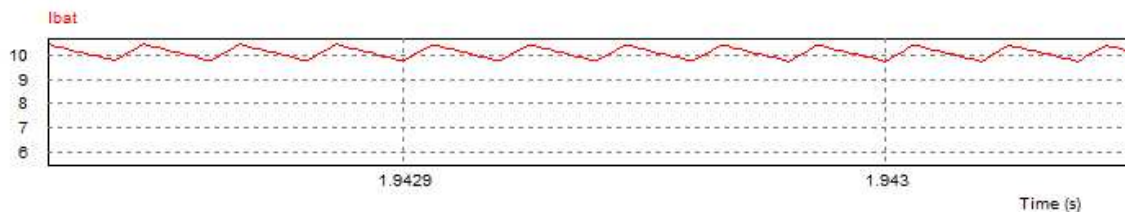
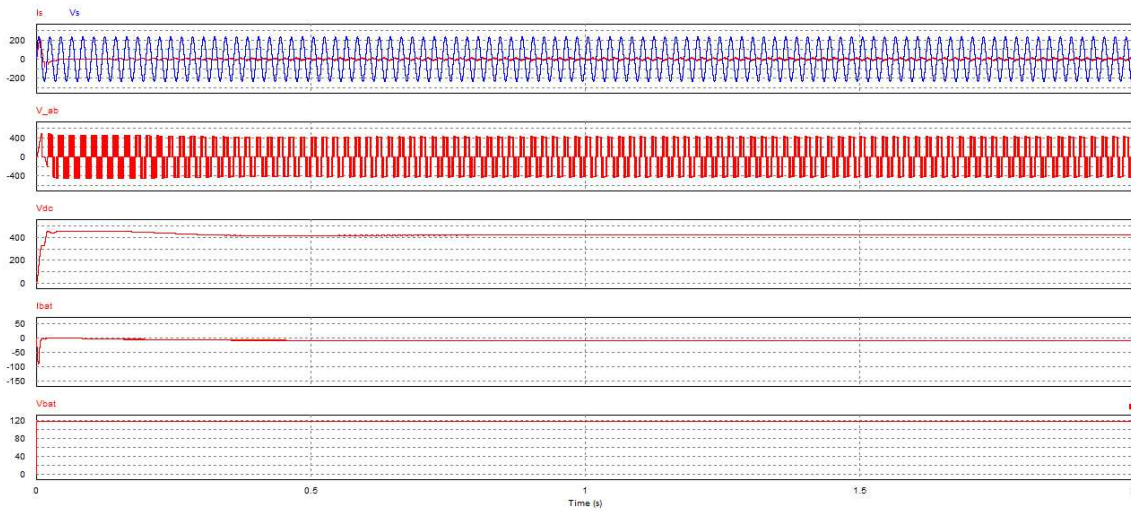
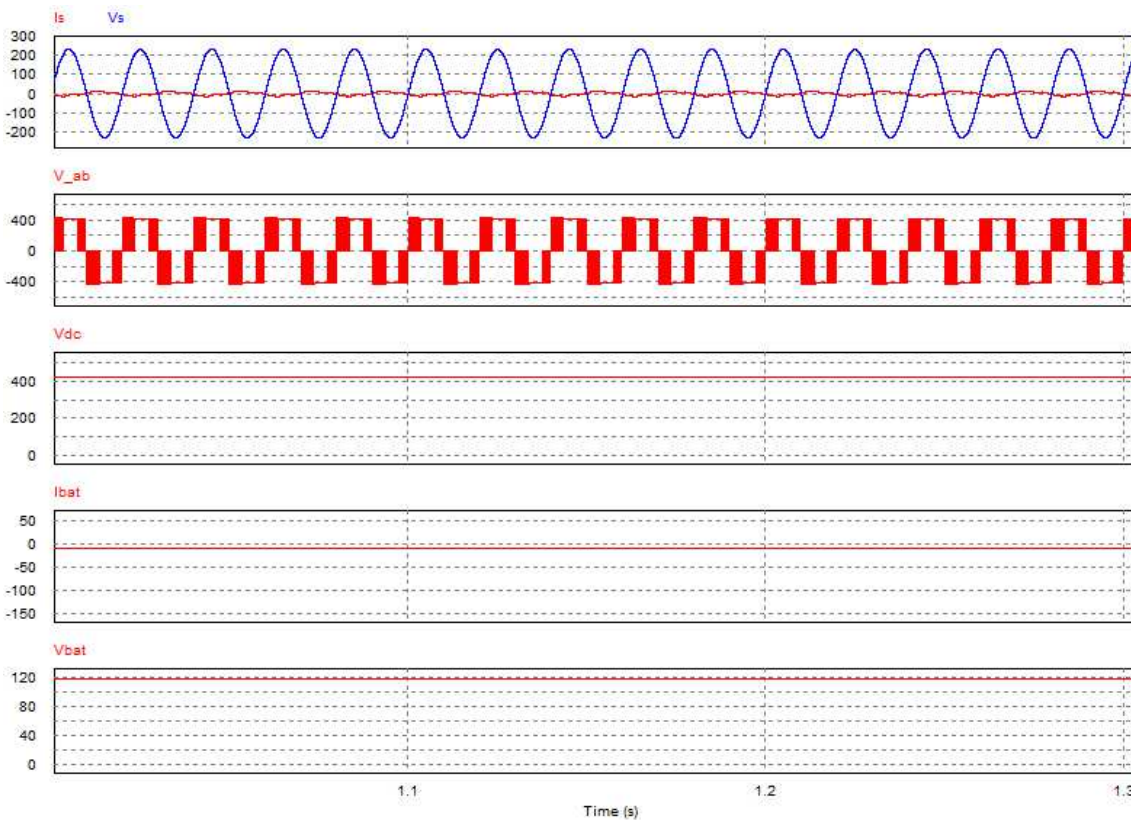


Figura 6.17 O sinal de corrente segunda proposta: modo G2V

Os resultados e a análise dos resultados para o conversor bidirecional AC-DC multinível /conversor bidirecional DC-DC buck-boost para o modo V2G são apresentados na seguinte:



a) Simulação do conversor AC-DC multinível: regime transitório



b) Simulação do conversor AC-DC multinível: regime permanente

Figura 6.18 Simulação da segunda proposta: modo V2G

Em que:

- Os sinais azul e o vermelho, que se encontram no topo da cada figura 6.18 a) e b), representam, a tensão e a corrente na entrada do conversor.

- O segundo sinal corresponde ao valor de tensão imposta pelo conversor aos terminais da rede (V_{ab}).
- O terceiro sinal é representativo do valor da tensão no barramento DC.
- O quarto sinal representa a corrente de descarga (I_{bat}) e por fim, o último sinal corresponde ao valor de tensão aos terminais dos packs de baterias (V_{bat}).

Verifica-se, como na simulação do precedente circuito, que durante o regime transitório ocorre um pico de corrente na rede, devido ao facto que neste período os condensadores necessitam de “corrente extra” para estabelecerem o nível de tensão pretendido.

Power Factor	
Time From	1.4447010e+000
Time To	1.9516140e+000
I_s vs. V_s	-9.9872681e-001

Figura 6.19 Fator de potência para segunda proposta: modo V2G

No funcionamento em regime permanente, verifica-se o funcionamento do conversor dentro dos limites estabelecidos nos padrões internacionais.

Verifica-se, mais uma vês, garantia de um fator de potência de valor -0,996, para característica de desfasamento referida entre o sinal de corrente e tensão, figura 6.19.

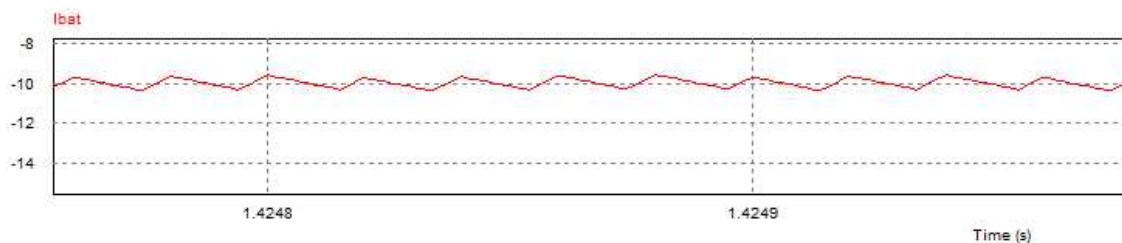


Figura 6.20 O sinal de corrente segunda proposta: modo V2G

CAPÍTULO 7

Conclusões

Os objetivos deste trabalho abordam o desenvolvimento de sistemas de carga bidirecional de veículos elétricos tendo permitido sedimentar os conhecimentos adquiridos no passado e igualmente adquirir outros na área da electrónica de potência e não só.

Neste trabalho foram usadas duas ferramentas de software na área da simulação que permitem estudar os sistemas em questão, tanto para a parte de potência, com o software PSIM, como para a de controlo através do MATLAB/SIMULINK, com grande profundidade, sendo que para isso foi crucial a capacidade de interligação das duas ferramentas, permitindo beneficiar da capacidade de análise do PSIM e da capacidade de modelação de sistemas de controlo através do Simulink.

Embora as topologias de conversão bidirecional mais comuns utilizem transformadores, os sistemas simulados nessa dissertação apresentam a vantagem de não ter a necessidade deste elemento, tornando-se assim um pouco menos volumosos, menos pesados e mais baratos.

Verifica-se que tanto o sistema composta pelo conversor ponte completa e como também o sistema que composta pelo conversor multinível são uma opção competitiva e vantajosa na zona da média-alta tensão, sendo capazes de satisfazer os requisitos mínimos e respeitando os limites impostos. A inclusão do conversor DC-DC buck-boost permite um maior e melhor controlo da corrente e da tensão fornecidas ou obtidas a partir dos packs de baterias.

Os conversores bidirecionais ponte completa e multinível propostos trocam corrente AC com a rede com fator de potência unitário e os THD encontram-se abaixo de um limite de 5%, dentro do padrão IEEE-519, com consequências em termos do prolongamento da vida do conversor e da bateria, minimizando a possibilidade de distorção da tensão de rede. Observa-se no barramento DC dos dois conversores uma

variação de 4V, representado um ripple de 1%, em regime permanente tanto no modo carga como no modo descarga.

A análise dos resultados conduziu à percepção de um menor tempo para entrada em regime permanente para o conversor bidirecional AC-DC multinível em comparação com o conversor bidirecional AC-DC de ponte completa.

Tendo em conta o melhor comportamento em regime transitório e os preços dos componentes necessárias para a sua implementação prática (Anexo A), sugere-se como trabalho futuro a implementação prática do conversor multinível, permitindo assim validar os resultados aqui obtidos e aperfeiçoar o seu funcionamento com vista ao seu uso efetivo. De resto, o estudo deste tipo de conversor multinível parece justificar-se mesmo noutras áreas, nomeadamente para a interligação de sistemas de aproveitamento de energia renovável, tais como os painéis com células fotovoltaicas ou outros.

Anexo A

Componentes	Código	Rs	Farnell	Mouser	Digikey	N de componentes do conversor ponte completa	N de componentes do conversor multinível	Descrição
Circuito de potência								
IGBT	IRG4PH50KD	7.027 €	6,57 €	7,84 €	7,55 €	6	8	
Dissipadores IGBT	SK89-75-SA	7,01 €	-	-	-	6	8	
Indutância	RB8522-16-3M0	11,99 €	-	11,98 €	12,17 €	1	1	
	8120-RC	-	8,37 €	-	6,80 €	0	1	
	CMT-8120	-	-	9,10 €	8,34 €	1	0	
Condensador	E36D201HPN1 62TC92N	-	-	-	10,16 €	0	2	
	500C332M450 DC5F	-	83,98 €	-	-	1	0	
Díodo	VS-0ETS08FPPBF	2,70 €	-	1,52 €	-	0	2	
Circuito de drive e de proteção de sinal para os IGBTs								
Drive IGBT-acoplador	HCPL-3180-300E	3,12 €	3,81 €	3,15 €	-	6	8	-medir os sinais de comando, gerados pelo controlador, requerido para cada IGBT -isolar o circuito de comando do circuito de potência.
Drive IGBT convertor	XP POWER IL1215S	-	5,98 €	-	5,59 €	6	8	-assegurar o completo isolamento entre circuitos. -permitindo ajustar o sinal com a tensão e corrente

DC/DC								requerida pelo IGBT.
Circuito de aquisição de sinal de corrente e de tensão								
Sensor de corrente	LEM LA 25-P	26,85 €	-	-	-	3	3	Utilizado para aquisição do sinal de corrente do barramento de entrada AC, do barramento DC e dos packs de baterias
Sensor de tensão	LEM LV 25-P	54,17 €	52,31 €	-	52,92 €	3	3	Utilizado para aquisição do sinal de tensão do barramento de entrada AC, do barramento DC e dos packs de baterias
Controlador (DSP)	DSPIC30F6014 A-30I/PF	10,50 €	7,93 €	10,90 €	10,48 €	1	1	Utilizado para: - aquisição dos sinais vindos dos sensores (LEM) - controlo do próprio sistema e condicionamento dos sinais PWM oriundos da malha de controlo
Total						483.46 €	465.88 €	

Bibliografia

- Barrett S., “Toyota FCV for 2015, Using Small, Efficient California H2 Network.”, 2014 Science Direct, página: 2, doi: 10.1016/S1464-2859(14)70036-7
- Bojrup, M., Karlsson P., Alakula M. e Simonsson B., “A Dual Purpose Battery Charger for Electric Vehicles.”, 2014, páginas: 565–570. doi:10.1109/PESC.1998.701954.
- Bor-Ren Lin, Der-Jan Chen e Hui-Ru Tsay. “Bi-Directional AC/DC Converter Based on Neutral Point Clamped.”, 2001, páginas: 619–624. IEEE. doi:10.1109/ISIE.2001.931865.
- Brain A., “Cars-the Best Book an Cars Ever.”, 2011 PediaPress.
https://books.google.pt/books?id=Bnh9JXkXojEC&pg=PP1&lpg=PP1&dq=Cars+Por+adriana+brain&source=bl&ots=ykkgRhArky&sig=IBXRo638ZrqB_9tmkLUIX2Qni0o&hl=pt-PT&sa=X&ei=sTmXVMPkIMvzUrL9gKgL&ved=0CDUQ6AEwAg#v=onepage&q=Cars%20Por%20adriana%20brain&f=false
- Bruce, Peter G., Freunberger Stefan A., Hardwick Laurence J. e Tarascon Jean-Marie, “Li–O₂ and Li–S Batteries with High Energy Storage.”, 2011, Nature Materials, páginas: 19–29. doi: 10.1038/nmat3191.
- Ceraolo M., “New Dynamical Models of Lead-Acid Batteries.”, 2000, IEEE Transactions on Power Systems, páginas: 1184–1190. doi: 10.1109/59.898088.
- C. C. Chan, “The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles.”, 2002, Proceedings of the IEEE, páginas: 247–275. doi:10.1109/5.989873.
- C. C. Chan, “The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles.”, 2007, Proceedings of the IEEE páginas: 704–718. doi:10.1109/JPROC.2007.892489.
- Chen M., e Rincón-Mora Gabriel A., “Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance.”, 2006 IEEE, vol: 21. nº 2.
- Denholm P. e Short W. “An Evaluation of Utility System Impacts and Benefits of Optimally Dispatched Plug-In Hybrid Electric Vehicles.”, 2006, Technical Report NREL/TP-620-40293
- Ehsani M., Gao Y., Gay S. E. e Emadi A., “Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design.”, 2005 Power Electronics and Applications Series. ISBN: 0-8493-3154-4.
- Onar Omer C. Dylan C. Erb, , e Alireza Khaligh. “Bi-Directional Charging Topologies for Plug-in Hybrid Electric Vehicles.”, 2010a IEEE, páginas: 2066–2072. doi:10.1109/APEC.2010.5433520.
- Onar Omer C. Dylan C. Erb, , e Alireza Khaligh. “An Integrated Bi-Directional Power Electronic Converter with Multi-Level AC-DC/DC-AC Converter and Non-

- Inverted Buck-Boost Converter for PHEVs with Minimal Grid Level Disruptions.*”, 2010b IEEE, páginas: 1–6. doi:10.1109/VPPC.2010.5729129.
- Gondelach Sarah J., e André P.C. Faaij. “*Performance of Batteries for Electric Vehicles on Short and Longer Term.*”, 2012 Journal of Power Sources, páginas: 111–129. doi:10.1016/j.jpowsour.2012.03.085.
- Gondelach Sarah. J., “*Current and Future Developments of Batteries for Electric Cars - an Analysis.*”, 2010, <http://dspace.library.uu.nl/handle/1874/188288> Acedido a 25/05/2014
- Husain I., “*Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals.*”, 2011, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press. ISBN: 9781439811757
- IBM Research, “*Lithium/Air Battery Project (Battery 500).*” 2013 Almaden Institute. http://researcher.watson.ibm.com/researcher/view_project.php?id=3203. Acedido a 25/05/2014
- IEC, “*Lead-acid starter batteries - General requirements and methods of test.*”, 2006 Commission Electrotechnique Internationale, http://webstore.iec.ch/preview/info_iec60095-1%7Bed7.0%7Den_d.pdf Acedido a 11/10/2014
- IEEE Std 1547, “*IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems.*”, 2003 IEEE, páginas: 440–447. doi:10.1109/VPPC.2009.5289815.
- Kempton W. e Tomić J., “*Vehicle-to-Grid Power Fundamentals: Calculating Capacity and Net Revenue.*”, 2005 Journal of Power Sources, páginas: 268–279. doi:10.1016/j.jpowsour.2004.12.025.
- Kempton W., Tomić J., Letendre S., Brooks A. e Lipman T., “*Vehicle-to-Grid Power: Battery, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles as Resources for Distributed Electric Power in California.*”, 2001, <http://www.udel.edu/V2G/docs/V2G-Cal-2001.pdf> Acedido a 13/10/2013
- Kisacikoglu, C. Mithat, Burak Ozpineci e Leon M. Tolbert. “*Effects of V2G Reactive Power Compensation on the Component Selection in an EV or PHEV Bidirectional Charger.*”, 2010 IEEE, páginas: 870–876. doi:10.1109/ECCE.2010.5617904.
- Kroeze, C. Ryan e Philip T. Krein. “*Electrical Battery Model for Use in Dynamic Electric Vehicle Simulations.*”, 2008 IEEE, páginas: 1336–1342. doi:10.1109/PESC.2008.4592119.
- Lave L.B. e Maclean H.L., “*Are Hybrid Vehicles Worth It?*”, 2001 IEEE Spectrum páginas: 47–50. doi:10.1109/6.908852.
- Linden David e Reddy Thomas B., “*Handbook of Batteries.*”, 2002-3rd ed. McGraw-Hill Handbooks. ISBN: 0071359788
- Lu Xiaochuan, Xia Guanguang, Lemmon John P. e Yang Zhenguo, “*Advanced Materials for Sodium-Beta Alumina Batteries: Status, Challenges and Perspectives.*”, 2010 Journal of Power Sources páginas: 2431–2442. doi:10.1016/j.jpowsour.2009.11.120.

- McKenna Phil, “*Packing More into Lithium Batteries.*”, 2010 *MIT Technology Review*.
<http://www.technologyreview.com/news/418006/packing-more-into-lithium-batteries/>. Acedido a 15/01/2013
- NASA. 2011. “*Batteries for Oxygen Concentrators.*”
<https://electrochemistry.grc.nasa.gov/current-projects/batteries-for-o2-concentrators/graph-volume-vs-gravimetric-energy-density/>. Acedido a 11/03/2014
- Pavlov Detchko, “*Lead-Acid Batteries: Science and Technology: A Handbook of Lead-Acid Battery Technology and Its Influence on the Product.*”, 2011 Elsevier Science Ltd. ISBN: 9780444528827
- Plett Gregory L., “*Extended Kalman Filtering for Battery Management Systems of LiPB-Based HEV Battery Packs.*”, 2004a *Journal of Power Sources*, páginas: 252–261. doi:10.1016/j.jpowsour.2004.02.031.
- Plett Gregory L., “*Extended Kalman Filtering for Battery Management Systems of LiPB-Based HEV Battery Packs.*”, 2004b *Journal of Power Sources* páginas: 262–276. doi:10.1016/j.jpowsour.2004.02.032.
- Rashid , “*Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações.*”, 1999 Makron. ISBN: 853460598X[
- Rao R., Vrudhula S. e Rakhmatov D.N. 2003. “*Battery Modeling for Energy-Aware System Design.*”, 2003 *IEEE*, páginas: 77–87. doi:10.1109/MC.2003.1250886.
- Reddy, Thomas B., “*Linden’s Handbook of Batteries.*”, 2011- 4th ed. McGraw-Hill. ISBN: 9780071624213 (hbk.)
- Sangtaek Han e Deepak Divan. “*Bi-Directional DC/DC Converters for Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) Applications.*”, 2008 *IEEE*, páginas: 784–789. doi:10.1109/APEC.2008.4522810.
- Verma, Arun Kumar, Bhim Singh, and D.T. Shahani. “*Grid to Vehicle and Vehicle to Grid Energy Transfer Using Single-Phase Bidirectional AC-DC Converter and Bidirectional DC-DC Converter.*”, 2011 *IEEE*, páginas: 1–5. doi:10.1109/ICEAS.2011.6147084.
- Vincent, Colin Angus e Bruno Scrosati, “*Modern Batteries: An Introduction to Electrochemical Power Sources.*”, 1997 London : Arnold. ISBN: 0340662786 9780340662786 0470237783 9780470237786



Dissertação

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica-Energia e Automação

Sistema de carga bidirecional para veículo elétrico

Daniel Gabriel Doroftei

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Luís Neves,
Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, novembro de 2014