

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Conversor CC/CC para central fotovoltaica com
armazenamento de energia**

Rui Miguel Jordão Xavier

Versão Final

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Major Automação

Orientador: Rui Esteves Araújo

Janeiro 2016

© Rui Xavier, 2016

Resumo

A produção de energia numa central fotovoltaica apresenta como grande inconveniente a dependência de vários fatores entre os quais dependência da luz solar incidente.

Por forma a diminuir os efeitos desta incapacidade de produção de energia propõe-se neste documento o estudo de uma solução para armazenamento de energia em baterias. A utilização de baterias permite que o sistema armazene energia em períodos em que a capacidade de produção seja maior que a necessidade da carga para que possa utiliza-la em períodos em que essa capacidade de produção seja insuficiente.

Neste documento é estudado o funcionamento de um conversor Dual Active Bridge como meio de ligação entre o barramento CC de uma central fotovoltaica e uma bateria.

Com base neste objetivo são desenvolvidos modelos para o conversor e para a bateria.

É desenvolvido um circuito de comando assim como um algoritmo de controlo para o conversor capaz de gerir o processo de carga e descarga da bateria.

Apresentam-se simulações destes modelos em software Psim com o objetivo de validar os resultados obtidos.

Abstract

The production of energy in a photovoltaic plant presents the inconvenience of high dependence on several factors including dependence of the incident sunlight. In order to reduce the effects of this lack of production is proposed in this document the study of a solution for energy storage in batteries. The use of batteries allows the system to store energy during periods when the production capacity is greater than the load requirements to use it during periods in which production capacity is insufficient.

This document presents the study of a Dual Active Bridge converter operating as the means of connection between the DC bus of a photovoltaic power plant and a battery.

Based on this goal models are developed for the converter and the battery.

A command circuit is designed for the converter as well as a control algorithm capable of managing charging and discharging of the battery.

Simulations of the developed models are presented in Prim software in order to validate the results.

Índice

Resumo	iii
Abstract	v
Índice	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
Abreviaturas e Símbolos	xv
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos da Dissertação	2
1.3 Mapa do documento.....	3
Capítulo 2	5
Estado da arte	5
2.1 Conversores CC/CC	5
2.1.1 <i>Buck-Boost</i>	5
2.1.2 <i>Flyback</i>	6
2.1.3 <i>Meia-Ponte</i>	7
2.1.4 <i>Dual Active Bridge</i> monofásico	8
2.1.5 <i>Dual Active Bridge</i> trifásico	10
2.2 Topologia proposta	12
Capítulo 3	14
Modelo e controlo do sistema	14
3.1 Modelo do conversor	15
3.1.1 Introdução.....	15
3.1.2 Análise em <i>steady-state</i>	16
3.1.3 Condições para <i>soft-switching</i>	19

3.2	Modelo da Bateria	20
3.2.1	Introdução.....	21
3.2.2	Análise e adaptação do modelo MATLAB	22
3.3	Circuito de comando	26
3.4	Circuito de controlo.....	27
3.5	Sumário	30
Capítulo 4		32
Simulações		32
4.1	Simulação do modelo da bateria.....	32
4.1.1	Descarregamento da bateria	33
4.1.2	Carregamento da bateria	35
4.1.3	Alteração entre carregamento e descarregamento.....	36
4.2	Dimensionamento dos componentes.....	38
4.2.1	Dimensionamento da bateria.....	39
4.2.2	Dimensionamento da indutância de fugas do transformador	40
4.3	Simulação do modelo do conversor	42
4.3.1	Bidirecionalidade.....	43
4.3.2	Operação em modo Buck e Boost.....	45
4.3.3	Potência em função do desfasamento	47
4.4	Simulação do conversor com a bateria.....	48
4.4.1	Descarregamento da bateria	49
4.4.2	Carregamento da bateria	51
4.4.3	Alteração entre carregamento e descarregamento.....	52
4.5	Sumário	54
Capítulo 5		57
Conclusões e trabalho futuro		57
5.1	Conclusões.....	57
5.2	Trabalho futuro	58
Referências		61

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Esquema de ligação do sistema global.....	2
Figura 2.1 - Conversor CC/CC buck-boost [1]	6
Figura 2.2 - Conversor CC/CC buck-boost trifásico [1].....	6
Figura 2.3 - Conversor CC/CC <i>flyback</i> [2]	7
Figura 2.4 - Conversor CC/CC em meia-ponte [1]	7
Figura 2.5 - Conversor CC/CC em meia-ponte bidirecional [1]	8
Figura 2.6 - Conversor CC/CC em meia-ponte alimentado a corrente [2]	8
Figura 2.7 - Conversor CC/CC em ponte completa [1]	9
Figura 2.8 - Conversor CC/CC <i>Dual Active Bridge (DAB)</i> [1]	9
Figura 2.9 - Conversor CC/CC DAB alimentado a corrente [1].....	10
Figura 2.10 - Conversor CC/CC trifásico [1]	11
Figura 2.11 - Conversor CC/CC dual active bridge trifásico [1]	11
Figura 2.12 - Conversor CC/CC dual active bridge trifásico com fonte de corrente [1] ...	12
Figura 3.1 - Esquema de ligação do sistema global.....	14
Figura 3.2 - Esquemático do conversor Dual Active Bridge [7]	16
Figura 3.3 - Modelo fundamental do conversor DAB [7]	16
Figura 3.4 - Principais formas de onda do conversor Dual Active Bridge [8]	17
Figura 3.5 - Limites para a operação em soft-switching.....	20
Figura 3.6 - Esquema de ligação do sistema global com ênfase no componente em análise.....	21
Figura 3.7 - Circuito equivalente do modelo de baterias existente no MATLAB [9]	22

Figura 3.8 - Modelo da bateria em SIMULINK	23
Figura 3.9 - Expansão do bloco “Model Continuous” do modelo da bateria em SIMULINK	23
Figura 3.10 - Gráfico de descarga de uma bateria genérica [9]	24
Figura 3.11 - Expansão do bloco “Model Continuous” do modelo da bateria em SIMULINK destacando as ligações em estudo.....	25
Figura 3.12 - Expansão do bloco Expo do modelo de baterias do SIMULINK	25
Figura 3.13 - Modelo da bateria implementado em PSIM.....	26
Figura 3.14 - Circuito de comando implementado em PSIM.....	27
Figura 3.15 - Circuito de controlo implementado em PSIM	28
Figura 3.16 - Algoritmo de carga e descarga da bateria.....	29
Figura 4.1 - Circuito de teste e modelo de baterias implementados em PSIM	33
Figura 4.2 - Circuito de teste e modelo de baterias implementados em SIMULINK	33
Figura 4.3 - Gráfico da tensão e do estado de carga da bateria simulados em PSIM quando a bateria é descarregada a corrente constante	34
Figura 4.4 - Gráfico da tensão e do estado de carga da bateria simulados em MATLAB quando a bateria é descarregada a corrente constante	34
Figura 4.5 - Gráfico da tensão e do estado de carga das baterias durante o carregamento a corrente constante.....	35
Figura 4.6 - Gráfico da tensão e do estado de carga da bateria simulados em MATLAB quando a bateria é carregada a corrente constante	36
Figura 4.7 - Circuito em MATLAB para teste de carga e descarga da bateria	37
Figura 4.8 - Forma de onda da tensão e do estado de carga das baterias quando simulado em PSIM sucessivas cargas e descargas	37
Figura 4.9 - Forma de onda da tensão e do estado de carga das baterias quando simulado em MATLAB sucessivas cargas e descargas	38
Figura 4.10 - Gráfico da potência transferida em função do valor do desfasamento para diferentes valores de tensão de entrada e de saída	41
Figura 4.11 - Circuito de potência do conversor DAB implementado em PSIM	43
Figura 4.12 - Circuito de controlo implementado em PSIM para testes do conversor.....	43
Figura 4.13 - Gráfico da potência transferida e da potência de referência obtidos no teste da bidirecionalidade com uma referência de 25kW.....	44
Figura 4.14 - Gráfico das tensões nas duas pontes e da corrente na indutância de fugas do transformador obtidos no teste da bidirecionalidade com uma referência de 25kW	44
Figura 4.15 - Gráfico da potência transferida e da potência de referência obtidos no teste da bidirecionalidade com uma referência de -25kW.....	44

Figura 4.16 - Gráfico das tensões nas duas pontes e da corrente na indutância de fugas do transformador obtidos no teste da bidirecionalidade com uma referência de -25kW45	
Figura 4.17 - Gráfico da potência transferida pelo conversor em modo Buck	46
Figura 4.18 - Gráfico das tensões nas duas pontes do conversor em funcionamento em modo Buck	46
Figura 4.19 - Gráfico da potência transferida pelo conversor em modo Boost.....	47
Figura 4.20 - Gráfico das tensões nas duas pontes do conversor em funcionamento em modo Boost	47
Figura 4.21 - Gráfico da potência em função do desfasamento	48
Figura 4.22 - Circuito de potência do conversor DAB implementado em PSIM para testes com a bateria	49
Figura 4.23 - Circuitos de controlo e comando do conversor implementados em PSIM para testes do conversor com a bateria.....	49
Figura 4.24 - Gráfico da potência transferida e da corrente na indutância de fugas do transformador quando o conversor descarrega a bateria	50
Figura 4.25 - Gráfico do estado de carga quando o conversor descarrega a bateria.....	50
Figura 4.26 - Gráfico da tensão na bateria quando é descarregada pelo conversor.....	50
Figura 4.27 - Gráfico do estado de carga da bateria quando é carregada pelo conversor	51
Figura 4.28 - Gráfico da corrente na indutância do transformador e da corrente de referência quando a bateria é carregada pelo conversor	51
Figura 4.29 - Gráfico da tensão na bateria quando é carregada pelo conversor.....	52
Figura 4.30 - Gráfico da potência transferida quando a bateria é descarregada pelo conversor	52
Figura 4.31 - Gráfico do estado de carga da bateria quando é carregada e descarregada sucessivamente pelo conversor	53
Figura 4.32 - Gráfico da corrente na indutância do transformador e da corrente de referência quando a bateria é sucessivamente carregada e descarregada pelo conversor	53
Figura 4.33 - Gráfico da potência transferida pelo conversor quando sucessivamente carrega e descarrega a bateria.....	53
Figura 4.34 - Gráfico da tensão na bateria quando é sucessivamente carregada e descarregada pelo conversor	54

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 - Características da bateria a utilizar para os testes do subcapítulo 4.1.....	33
Tabela 4.2 - Características das células de bateria a utilizadas	39
Tabela 4.3 - Características da bateria a utilizar para simulação com o conversor.....	40
Tabela 4.4 - Parâmetros a utilizar para o cálculo da indutância de fugas do transformador.....	40

Abreviaturas e Símbolos

FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
DAB	<i>Dual Active Bridge</i>
CC	Corrente Contínua
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PI	Controlador proporcional-integral
n	Razão de transformação
M	Razão entre a tensão de saída e a tensão de entrada
D	Desfasamento
V	Volt
A	Ampere
Ω	Ohm

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo é feita uma primeira abordagem ao tema em estudo nesta dissertação.

Num primeiro subcapítulo é realizada uma introdução procurando enquadrar o tema desta dissertação no panorama das energias renováveis, especialmente nas energias fotovoltaicas, procurando explicar os problemas existentes e de que maneira o tema em estudo pode contribuir para os resolver.

No segundo subcapítulo é aprofundado o caso específico em que esta dissertação incidirá sendo apresentados os requisitos do sistema assim como os objetivos que se propõem alcançar.

No terceiro subcapítulo é efetuado um mapa do documento com a descrição do conteúdo de cada capítulo.

1.1 Enquadramento

Uma central fotovoltaica consiste em vários painéis fotovoltaicos ligados em conjuntos através de ligações em série e em paralelo.

Nos últimos tempos, devido a fatores como o encarecimento dos combustíveis fósseis, assim como a tendência para reduzir as emissões de gases poluentes para a atmosfera, tem-se assistido a um grande impulso na geração de energia solar através de painéis fotovoltaicos [11].

Apesar de ser uma fonte de produção de energia cada vez mais utilizada, a energia fotovoltaica apresenta um grande problema. Este problema é que a capacidade de produção de energia por parte destes sistemas depende de fatores ambientais como a temperatura ou o ângulo de incidência da luz solar, não se podendo garantir que o sistema produza a energia pretendida em qualquer instante.

Por forma a diminuir os efeitos desta incapacidade de produção de energia é frequentemente utilizado um sistema de armazenamento de energia, geralmente baterias. A utilização de baterias permite que o sistema armazene energia em períodos em que a capacidade de produção seja maior que a necessidade da carga para que possa utilizá-la em períodos em que essa capacidade de produção seja insuficiente. Nestes sistemas existe a possibilidade de armazenar energia fornecida pela rede para posterior consumo.

Esta dissertação incidirá sobre a problemática da criação de um conversor CC/CC para fazer a ligação entre um conjunto de baterias ao barramento de tensão contínua de uma central fotovoltaica com ligação à rede. O conversor deverá ser capaz de gerir corretamente o processo de carga e descarga das baterias.

1.2 Objetivos da Dissertação

Esta dissertação tem como objetivo a criação de um conversor CC/CC bidirecional capaz de gerir corretamente o carregamento e o descarregamento de baterias através da ligação ao barramento CC de uma central fotovoltaica com ligação à rede. O esquema do sistema global apresenta-se na figura 1.1.

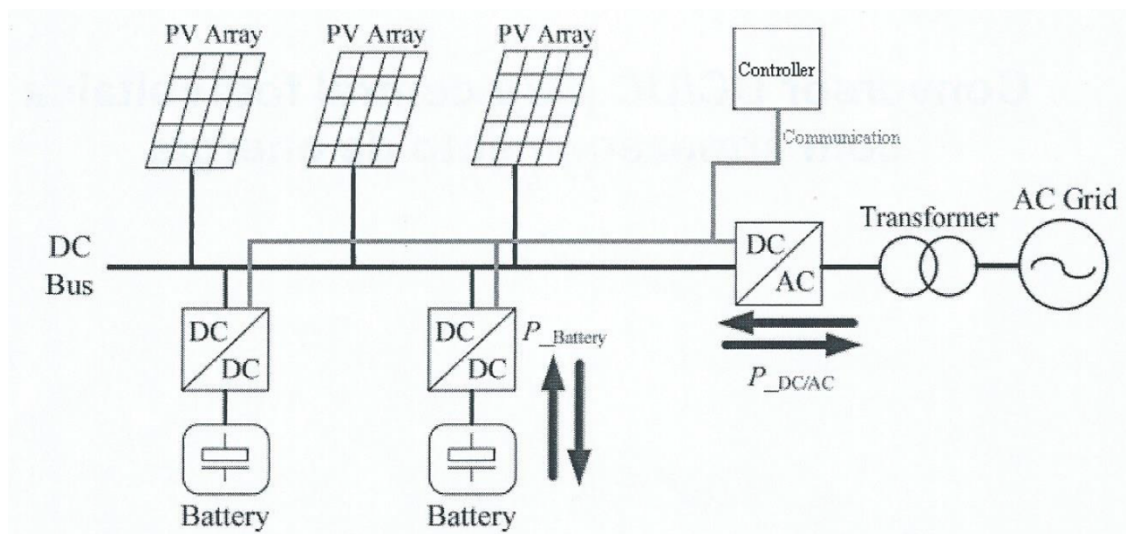


Figura 1.1 - Esquema de ligação do sistema global

Analisando os requisitos do conversor para este sistema tem-se que:

- Deverá ser capaz de transferir uma potência máxima de 35kW;
- A tensão de entrada, no barramento CC dos painéis fotovoltaicos, varia entre 450Vdc a 810Vdc, sendo o seu controlo da responsabilidade do algoritmo MPPT implementado no inversor com ligação à rede e não da responsabilidade do conversor em estudo

- A tensão na bateria deve ser controlada entre 400Vdc a 600Vdc, sendo o seu controlo um requisito deste conversor.
- Preferencialmente o conversor deverá ter isolamento galvânico entre o barramento CC dos painéis fotovoltaicos e as baterias.
- Deverá também ser capaz de comunicar com o controlador da instalação que indicará se é pretendido o carregamento ou o descarregamento das baterias em função das necessidades da rede.

Posto isto, os objetivos que se pretendem alcançar no decorrer desta dissertação são:

- Definição da topologia do conversor CC/CC mais indicada para utilização na gestão da carga e descarga das baterias, tendo em conta os requisitos do sistema.
- Implementação em software Psim de um modelo capaz de simular o conversor escolhido.
- Obtenção de um modelo em Psim que permita simular o comportamento de baterias permitindo a posterior validação do controlo do conversor.
- Validação dos modelos obtidos para o conversor e para as baterias.
- Implementação de um algoritmo no controlo do conversor capaz de efetuar corretamente o processo de carga e descarga das baterias.
- Validação do algoritmo de controlo do conversor através de testes com o modelo de baterias.

1.3 Mapa do documento

Este documento contém cinco capítulos.

No primeiro capítulo é feita uma primeira abordagem ao tema, começando por

No segundo capítulo é apresentado o levantamento bibliográfico das diferentes topologias de conversores CC/CC existentes e que se enquadram nos requisitos propostos para o sistema em estudo. É também definida a topologia de conversor a estudar ao longo deste documento.

No terceiro capítulo desenvolvem-se modelos para o conversor, através da análise em steady-state, e modelos para a bateria. São também explorados os circuitos de comando e de controlo do conversor.

No quarto capítulo são realizadas simulações aos modelos desenvolvidos por forma a validá-los. São também realizados os dimensionamentos necessários para a bateria e para o conversor operar segundo os requisitos do sistema.

No quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões retiradas após a realização deste trabalho sendo também apresentadas sugestões para possíveis desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

Estado da arte

Neste capítulo é apresentado o levantamento bibliográfico dos conversores CC/CC adequados ao tema em estudo nesta dissertação sendo posteriormente escolhida a topologia que melhor se adapta aos requisitos do sistema para posterior estudo ao longo deste documento.

2.1 Conversores CC/CC

Neste subcapítulo é apresentado o resultado da pesquisa bibliográfica de diversas topologias de conversores CC/CC onde se incluem as vantagens e desvantagens de cada uma destas.

Após a análise de todas as topologias referenciadas é escolhida uma para posterior estudo detalhado ao longo desta dissertação.

2.1.1 *Buck-Boost*

Na figura 2.1 apresenta-se um exemplo de um conversor *buck-boost*. Esta topologia é bastante utilizada uma vez que cumpre facilmente os requisitos para ser integrada com diversos tipos de armazenamento de energia. Apresenta um rendimento elevado devido ao uso de um pequeno número de componentes.

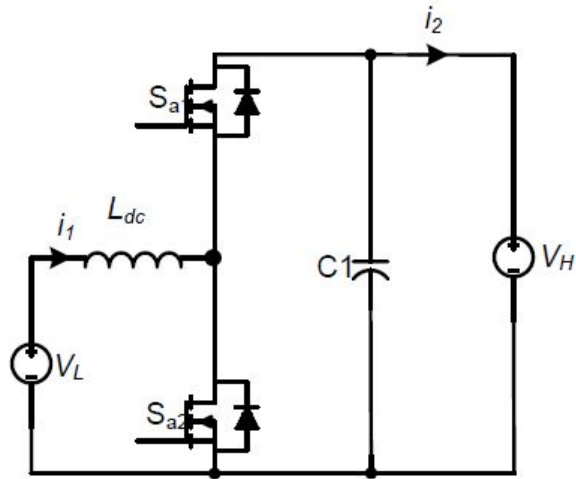


Figure 2.1 - Conversor CC/CC buck-boost [1]

Esta topologia pode ser facilmente adaptada para um sistema multifásico para lidar com maiores potências.

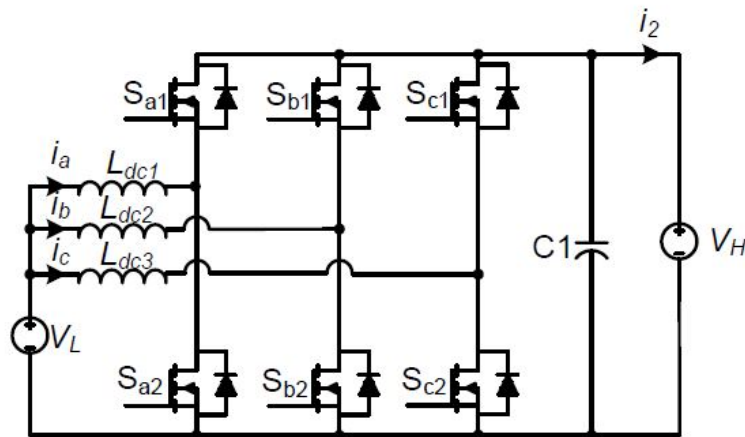


Figura 2.2 - Conversor CC/CC buck-boost trifásico [1]

Utilizando este conversor trifásico a frequência da corrente na saída vai aumentar proporcionalmente ao aumento de fases, reduzindo o *ripple* e possibilitando o uso de condensadores e bobinas de menores dimensões.

A topologia *buck-boost* apresenta a desvantagem de não possuir isolamento para a carga.

2.1.2 Flyback

Esta topologia é constituída por um transformador de alta frequência, por dois interruptores, um em cada lado do transformador e também por dois condensadores.

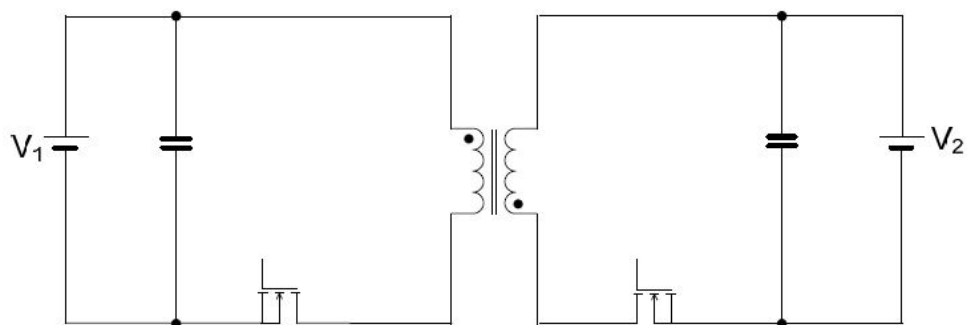


Figura 2.3 - Conversor CC/CC flyback [2]

Este conversor armazena energia no transformador durante o tempo em que o transístor do enrolamento primário está *ON* e transfere essa energia para o secundário quando o transístor passa a *OFF*. Este conversor não é adequado para aplicações de elevada potência devido ao reduzido número de semicondutores que faz com que a corrente em cada um deles seja muito elevada.

2.1.3 Meia-Ponte

A topologia do conversor meia-ponte tradicional pode ser vista na figura 2.4.

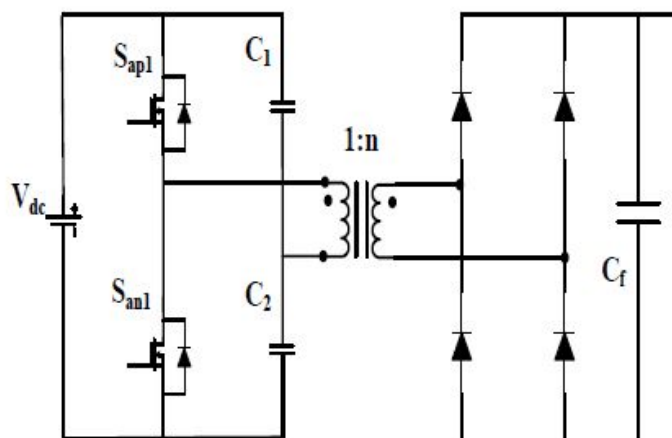


Figura 2.4 - Conversor CC/CC em meia-ponte [1]

Nesta topologia a potência é transferida do lado primário para a carga. O circuito em meia-ponte tem a vantagem de utilizar um menor número de componentes, mas, por outro lado, cada um dos transístores tem que aguentar com o dobro da corrente comparando com outras topologias. Existe também o problema de desbalanciamento da tensão nos condensadores.

Ao substituir os díodos no lado do secundário por transístores obtém-se um conversor em meia-ponte bidirecional, como se pode ver na figura 2.5.

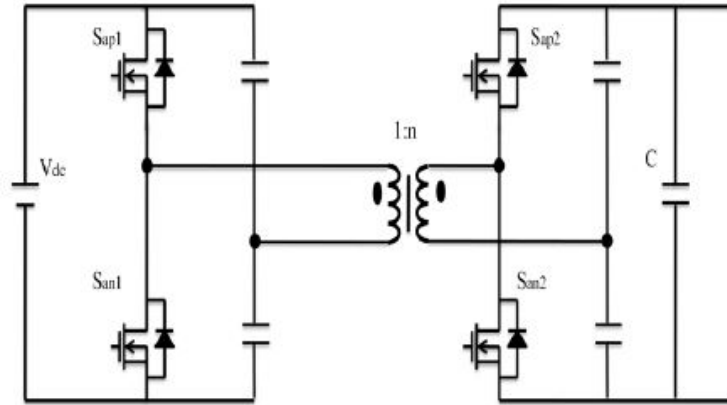


Figura 2.5 - Conversor CC/CC em meia-ponte bidirecional [1]

O fluxo de potência pode ser controlado desfasando as tensões nos dois lados do transformador.

Foi também encontrada referência a um conversor em meia-ponte alimentado a corrente no lado do primário. Podemos ver o seu esquema na figura 2.6.

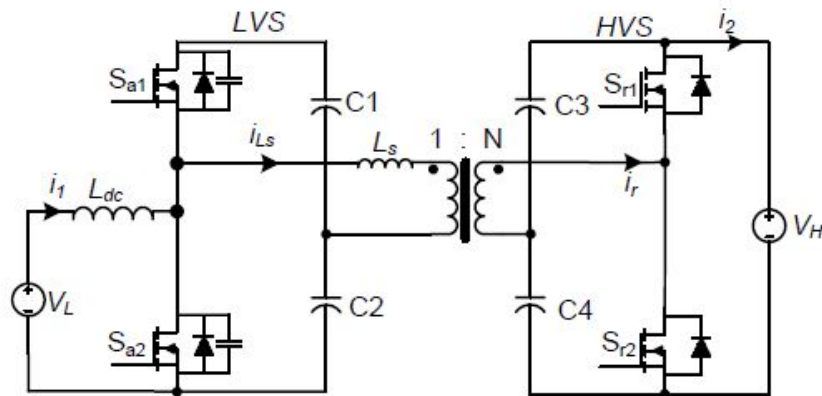


Figura 2.6 - Conversor CC/CC em meia-ponte alimentado a corrente [2]

Esta topologia é aconselhada para baixas potências já que, devido ao reduzido número de semicondutores, a corrente a transportar por cada um vai ser elevada.

2.1.4 Dual Active Bridge monofásico

A topologia do conversor em ponte completa tradicional pode ser visualizada na figura 2.7.

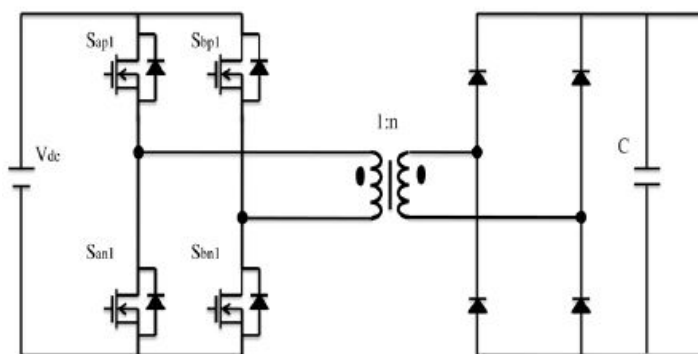


Figura 2.7 - Conversor CC/CC em ponte completa [1]

Este conversor pode ser operado variando o *duty-cycle* ou o ângulo entre fases para controlar a potência que circula de, ou para, a carga. Adicionalmente é possível obter comutações com tensão nula para certos valores de carga e de tensão de entrada, o que reduz significativamente ou até elimina as perdas de comutação, o que aumenta bastante o rendimento do conversor.

Substituindo, uma vez mais, os díodos do secundário por transístores obtém-se um conversor bidirecional, como se pode ver na figura 2.8.

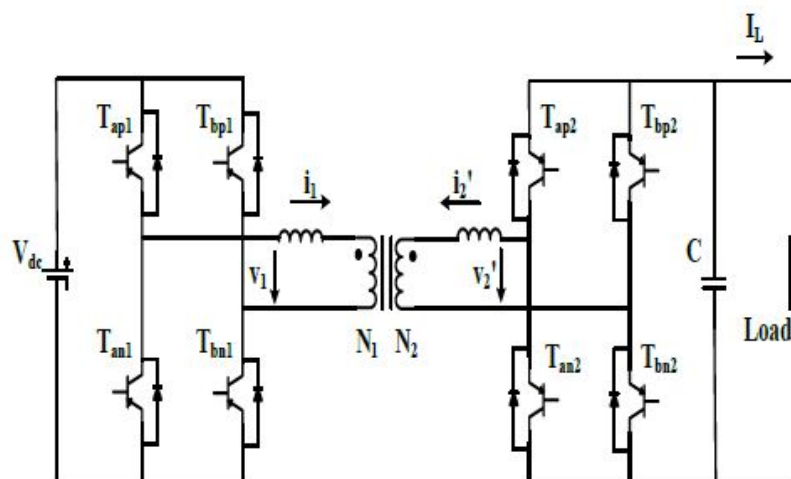


Figura 2.8 - Conversor CC/CC Dual Active Bridge (DAB) [1]

Esta topologia é apelidada de *Dual Active Bridge*. Dois circuitos em ponte completa são aplicados no lado do primário e do secundário de um transformador de alta frequência. Este transformador, por ser de alta frequência, apresenta um tamanho reduzido, quando comparado com transformadores de baixa frequência. A sua indutância de fugas é o elemento utilizado para a transferência de energia.

Comparando com a topologia em meia-ponte verifica-se que cada transístor está apenas sujeito a metade da corrente. Tanto a ponte do lado do primário como a ponte do lado do secundário podem operar variando o *duty-cycle* ou o ângulo entre fases e assim obter o trânsito de potência desejado e de acordo com as necessidades do sistema.

Em [1] é explorada esta topologia com alimentação em corrente como mostrado na figura 2.9.

O transistor adicional, juntamente com o condensador, permite ao conversor operar em modo de comutação suave. Quando o conversor funciona em modo *buck* as comutações dos transistores alimentados a tensão são feitas com tensão e corrente nulas, por forma a reduzir as perdas de comutação, enquanto o lado alimentado a corrente opera como retificador síncrono para reduzir as perdas de condução. Quando o conversor funciona em modo *boost* os transistores alimentados a corrente comutam com tensão nula e os alimentados a tensão operam em modo de retificador síncrono.

Com esta topologia é conseguida uma grande eficiência para uma vasta gama de tensões. De notar que, devido ao controlo ser diferente quando o conversor opera em modo *boost* ou *buck*, o controlo se torna mais complexo.

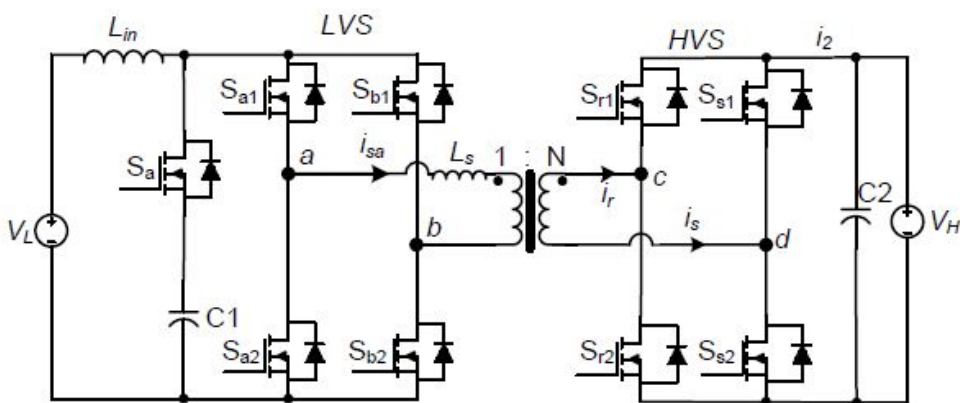


Figura 2.9 - Conversor CC/CC DAB alimentado a corrente [1]

2.1.5 Dual Active Bridge trifásico

Aplicações com maior potência requerem a utilização de conversores multifásicos para assim serem capazes de lidar com maiores correntes.

A figura 2.10 representa um conversor CC/CC trifásico. Este é composto por um inversor trifásico acoplado a um transformador trifásico de alta frequência assim como por uma ponte de retificação, no entanto este conversor não é bidirecional.

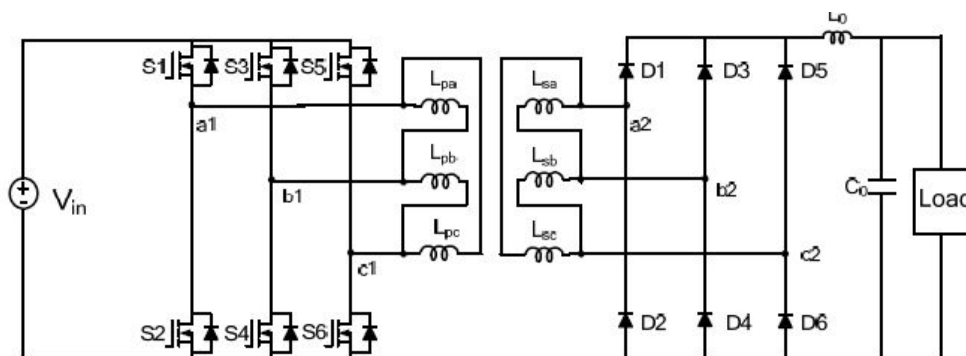


Figura 2.10 - Conversor CC/CC trifásico [1]

Para se conseguir que o trânsito de potência seja bidirecional é necessário substituir os díodos da ponte de retificação por transistores.

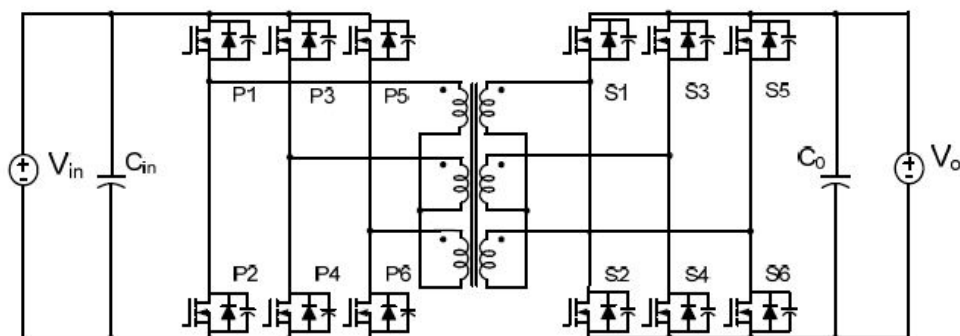


Figura 2.11 - Conversor CC/CC dual active bridge trifásico [1]

Esta topologia apresenta diversas vantagens quando comparadas com as anteriormente apresentadas. Ao ter um maior número de fases a corrente por fase vai ser menor logo os semicondutores vão estar sob menos *stress*. Com esta configuração a frequência da corrente na saída vai aumentar proporcionalmente ao aumento de fases, reduzindo o *ripple* e possibilitando o uso de condensadores de menores dimensões na etapa de filtragem do sinal. Como desvantagem podemos destacar o uso de um maior número de componentes, quando comparado com as topologias anteriores.

Em [1] é também explorada uma variante deste conversor alimentado a corrente no lado do primário. Isto é conseguido adicionando uma bobina ao circuito, como se pode ver na figura 2.12.

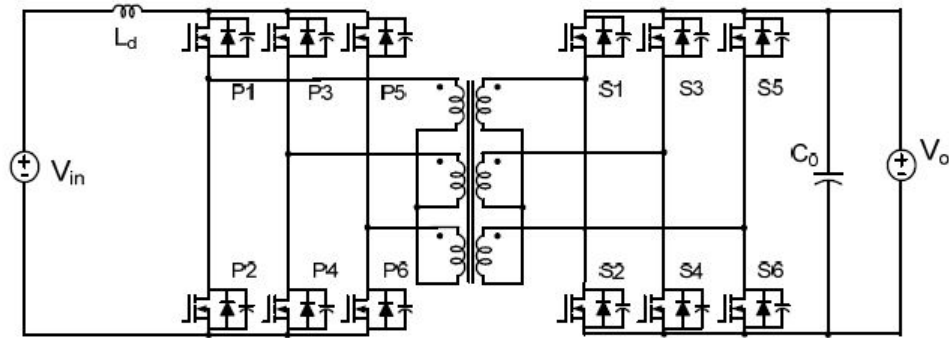


Figura 2.12 - Conversor CC/CC dual active bridge trifásico com fonte de corrente [1]

2.2 Topologia proposta

A topologia do conversor escolhida para estudo nesta dissertação foi a topologia Dual Active Bridge.

Fatores como o isolamento galvânico para as baterias, a capacidade de funcionamento em modo buck ou boost, a capacidade de trânsito de potência bidirecional e a possibilidade de operação em soft-switching estiveram na base desta decisão.

Dentro da topologia Dual Active bridge foi escolhida a versão monofásica devido à utilização de um menor número de componentes face à versão trifásica.

Neste contexto apresenta-se ao longo deste documento o estudo deste conversor.

Capítulo 3

Modelo e controlo do sistema

Nesta dissertação pretende-se estudar o funcionamento de um conversor capaz de gerir a carga e descarga de baterias para armazenamento de energia numa central fotovoltaica. Pode-se considerar o sistema em estudo como sendo o conjunto do conversor, da bateria e do barramento CC dos painéis fotovoltaicos. O esquema geral da ligação deste sistema apresenta-se na figura 3.1.

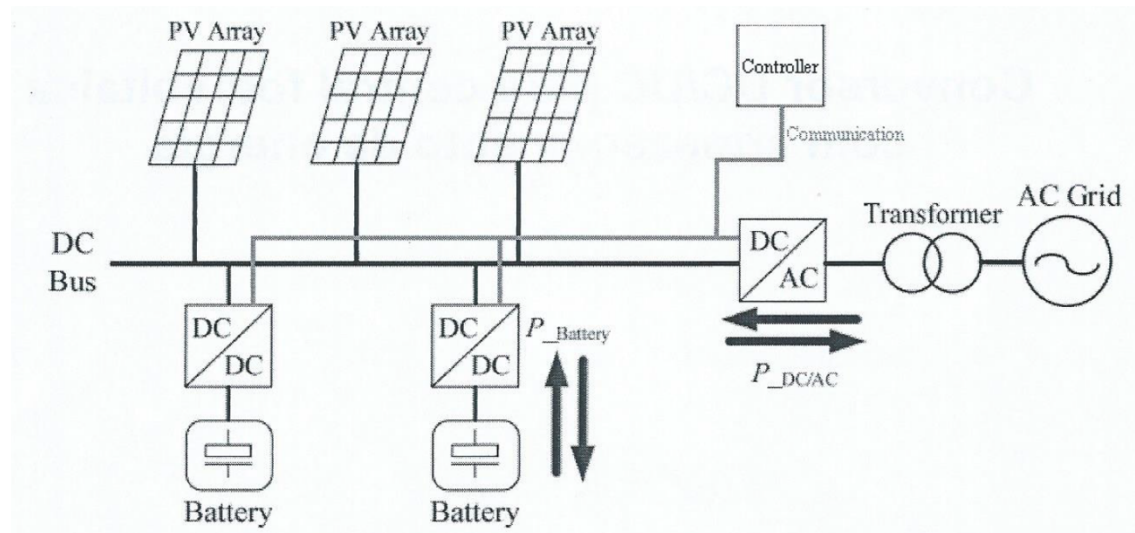


Figura 3.1 - Esquema de ligação do sistema global

Assim sendo, para proceder ao estudo do conversor e do seu funcionamento com as baterias é necessário obter modelos matemáticos que permitam simular o seu funcionamento em ambiente computacional.

No primeiro subcapítulo apresenta-se o modelo do conversor, fazendo-se a sua análise para funcionamento em *steady-state*, assim como se apresentam as condições para *soft-switching*.

No segundo subcapítulo apresenta-se um modelo para a bateria através da adaptação do modelo existente no *software Matlab/Simulink*.

No terceiro e quarto subcapítulos apresentam-se os circuitos de comando e controlo do conversor, respetivamente.

3.1 Modelo do conversor

Neste subcapítulo pretende-se obter um modelo do conversor *Dual Active Bridge*.

Numa primeira parte é analisado o design da topologia assim como são explicados os seus princípios básicos.

Seguidamente é explorado o seu funcionamento em *steady-state*. Apresentam-se circuitos equivalentes através dos quais é possível extrair as mais básicas formas de onda assim como as expressões que nos permitem caracterizar esta topologia no domínio da matemática.

Por último são também definidos os limites para a operação em *soft-switching*.

3.1.1 Introdução

Tal como definido no capítulo anterior o conversor escolhido para estudo durante esta dissertação foi o conversor *Dual Active Bridge*. Originalmente proposto por Khereluwala em [5-6] o conversor DAB insere-se no grupo de conversores CC/CC bidirecionais. Consiste em duas pontes completas, com interruptores ativos, interligadas por um transformador de alta frequência, permitindo que o fluxo de potência se dê nos dois sentidos e que o conversor funcione em modo *buck* ou *boost*.

O método mais comum de controlo, e o que irá ser utilizado no decorrer desta dissertação, consiste em controlar as duas pontes com ondas de *duty-cycle* constante de 50% para que se gere aos terminais do transformador, do lado a que está ligada, uma onda quadrada de alta frequência. Tendo em conta a presença da indutância de fugas do transformador, as duas ondas quadradas geradas pelas duas pontes podem ser controladas de forma a serem desfasadas e assim ser possível controlar o fluxo de potência entre os dois terminais CC. A potência circula no sentido da ponte com a onda quadrada em avanço para a ponte com a onda quadrada em atraso, sendo assim possível obter a bidireccionalidade. Este método é denominado “*phase-shifting*”, sendo o seu estudo aprofundado durante o capítulo 4.

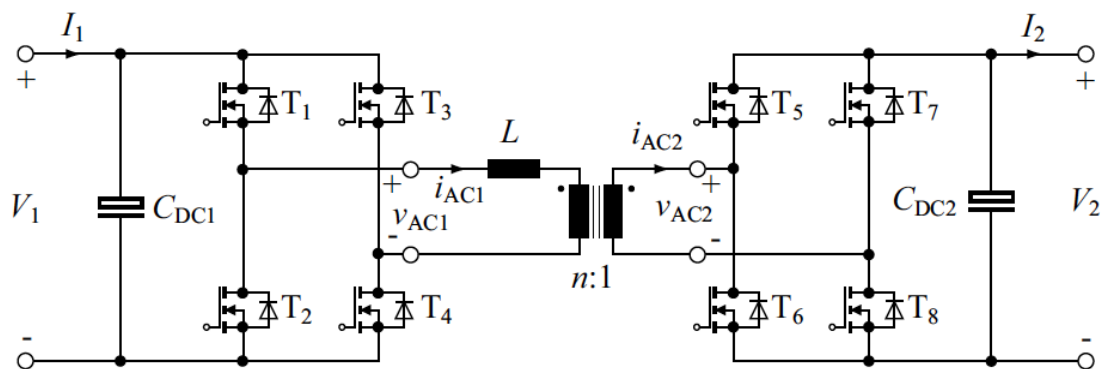


Figura 3.2 - Esquemático do conversor Dual Active Bridge [7]

Para melhor se perceber o princípio de funcionamento deste conversor este pode ser reduzido ao seu modelo fundamental com duas fontes a gerar ondas quadradas ligadas através de uma indutância. Podemos ver este modelo na figura 3.3, apresentada em [7]

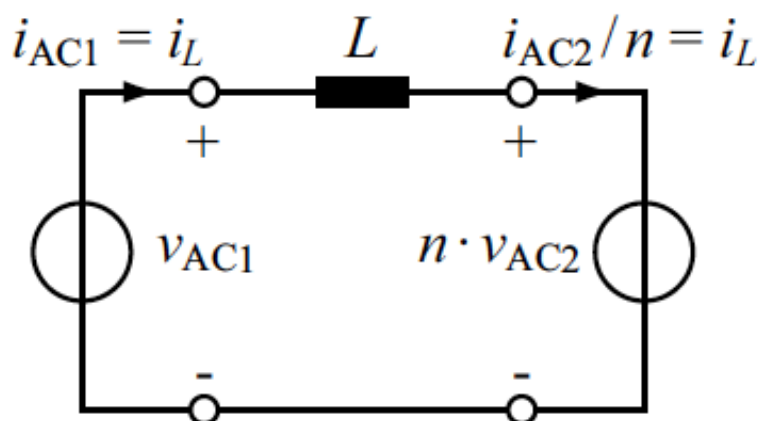


Figura 3.3 - Modelo fundamental do conversor DAB [7]

Esta simplificação tem em conta que:

- Todas as perdas são ignoradas,
- A indutância de magnetização do transformador assim como as capacidades parasitas são ignoradas.

3.1.2 Análise em *steady-state*

O desenvolvimento de um modelo para o conversor será realizado através da análise do seu funcionamento em *steady-state*. A análise em *steady-state* consiste em verificar o funcionamento do conversor para cada um dos seus estados e será realizada observando o as principais formas de onda do conversor que se apresentam na figura 3.4.

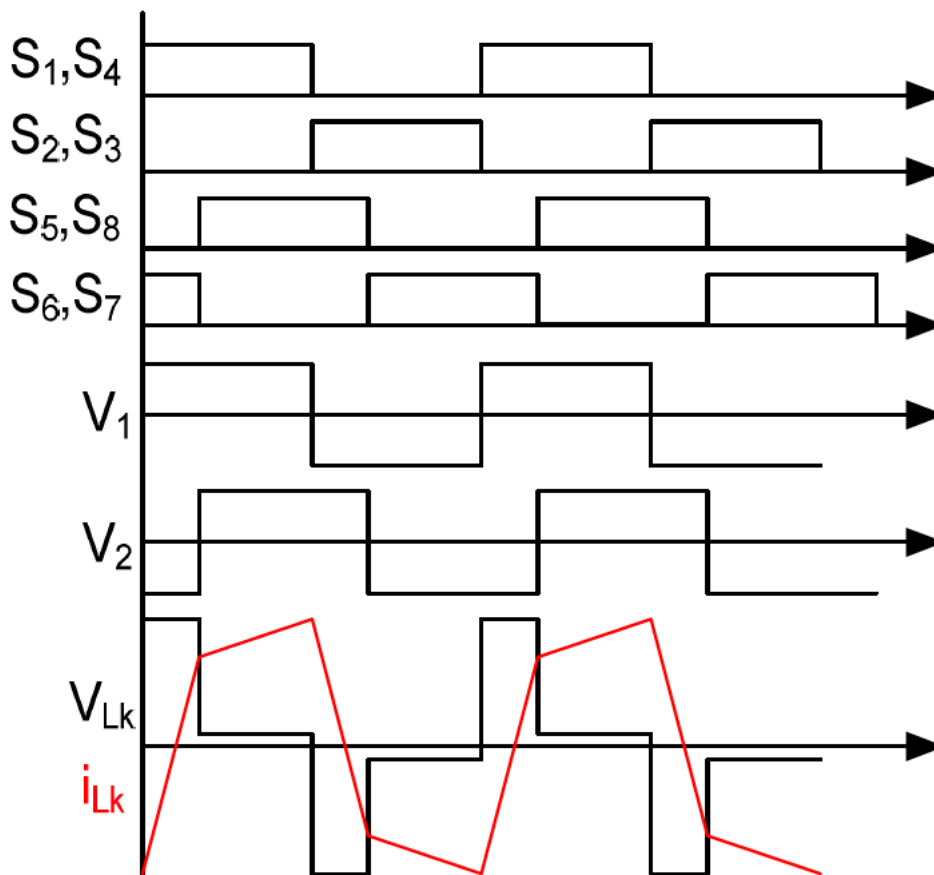


Figura 3.4 - Principais formas de onda do conversor Dual Active Bridge [8]

Na figura 3.4 podem ser vistas as principais formas de onda do circuito. Mais uma vez considera-se que não existem perdas no circuito e todas as formas de onda são ideais. A primeira ponte é constituída por T1, T2, T3 e T4 (S1, S2, S3 e S4 na figura 3.2) e a segunda ponte por T5, T6, T7 e T8 (S5, S6, S7 e S8 na figura 3.2). Os sinais que comandam T1 e T4 são iguais, assim como são iguais os sinais que comandam T2 e T3. Os sinais T1 e T2 são complementares e com um *duty-cycle* de 50%. Assim, obtém-se no lado primário do transformador a tensão V_{ac1} , de valor igual a $\pm V_1$.

$$v_{AC1} = \begin{cases} +V_1 & \text{para o estado I:} & T_1, T_4 \text{ on}, T_2, T_3 \text{ off} \\ 0 & \text{para o estado II:} & T_1, T_3 \text{ on}, T_2, T_4 \text{ off} \\ 0 & \text{para o estado III:} & T_2, T_4 \text{ on}, T_1, T_3 \text{ off} \\ -V_1 & \text{para o estado IV:} & T_2, T_3 \text{ on}, T_1, T_4 \text{ off} \end{cases}$$

De igual modo, do lado secundário do transformador, obtém-se a tensão V_{ac2} , de valor igual a $\pm V_2$.

$$v_{AC2} = \begin{cases} +V_2 & \text{para o estado I:} & T_5, T_8 \text{ on}, T_6, T_7 \text{ off} \\ 0 & \text{para o estado II:} & T_5, T_7 \text{ on}, T_6, T_8 \text{ off} \\ 0 & \text{para o estado III:} & T_6, T_8 \text{ on}, T_5, T_7 \text{ off} \\ -V_2 & \text{para o estado IV:} & T_6, T_7 \text{ on}, T_5, T_8 \text{ off} \end{cases}$$

Assim sendo, a tensão $v_R(t)$ que se obtém aos terminais da indutância de fugas do transformador é dada pela expressão,

$$v_R(t) = v_{AC1}(t) - nv_{AC2}(t), \quad (3.1)$$

que irá gerar a corrente i_L , dada pela expressão

$$i_L(t_1) = i_L(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^{t_1} v_R dt \quad \forall \quad t_0 < t_1, \quad (3.2)$$

no instante t_1 , existindo uma corrente inicial de valor $i_L(t_0)$ no instante t_0 .

A potência instantânea gerada ou consumida por cada uma das pontes é

$$p_1(t) = v_{AC1}(t) * i_L(t) \quad (3.3)$$

$$p_2(t) = nv_{AC2}(t) * i_L(t). \quad (3.4)$$

Já a potência média ao longo de um período T_s , $T_s=1/f_s$, é

$$P_1 = \frac{1}{T_s} \int_{t_0}^{t_0+T_s} p_1(t) dt \quad (3.5)$$

$$P_2 = \frac{1}{T_s} \int_{t_0}^{t_0+T_s} p_2(t) dt, \quad (3.6)$$

para a ponte primária e secundária, respetivamente.

Uma vez que durante a operação em *steady-state* as tensões $v_{AC1}(t)$ e $v_{AC2}(t)$ e a corrente no indutor se repetem a cada meio ciclo com polaridade oposta e uma vez que o desfasamento e o valor das tensões contínuas V_1 e V_2 não se alteram durante um ciclo, apenas é necessário considerar a operação durante a primeira metade do ciclo. Obtém-se assim, para $t_0=0$

$$P_1 = \frac{2}{T_s} \int_0^{T_s/2} v_{AC1}(t) * i_L(t) dt = \frac{2V_1}{T_s} \int_0^{T_s/2} i_L(t) dt. \quad (3.7)$$

Para se obter o valor de P_1 é necessário saber o valor de $i_L(t)$. O cálculo desta expressão será realizado individualmente para cada um dos estados I, II, III e IV, uma vez que durante os intervalos de tempo em que cada um destes está ativo as tensões $v_{AC1}(t)$ e $v_{AC2}(t)$ são constantes, sendo mais fácil obter valores para as expressões. Dado que para $0 < t < T_s/2$ apenas os estados I e II estão ativos os restantes não irão ser considerados.

Assumindo um desfasamento positivo, $0 < \phi < \pi$, as expressões resultantes para a corrente no indutor são:

- Durante o estado I: $i_L(t) = i_{L,0} + (V_1 + nV_2) t/L \quad \forall \quad 0 < t < T_\phi,$
- Durante o estado II: $i_L(t) = i_L(T_\phi) + (V_1 - nV_2) (t - t_1)/L \quad \forall \quad T_\phi < t < T_s/2.$

Devido à simetria entres as duas metades do ciclo e com $T_\phi = \phi/(2\pi f_s)$,

$$i_{L,0} = \frac{\pi * (nV_2 - V_1) - 2\phi nV_2}{4\pi f_s L} \quad (3.8)$$

é válido para defasamentos positivos, $0 < \phi < \pi$, e um resultado semelhante pode ser obtido para defasamentos negativos, $-\pi < \phi < 0$.

Com (3.7), e reformulando para que seja válida para defasamentos positivos e negativos, a potência transferida é dada por

$$P = P_1 = P_2 = \frac{n * V_1 * V_2 * \phi(\pi - |\phi|)}{2\pi^2 f_s L} \quad \forall \quad -\pi < \phi < \pi \quad (3.9)$$

onde,

- $P > 0$ indica que a potência circula da ponte primária para a ponte secundária
- $P < 0$ indica que a potência circula da ponte secundária para a ponte primária

A transferência máxima de potência dá-se quando $\partial P / \partial \phi = 0$, sendo a solução

$$|P_{max}| = \frac{n * V_1 * V_2}{8f_s L} \quad (3.10)$$

com $\phi = \pm \pi/2$.

Esta fórmula permite obter o valor máximo de L no transformador para uma determinada potência que se pretenda transferir.

3.1.3 Condições para *soft-switching*

Um das vantagens do conversor DAB é a capacidade de operar em *soft-switching*, isto é, o conversor tem a capacidade de realizar as comutações quando a tensão nos semicondutores é zero. Isto faz com que as perdas por comutação sejam eliminadas.

Surge assim a necessidade de investigar quais as condições para que o conversor opere em *soft-switching*.

Para que isto aconteça as seguintes condições têm que ser verificadas:

- $I_1 > 0$
- $I_2 > 0$

Os limites para o defasamento, em percentagem, sendo $M = v_o / (n v_i)$, são definidos por

$$d > \frac{M - 1}{2M} \quad \text{se } M \geq 1 \quad (3.11)$$

$$d < \frac{1 - M}{2} \quad \text{se } M \leq 1 \quad (3.12)$$

Apresenta-se o gráfico destas expressões na figura 3.5.

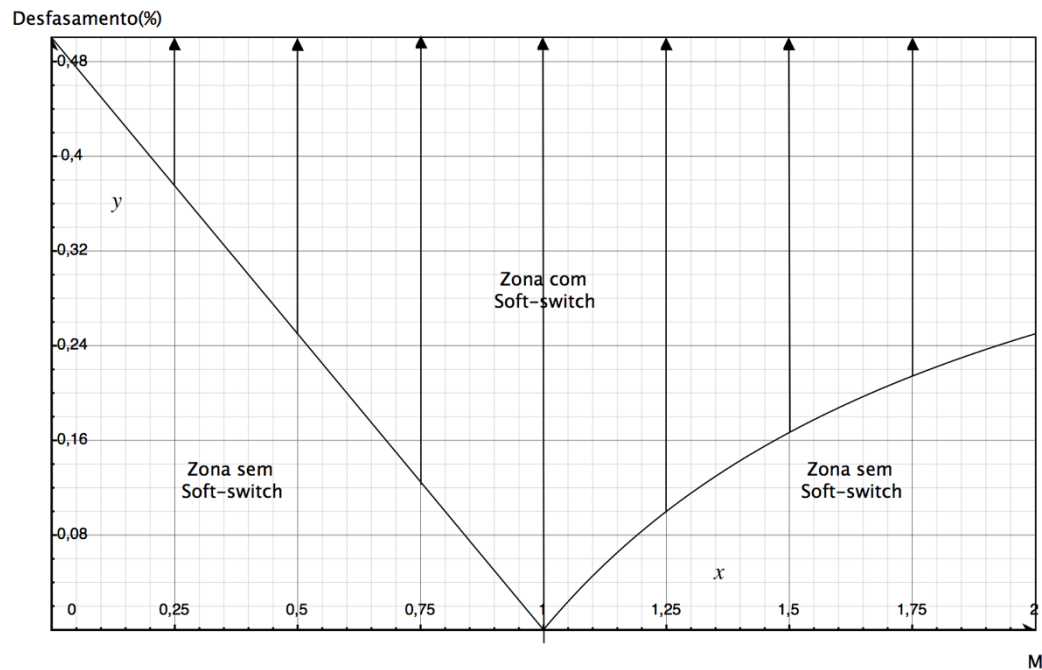


Figura 3.5 - Limites para a operação em soft-switching

Através da análise ao gráfico conclui-se que se M for igual a 1 a condição de *soft-switching* se verifica para qualquer valor de desfasamento. Contudo, se $M \neq 1$ irá sempre haver um valor mínimo para o *duty-cycle* que limita a área de *soft-switching*. Torna-se assim importante, no momento do desenho do transformador, escolher um valor de n que faça com que M tome o valor 1 ou se aproxime o máximo deste valor.

É também possível perceber que para desfasamentos de 50%, ou seja, para situações em que o conversor funcione à potência máxima, seja qual for o valor de M a condição de *soft-switching* é sempre verificada.

3.2 Modelo da Bateria

Neste subcapítulo pretende-se obter um modelo para as baterias.

Numa primeira parte é feita uma introdução começando por explicar a importância deste modelo para o caso em estudo.

Seguidamente é feita uma adaptação do modelo existente no software Simulink com o objetivo de se obter um modelo em PSIM.

3.2.1 Introdução

Nesta dissertação pretende-se estudar o funcionamento de um conversor capaz de gerir a carga e descarga de baterias para armazenamento de energia numa central fotovoltaica.

Pode observar-se que o conversor está ligado de um dos lados ao barramento de corrente contínua dos painéis fotovoltaicos e do outro lado às baterias.

Sendo a bateria um dos principais componentes do sistema e tendo um papel de enorme relevância para o comportamento do conversor surge a necessidade de envolver nas simulações a realizar, um modelo que simule o comportamento que as baterias irão apresentar com o decorrer da sua carga e descarga.

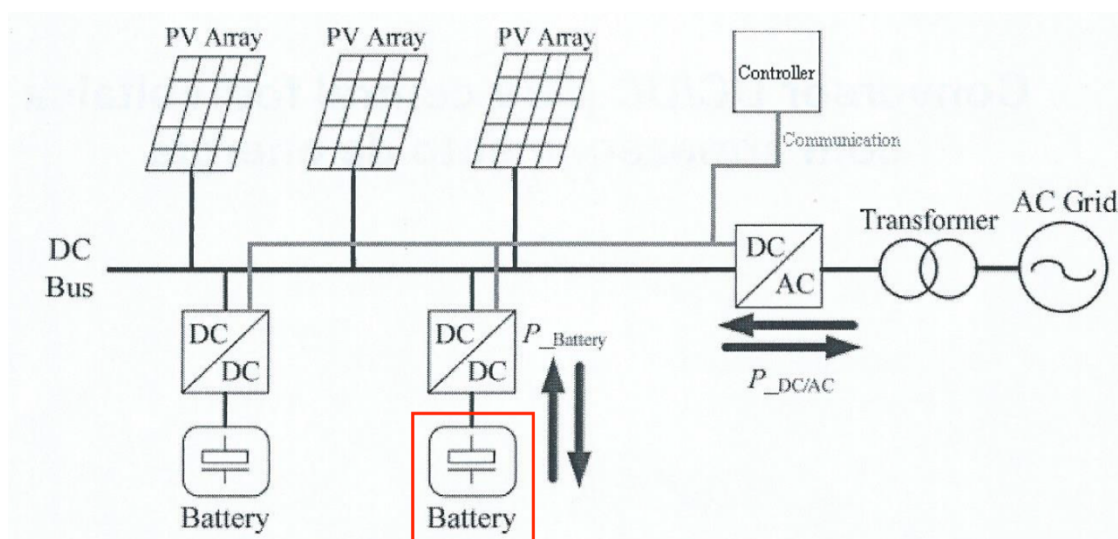


Figura 3.6 - Esquema de ligação do sistema global com ênfase no componente em análise

Para o caso em estudo as características mais relevantes a simular através do modelo serão a alteração da tensão das baterias aos seus terminais assim como o seu estado de carga. A inclusão deste modelo neste estudo é bastante importante uma vez que se pretende desenvolver um algoritmo capaz de gerir a carga e descarga das baterias e, não tendo presente este modelo, seria impossível verificar o seu correto funcionamento pois este depende da variação da tensão da bateria assim como do seu estado de carga. É, pois, importante a inclusão de um modelo que simule esses parâmetros à medida que a energia for transferida para a bateria.

Uma vez que o software PSIM, onde foi estudado o modelo do conversor, não dispõe de nenhum modelo de baterias, foi definido como objetivo desta dissertação a criação de um modelo simples que permitisse simular a alteração da tensão na ponte secundária do conversor dependendo do estado de carga das baterias.

Para tal foi estudado o modo de funcionamento do modelo presente no software MATLAB e, posteriormente, feita uma adaptação simplista desse modelo para PSIM.

A análise ao modelo do software MATLAB e a posterior implementação de um modelo simplificado em PSIM apresenta-se no subcapítulo seguinte.

3.2.2 Análise e adaptação do modelo MATLAB

O software MATLAB oferece como solução um modelo capaz de simular com exatidão o comportamento de baterias. Este modelo permite a simulação de vários tipos de baterias, sendo elas as do tipo *Lead-Acido*, as do tipo *Lithium-Ion*, as do tipo *Nickel-Cadmium* e as do tipo *Nickel-Metal-Hydrite*.

O circuito equivalente apresentado para as baterias pode ser visto na figura 3,7.

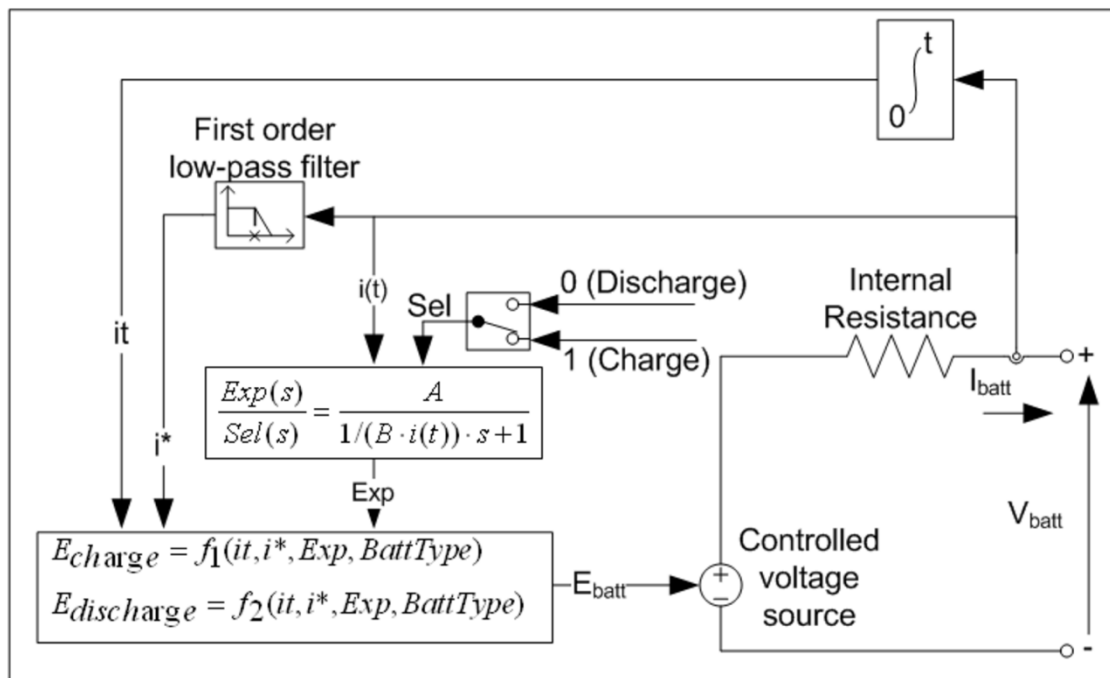


Figura 3.7 - Circuito equivalente do modelo de baterias existente no MATLAB [9]

Simplificando este circuito podemos assumir que a bateria é representada pela sua resistência interna e por uma fonte regulada de tensão. A fonte regulada de tensão vai ser comandada em função do estado de carga das baterias que é obtido através do integral da corrente que circula nas baterias, I_{batt} na figura 3.7.

Semelhante circuito pode ser visto na biblioteca Simulink do MATLAB, quando aberto o modelo da bateria.

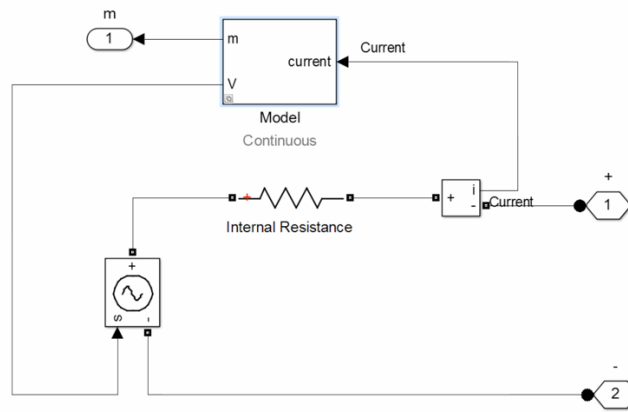


Figura 3.8 - Modelo da bateria em SIMULINK

O objetivo para esta parte da dissertação é obter um bloco mais simplificado do bloco apresentado na figura 3.8 sob o nome “*Model Continuous*”, bloco esse que gera o sinal de controlo para a fonte de tensão. A figura 3.9 apresenta o circuito desse bloco para que se possa fazer a sua análise.

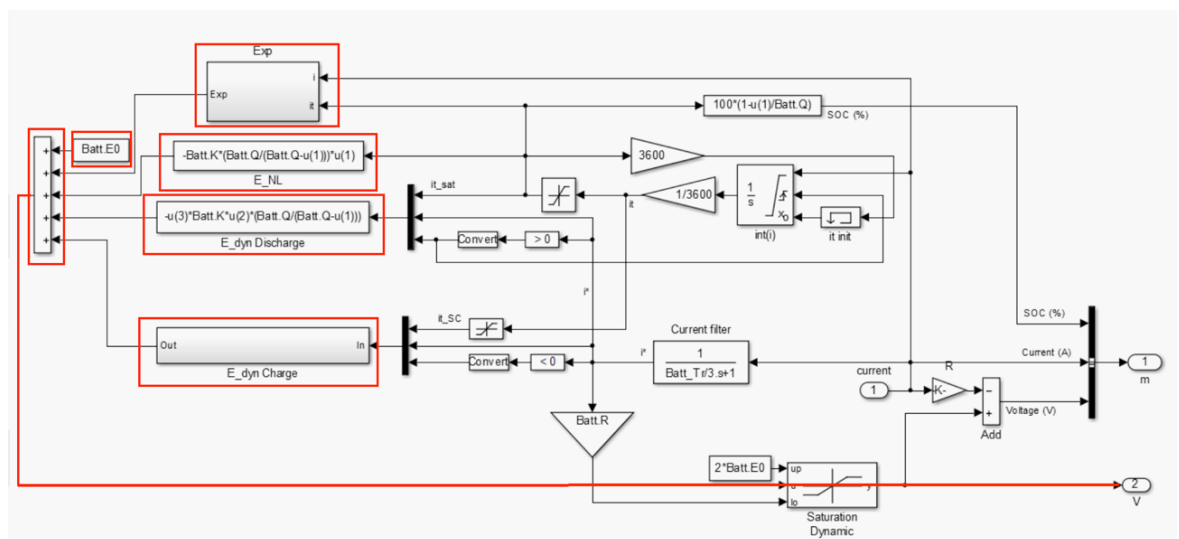


Figura 3.9 - Expansão do bloco “*Model Continuous*” do modelo da bateria em SIMULINK

Observa-se pela figura, na parte destacada a vermelho, que a saída da tensão é obtida através da soma de cinco parcelas, *Batt.E0*, *Exp*, *E_NL*, *E_dyn Discharge* e *E_dyn Charge*. Para melhor se perceber a que se referem cada uma destas parcelas atente-se ao gráfico da descarga de uma bateria genérica representado na figura 3.10.

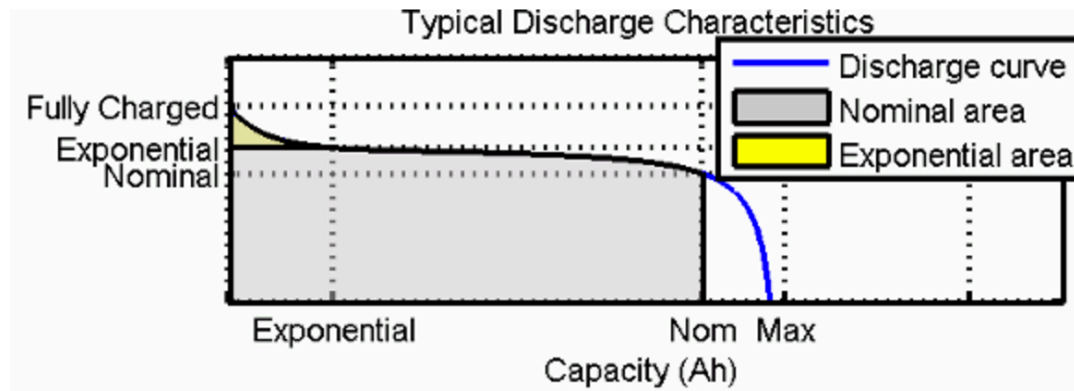


Figura 3.10 - Gráfico de descarga de uma bateria genérica [9]

Neste gráfico observa-se que existem três zonas distintas na curva de tensão de uma bateria. A primeira zona é a exponencial, onde se verifica uma descida exponencial da tensão quando se descarrega uma bateria que se encontra totalmente carregada. Esta área pode ser maior ou menor consoante o tipo de bateria. A segunda zona é a de tensão nominal, que se verifica durante a maior parte do estado de carga da bateria. Por último a terceira zona, onde a tensão da bateria desce rapidamente, quando a bateria está a ficar sem carga.

Voltando agora à figura 3.9, é possível verificar que a parcela $Batt.E0$ representa a tensão nominal da bateria, a parcela Exp representa a zona exponencial e a parcela E_{NL} representa a curva de descarga das baterias.

Das cinco parcelas do somatório restam apenas $E_{dyn Discharge}$ e $E_{dyn Charge}$. Por se tratarem de expressões que simulam com exatidão o comportamento de diferentes tipos de baterias em regime dinâmico e por tal exatidão não ser relevante para o estudo do conversor nesta dissertação, estes parâmetros serão ignorados no modelo que se pretende criar em PSIM. Conclui-se então que a tensão será dada pelo somatório das três restantes parcelas. Dado que o valor de $Batt.E0$ é conhecido pelas folhas de características da bateria a utilizar resta perceber como são calculados os valores de Exp e E_{NL} .

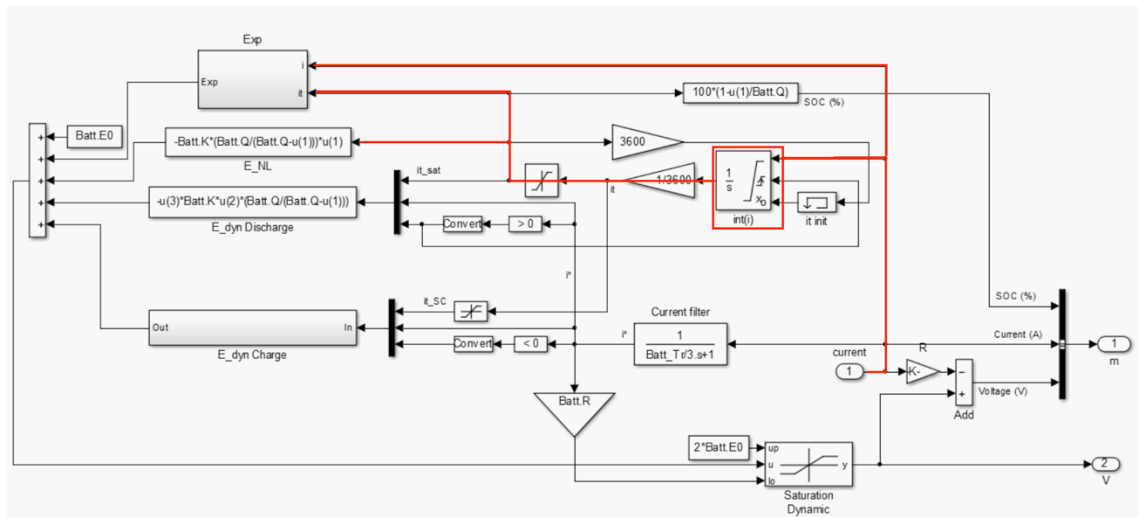


Figura 3.11 - Expansão do bloco “Model Continuous” do modelo da bateria em SIMULINK destacando as ligações em estudo

Analisando a parte destacada a vermelho na figura 3.11, e procurando simplificar o processo, verifica-se que ambos os parâmetros recebem como input o valor do integral da corrente nas baterias, sendo que o bloco *Exp* recebe também o próprio valor da corrente. Tal vai de encontro ao circuito equivalente referenciado no início deste subcapítulo na figura 3.7. Sabendo o valor do integral da corrente obtém-se o valor de E_{NL} através das restantes características da bateria a utilizar.

O último passo será analisar o bloco *Exp*. Pode observar-se o circuito que se encontra nesse bloco na figura 3.12.

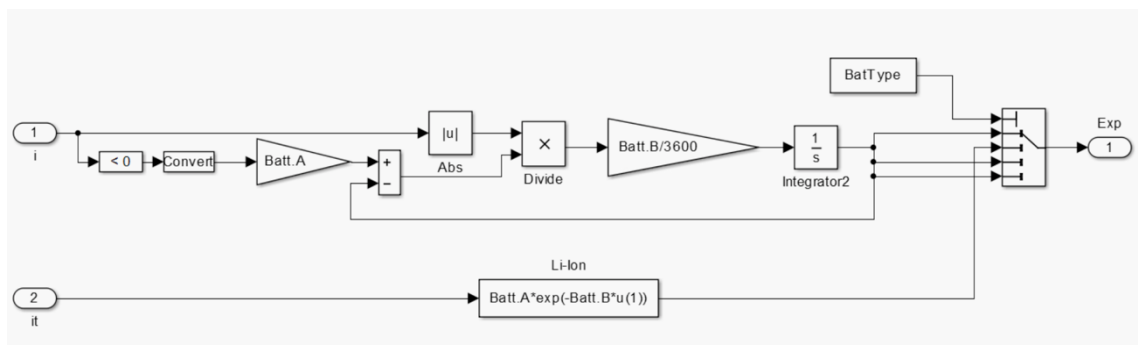


Figura 3.12 - Expansão do bloco *Exp* do modelo de baterias do SIMULINK

Verifica-se que o cálculo do valor de *Exp* difere consoante o tipo da bateria a utilizar, tal reforça o que foi dito anteriormente, a zona exponencial pode ser maior ou menor dependendo do tipo de bateria. De referir que a bateria do tipo *Lithium-Ion* é a única que difere das restantes entre as que é possível representar com este modelo.

Analisado todo o processo construiu-se no software Psim, utilizando as funções e blocos existentes, um modelo capaz de simular o comportamento de baterias, sendo que estas podem ser de vários tipos. O circuito implementado encontra-se na figura 3.13.

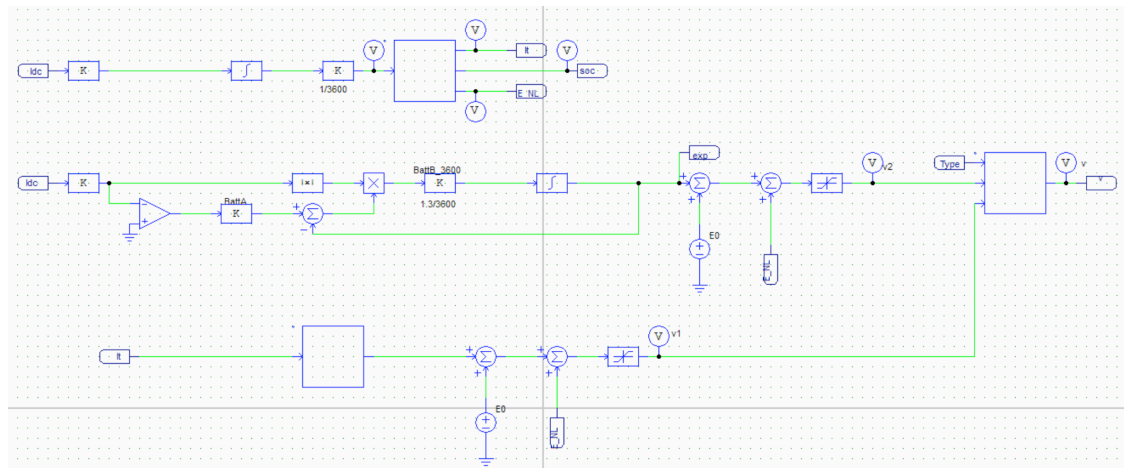


Figura 3.13 - Modelo da bateria implementado em PSIM

Na primeira linha de blocos é calculado o integral da corrente i , através desse valor, é obtido E_{NL} assim como o valor de It , que representa a quantidade de energia extraída da bateria.

A segunda e terceira linhas de blocos diferem entre si no modo como calculam o valor de Exp . A terceira linha é para o caso da bateria ser de *Lithium-Ion* e a segunda para os restantes casos. Em ambas esse valor é calculado e de seguida somado aos valores de $Batt.E0$ ($E0$ na figura 3.13) e de E_{NL} .

O bloco que agrupa a segunda e terceira linhas servirá para fazer a seleção do valor a apresentar consoante o tipo de baterias. Se for de *Lithium-Ion* apresenta o valor da terceira linha caso contrário apresenta o valor da segunda linha.

3.3 Circuito de comando

O método de comando mais utilizado na topologia DAB é o método *phase-shifting*. Este método consiste em controlar cada uma das pontes do conversor com uma onda de *duty-cycle* igual a 50% e frequência constante, havendo um desfasamento entre a onda da ponte primária e a onda da ponte secundária. Este método tem a vantagem de ser de fácil controlo uma vez que apenas se tem que variar o desfasamento para controlar a potência transferida. A potência máxima transferida ocorre quando o desfasamento é de +90 ou -90 graus sendo nula quando o desfasamento é zero.

Sabendo que o circuito de comando recebe como referência do circuito de controlo um valor entre -90 e +90 é necessário existir um circuito capaz de traduzir esta referência em graus para um desfasamento entre duas ondas quadradas.

Para implementar o circuito que gera as ondas quadradas desfasadas foi criado um bloco de linguagem C no Psim.

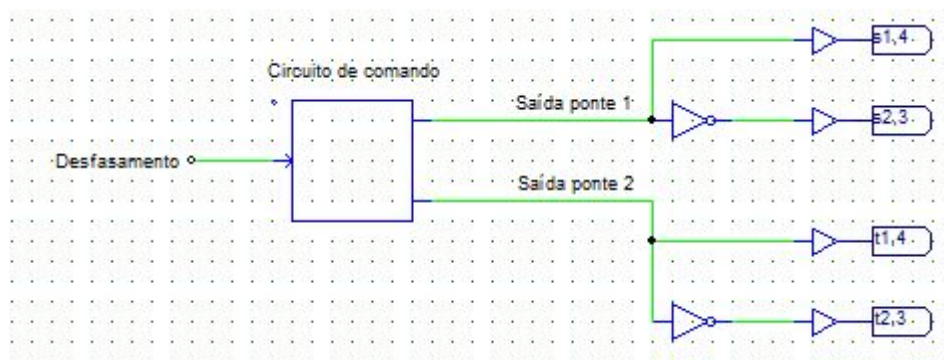


Figura 3.14 - Circuito de comando implementado em PSIM

Este bloco realiza uma contagem de 0 a 359, correspondendo aos 360 graus do sinal, incrementando o seu valor em uma unidade a cada ciclo. Um primeiro sinal quadrado é criado colocando a primeira saída do bloco a *ON* quando o valor da contagem for se encontrar entre 0 e 179, correspondendo a meio período, e colocando a *OFF* quando se encontrar entre 180 e 359. Para gerar o segundo sinal em função do valor recebido para o desfasamento, é necessário dividir a operação em dois modos, sendo um deles quando se pretende um desfasamento positivo e o outro quando se pretende um desfasamento negativo.

Sendo o desfasamento positivo, de valor D em graus, o segundo sinal é gerado colocando a *ON* a segunda saída do bloco quando a contagem se encontrar entre D e $D+179$ (reiniciando a contagem quando ultrapassado o valor limite), estando a saída a *OFF* no restante período.

Para o caso dos desfasamentos negativos, o valor recebido, $-D$ em graus, é convertido num valor positivo entre 270 e 359, realizando-se de seguida o mesmo método aplicado no caso anterior.

Com este circuito é possível implementar um controlo por desfasamento sendo que a resolução obtida é de 1 grau ($360^\circ/360$ ciclos).

A frequência dos sinais gerados, f_s , depende do passo de simulação utilizado, T_s , e do número de ciclos, sendo neste caso dada por

$$f_s = \frac{1}{360 * T_s} \quad (3.13)$$

Esta resolução poderia ser aumentada realizando a contagem, por exemplo, de 0 a 3600 obtendo-se uma resolução de 0,1 graus ($360^\circ/3600$ ciclos). Valores mais altos de resolução não foram escolhidos pois, ou a frequência dos sinais de comando seria menor ou o passo de simulação teria que ser mais pequeno, aumentando bastante o tempo para cada simulação. Foi assim estabelecido um compromisso entre estes valores para que fosse possível obter um resultado satisfatório para cada um deles.

3.4 Circuito de controlo

O circuito de controlo tem como objetivo a regulação do valor do desfasamento a atribuir ao circuito de comando do conversor. Esta regulação é realizada em função do valor de corrente ou de tensão que se pretende aplicar em determinado momento.

Uma vez que o objetivo do conversor é gerir a carga e descarga de uma bateria, o controlo do conversor deve ser tal que permita fornecer à bateria ou uma corrente ou uma tensão requerida, dependendo da situação de carga em que esta se encontra. Durante o descarregamento o controlo deve ser feito em corrente com base numa corrente de referência definida pelo controlador da instalação. Já durante o carregamento o controlo é realizado inicialmente em corrente, através de uma referência de corrente constante, seguido de um período onde essa referência de corrente é controlada para manter a tensão na bateria constante. É assim necessário o desenvolvimento de um controlador de corrente e de um controlador de tensão.

Apresenta-se na figura 3.15 o circuito implementado em Psim com base nestes requisitos e na figura 3.16 o esquema do algoritmo para controlo do carregamento da bateria.

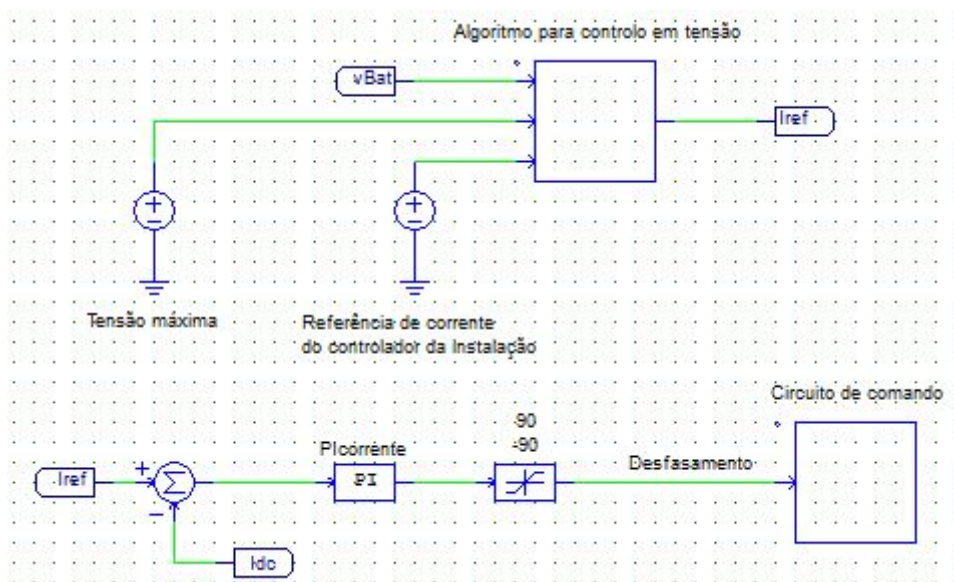


Figura 3.15 - Circuito de controlo implementado em PSIM

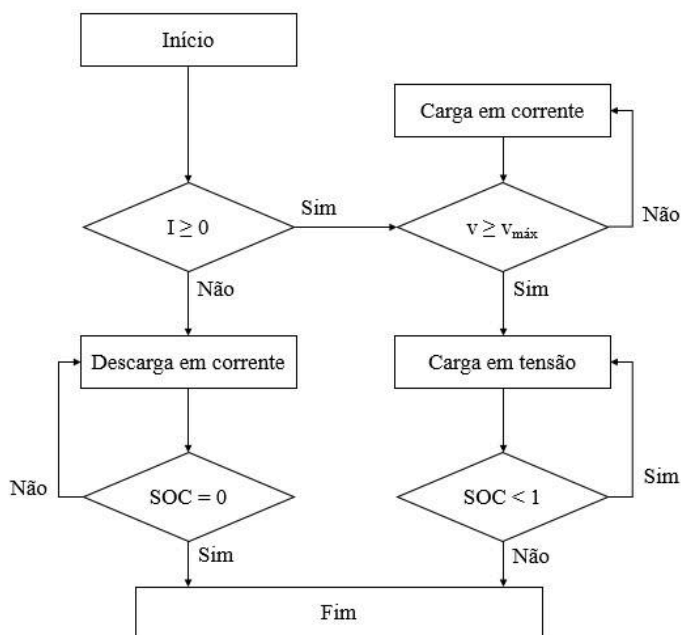


Figura 3.16 - Algoritmo de carga e descarga da bateria

Tanto o controlo da corrente como o controlo da tensão se realizam através de controladores do tipo PI. O controlador de tensão assim como o algoritmo que permite decidir quando carregar as baterias com tensão ou corrente constante são implementados dentro de um bloco C.

O desfasamento é obtido através do controlador de corrente que recebe do bloco C uma referência de corrente. Este bloco C é responsável por implementar o algoritmo que gere o carregamento e o descarregamento da bateria. Quando se pretende descarregar a bateria este bloco gera uma referência de corrente conforme o indicado pelo controlador da instalação. Por sua vez, quando se pretende carregar a bateria, o bloco C começa por gerar uma referência de corrente constante até ao momento em que a tensão na bateria atinge o valor máximo admitido. Nesse momento é iniciado o controlador PI para a tensão (que se encontra implementado dentro deste bloco) passando a referência de corrente a ser gerada em função do valor do controlador de tensão. A referência de tensão é a tensão máxima admitida na bateria.

Obtém-se assim um controlador capaz de responder aos requisitos de carga e descarga das baterias.

3.5 Sumário

No primeiro subcapítulo foi apresentada a topologia do conversor e foi estudado o seu funcionamento em *steady-state*. Apresentaram-se os modelos assim como as principais formas de onda.

No segundo subcapítulo foi analisado o modelo de baterias existente no *software* Matlab sendo este simplificado e implementado em software Psim para que fosse possível testar o funcionamento do conversor quando ligado às baterias.

No terceiro subcapítulo explicou o circuito que comanda o conversor gerando os sinais desfasados.

No quarto subcapítulo foi analisado o controlo do conversor apresentando-se também um algoritmo para gerir a carga e descarga das baterias.

Capítulo 4

Simulações

Depois de estudados com detalhe o modelo do conversor e o modelo de baterias torna-se importante efetuar um conjunto de simulações que permitam validar estes modelos. Para realizar estas simulações irá ser utilizado o software Psim.

Numa primeira parte é feito um conjunto de testes ao modelo de baterias que permitirão verificar se o modelo construído é capaz de simular corretamente o comportamento de baterias. Para tal serão comparados os resultados deste modelo com os resultados do modelo existente no MATLAB.

Após ser validado o modelo de baterias segue-se um subcapítulo onde estas serão dimensionadas de acordo com os requisitos propostos para esta dissertação assim como será dimensionada a indutância de fugas do transformador para que o conversor opere dentro da gama de potência esperada.

No terceiro subcapítulo apresenta-se um conjunto de testes ao conversor que permitirão confirmar o estudo teórico realizado no capítulo 3.

Por último, no quarto subcapítulo, será testado o conversor em funcionamento juntamente com a bateria.

4.1 Simulação do modelo da bateria

No capítulo três foi desenvolvido um modelo para baterias em Psim uma vez que neste software não existia um modelo para tal. Para o desenvolvimento deste modelo foi tomado como exemplo o modelo presente no MATLAB.

Neste subcapítulo compara-se o funcionamento entre o modelo do MATLAB e o modelo desenvolvido no Psim.

Pretende-se em todos os testes simular o comportamento da bateria em vários regimes de carga e descarga.

As características da bateria utilizada durante estes testes estão presentes na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características da bateria a utilizar para os testes do subcapítulo 4.1

Tipo de Bateria	Lithium-Ion
Tensão Nominal	521 V
Capacidade	7 Ah
Tensão Máxima	600 V
Resistência Interna	540 mΩ

4.1.1 Descarregamento da bateria

Neste primeiro teste as baterias em ambos os ambientes de simulação foram descarregadas com uma corrente constante de 60A, sendo que inicialmente se encontravam totalmente carregadas. Os circuitos implementados podem ser vistos nas figuras 4.1 e 4.2.

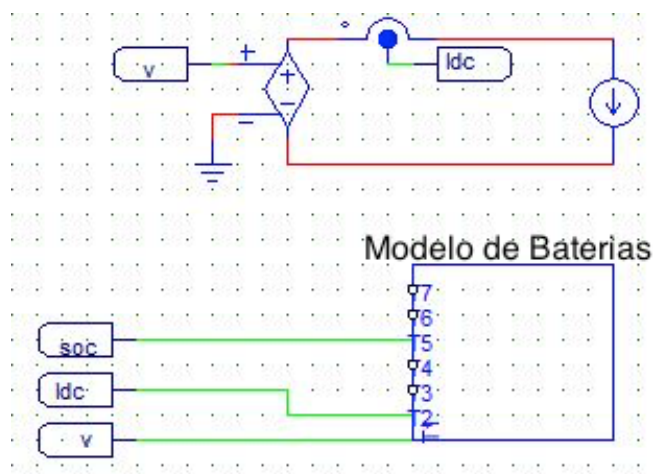


Figura 4.1 - Circuito de teste e modelo de baterias implementados em PSIM

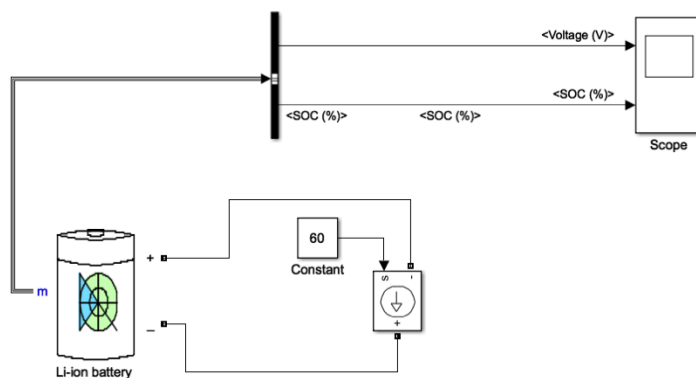


Figura 4.2 - Circuito de teste e modelo de baterias implementados em SIMULINK

No modelo em Psim a bateria é representada pela fonte de tensão controlada, cujo valor de controlo é dado pelo modelo de baterias implementado no capítulo anterior.

Assim, nas figuras 4.3 e 4.4 apresentam-se os resultados da tensão e do estado de carga das baterias obtidos quando simulados estes circuitos.

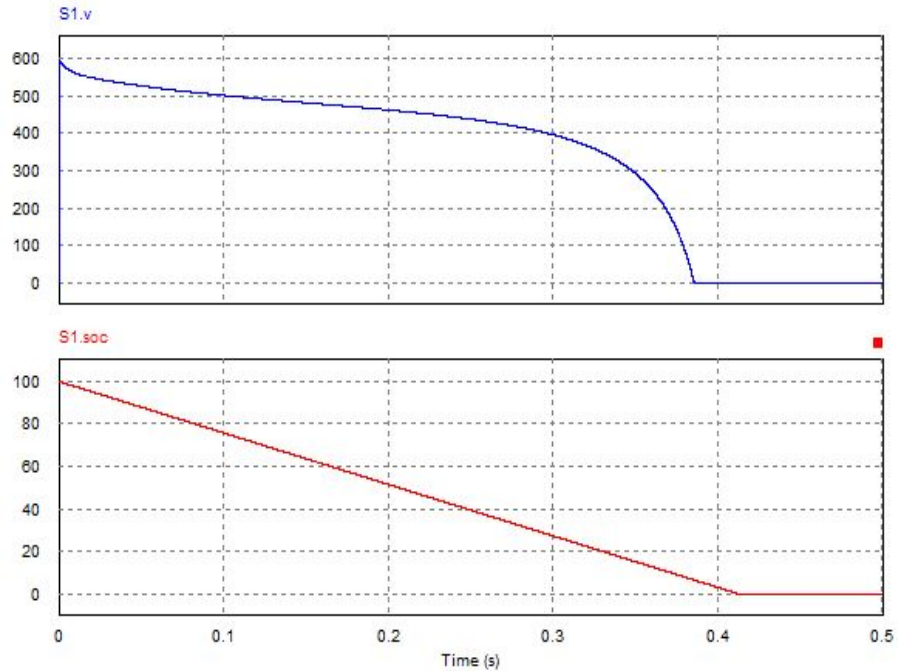


Figura 4.3 - Gráfico da tensão e do estado de carga da bateria simulados em PSIM quando a bateria é descarregada a corrente constante

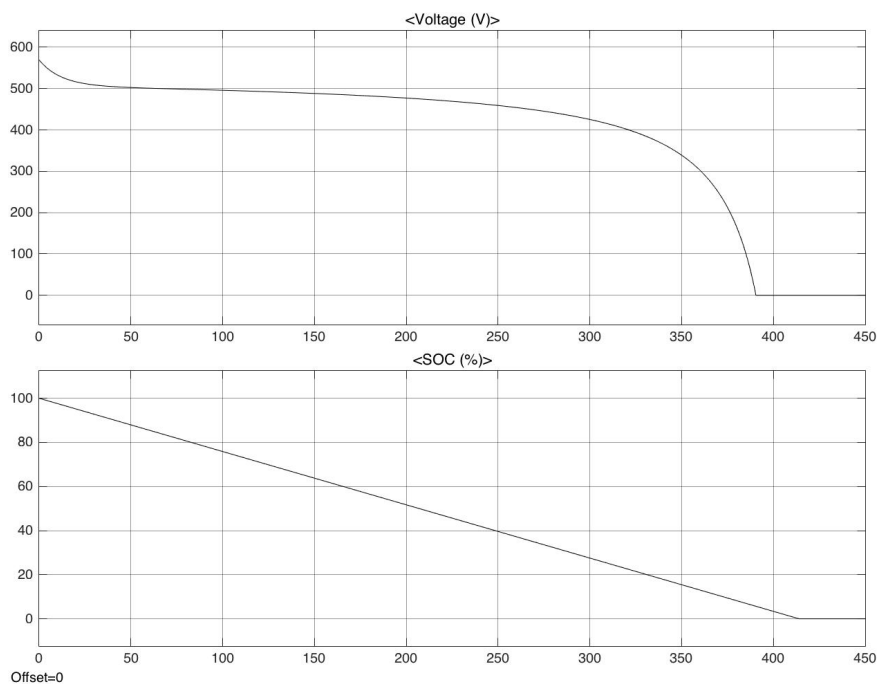


Figura 4.4 - Gráfico da tensão e do estado de carga da bateria simulados em MATLAB quando a bateria é descarregada a corrente constante

Facilmente se observa que os modelos se aproximam bastante, sendo as formas de onda bastante semelhantes.

É possível identificar as três zonas características da curva da tensão da bateria. A zona exponencial dá-se enquanto o estado de carga é superior a 90% e a tensão baixa acentuadamente quando o estado de carga das baterias baixa dos 30%.

Verifica-se também que a tensão máxima das baterias é de aproximadamente 600V quando o estado de carga é 100%.

Conclui-se então que o modelo implementado reproduziu com sucesso as características da bateria para este teste.

4.1.2 Carregamento da bateria

Neste teste pretende-se comparar o funcionamento do modelo desenvolvido com o funcionamento do modelo do Matlab quando se carrega uma bateria com corrente constante. Pretende-se apenas obter uma comparação entre os modelos e não atribuir significado aos valores obtidos, dado que com o carregamento a corrente constante é esperado um comportamento fora do normal por parte das baterias. Para que a bateria fosse corretamente carregada teria que existir um carregamento a corrente constante seguido de um carregamento a tensão constante, segundo o algoritmo desenvolvido no capítulo anterior.

Assim, carregando as baterias com uma corrente constante de 60A, utilizando os mesmos circuitos da simulação anterior, os resultados obtidos apresentam-se nas figuras 4.5 e 4.6.

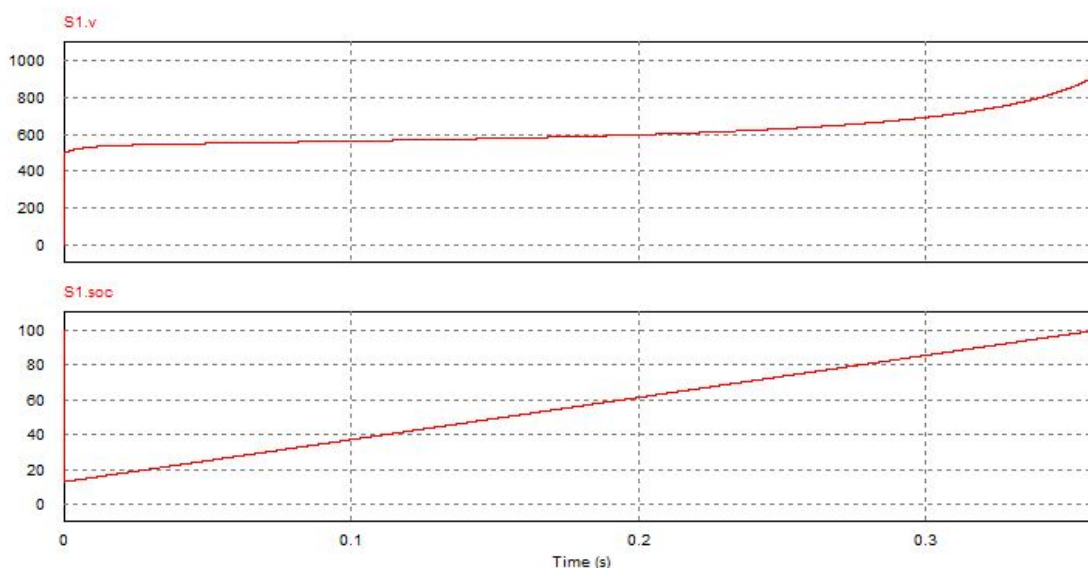


Figura 4.5 - Gráfico da tensão e do estado de carga das baterias durante o carregamento a corrente constante

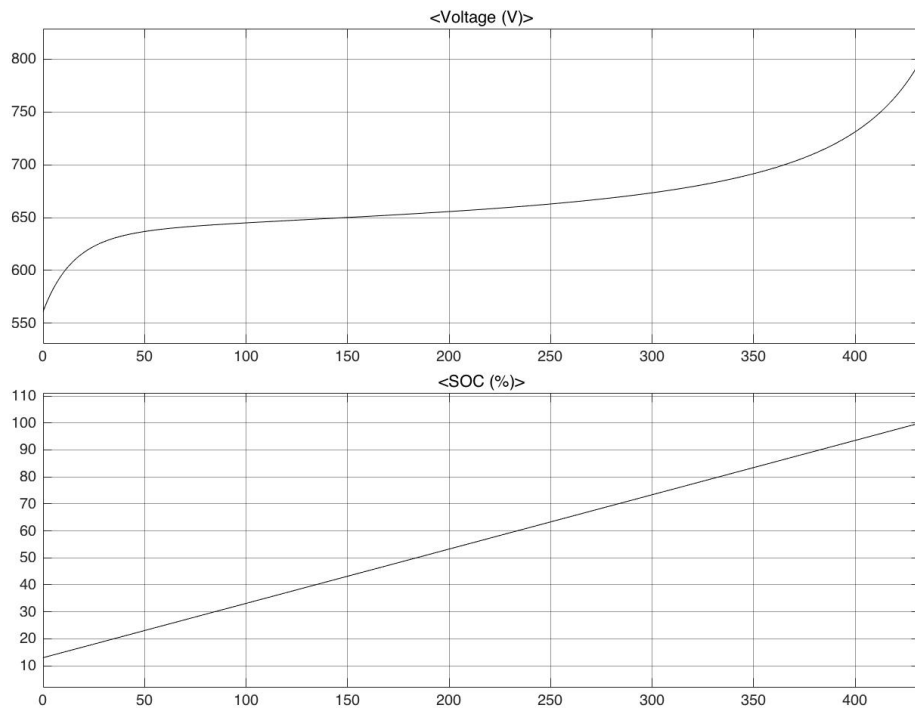


Figura 4.6 - Gráfico da tensão e do estado de carga da bateria simulados em MATLAB quando a bateria é carregada a corrente constante

Verifica-se que a forma da onda da tensão no modelo PSIM é semelhante à apresentada no modelo MATLAB. Os valores de tensão iniciais e finais diferem um pouco mas são devidos às diferenças existentes no comportamento dinâmico do modelo. No entanto, para o caso em estudo podem-se válidos os resultados apresentados pelo modelo da bateria em PSIM.

4.1.3 Alteração entre carregamento e descarregamento

Neste terceiro teste pretende-se verificar o funcionamento do modelo quando a bateria se encontra repetidamente a alternar entre carga e descarga a 50 A. Para testar esta situação foi adicionado ao circuito anterior um motor CC em paralelo com a fonte de corrente.

O processo é iniciado descarregando a bateria com uma corrente constante de -50 A através da fonte existente anteriormente. Quando o estado de carga da bateria for inferior a 40% é aplicado um torque ao motor capaz de gerar uma corrente de 100 Amperes na sua armadura. Como esta corrente é gerada no sentido contrário ao da outra fonte da soma da duas irá resultar uma corrente de 50 Amperes na bateria, fazendo com que esta carregue. Quando o estado de carga for superior a 80% é retirado o torque ao motor voltando-se à situação inicial onde a bateria é descarregada. Este processo repete-se ciclicamente.

Apresenta-se na figura 4.7 este circuito em MATLAB uma vez que é de mais fácil compressão do que o implementado em Psim.

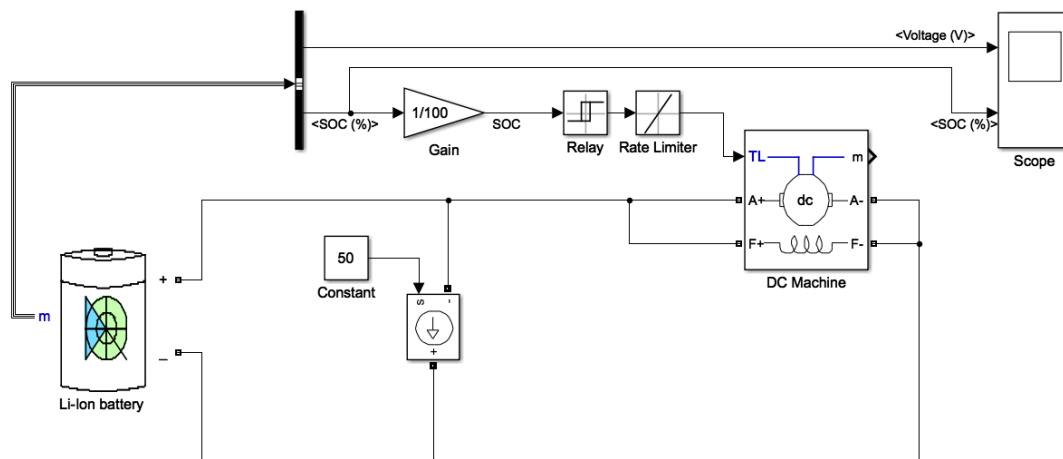


Figura 4.7 - Circuito em MATLAB para teste de carga e descarga da bateria

Podem ver-se as formas de onda resultantes destas simulações em Psim e em MATLAB nas figuras 4.8 e 4.9, respetivamente.

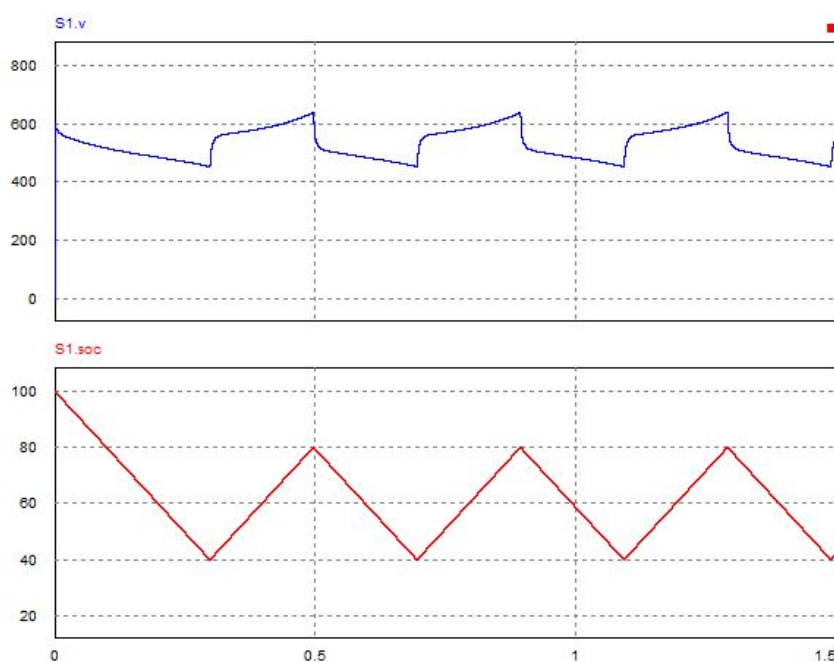


Figura 4.8 - Forma de onda da tensão e do estado de carga das baterias quando simulado em PSIM sucessivas cargas e descargas

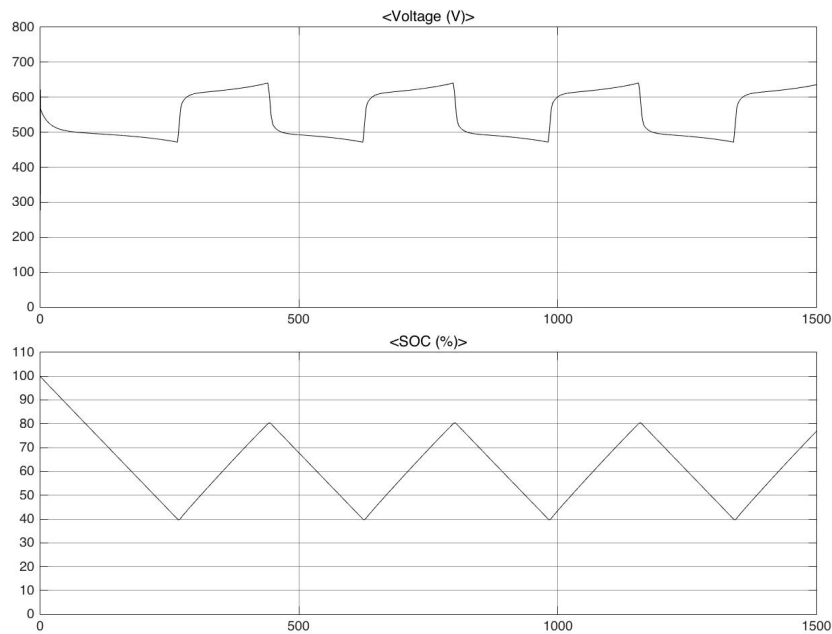


Figura 4.9 - Forma de onda da tensão e do estado de carga das baterias quando simulado em MATLAB sucessivas cargas e descargas

Verifica-se que as formas de onda da tensão e do estado de carga do Psim são bastante semelhantes às do MATLAB. A única diferença perceptível ocorre na forma de onda da tensão, quando a bateria passa para o estado de carregamento, onde não existe uma subida de tensão tão acentuada como a do modelo em Matlab. O erro verificado situa-se abaixo dos 10% e pode ser explicado pela não inclusão das expressões para os regimes dinâmicos durante a simplificação do modelo do Matlab. Todavia este erro não é relevante para o caso de estudo e pode-se assumir que o modelo implementado reproduziu com sucesso as características da bateria para este teste.

Concluídos os três testes realizados podemos assumir que o modelo desenvolvido é válido podendo ser utilizado para testar o funcionamento de baterias com o conversor desenvolvido.

4.2 Dimensionamento dos componentes

Neste subcapítulo será realizado o dimensionamento dos vários componentes deste sistema.

Começa por ser feito o dimensionamento da bateria para que esta esteja de acordo com as especificações iniciais.

Seguidamente é ser dimensionada a indutância de fugas do transformador para que o conversor seja capaz de operar com a potência pretendida.

4.2.1 Dimensionamento da bateria

De acordo com as especificações iniciais a bateria deve operar numa gama de tensões entre 400 e 600 Volts com uma potência instalada de 35 kW. Para atingir estes valores de tensão numa bateria é necessário colocar várias células de baterias em série sendo que o valor de tensão resultante é igual ao somatório do valor de cada uma das células. O mesmo é válido para se obter o valor pretendido para a capacidade das baterias, sendo que neste caso as células são colocadas em paralelo.

Tendo como base estas considerações apresenta-se de seguida o dimensionamento da bateria, sendo que as células utilizadas têm as características presentes na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características das células de bateria a utilizadas

Tipo de bateria	Lithium Ion
Tensão nominal	3.22 V
Tensão a máxima	3.7 V
Capacidade	2.3 Ah
Resistência interna	10 mΩ

Sabendo-se que o valor máximo da tensão pretendida na bateria é de 600 V e que a tensão em cada uma das células é de 3.7 V, então o número de células que é necessário colocar em série é $600V/3.7V \approx 162$ células.

Para que seja possível simular a carga ou descarga completa da bateria no período de uma simulação a sua capacidade foi definida como sendo 6.9 Ah, o que corresponde ao paralelo de três conjuntos de células. Pelo mesmo motivo também a dinâmica de funcionamento da bateria foi acelerada através da redução do passo da integração da corrente, fator importante a ter em conta quando analisado o funcionamento do conversor com as baterias.

Obtém-se assim um total de $162 * 3 = 486$ células de baterias.

A resistência total deste conjunto de células é dada por

$$R_{total} = R_{célula} * \frac{N^{\circ} \text{ células em série}}{N^{\circ} \text{ células em paralelo}} \quad (4.1)$$

$$R_{total} = 10 * 10^{-3} \Omega * \frac{162}{3} \quad (4.2)$$

$$R_{total} = 54 \text{ m}\Omega \quad (4.3)$$

Assim sendo apresentam-se na tabela 4.3 as características da bateria a utilizar nas restantes simulações.

Tabela 4.3 - Características da bateria a utilizar para simulação com o conversor

Tipo de bateria	Lithium Ion
Tensão nominal	521 V
Tensão a máxima	600 V
Capacidade	6.9 Ah
Resistência interna	54 mΩ

4.2.2 Dimensionamento da indutância de fugas do transformador

Como já foi referido anteriormente a potência transferida pelo conversor não depende apenas do desfasamento da tensão entre as duas pontes mas também de outros fatores como a indutância de fugas do transformador, a frequência de comutação ou os próprios valores da tensão em cada uma das pontes. Neste ponto, e conhecendo-se já os intervalos de tensão para cada uma das pontes, apresenta-se de extrema importância o dimensionamento da indutância de fugas do transformador. Esta indutância deve assumir um valor que permita ao conversor funcionar a uma potência de 35kW, sejam quais forem os valores das tensões nas duas pontes.

Como deduzido no capítulo 3 a potência máxima transferida pelo conversor ocorre quando $\phi = \pm \pi/2$ e é dada por

$$|P_{max}| = \frac{n * V_1 * V_2}{8f_s L} \quad (4.4)$$

pretendendo-se então que

$$\frac{n * V_1 * V_2}{8f_s L} \geq 35kW \quad (4.5)$$

O cálculo de L deve, pois, ser feito para o pior caso, onde V1 e V2 tomam o valor mínimo dentro da sua gama de funcionamento. Apresentam-se na tabela 4.4 os valores considerados para o cálculo de L.

Tabela 4.4 - Parâmetros a utilizar para o cálculo da indutância de fugas do transformador

Parâmetro	Valor
Tensão no barramento DC (V1)	450 V
Tensão nas baterias (V2)	400 V
Frequência de comutação (f _s)	5kHz
Razão de transformação (n)	1/1

Considerando estes valores temos que

$$35 * 10^3 \leq \frac{1 * 450 * 400}{8 * 5 * 10^3 * L} \quad (4.6)$$

$$35 * 10^3 \leq \frac{180 * 10^3}{40 * 10^3 * L} \quad (4.7)$$

$$L \leq \frac{180 * 10^3}{40 * 10^3 * 35 * 10^3} \quad (4.8)$$

$$L \leq 0,129 \text{ mH} \quad (4.9)$$

Depois de determinado o valor máximo da indutância de fugas do transformador apresenta-se na figura 4.10 o gráfico da potência transferida em função do desfasamento entre as tensões. É apresentado o caso onde as tensões nas duas pontes são mínimas e o caso onde as essas tensões são máximas.

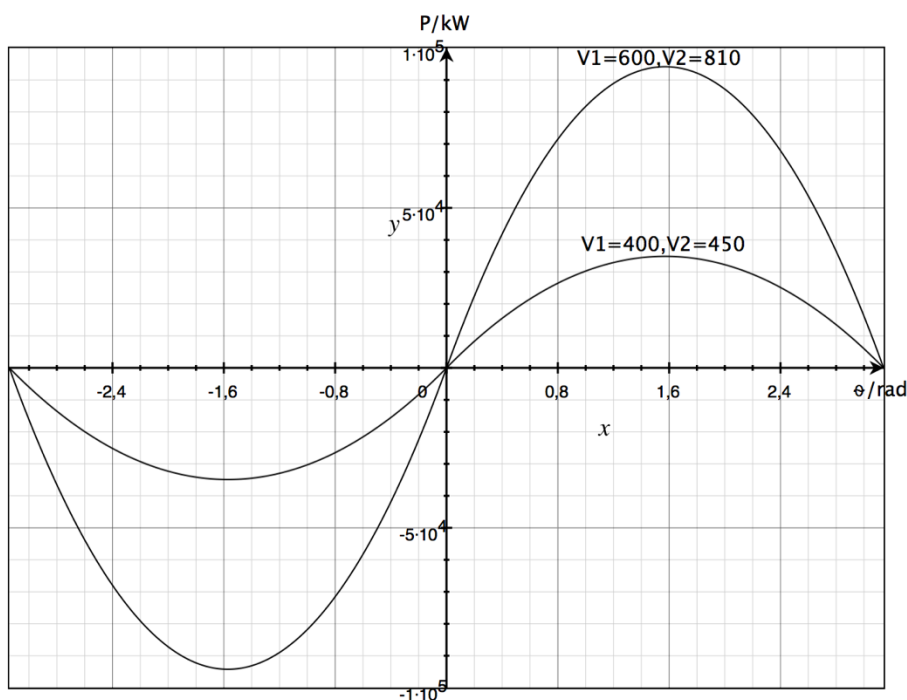


Figura 4.10 - Gráfico da potência transferida em função do valor do desfasamento para diferentes valores de tensão de entrada e de saída

Observa-se que, para o caso das tensões nas duas pontes serem as mínimas, os 35kW de potência transferida só são alcançados quando $\phi = \pm \pi/2$, enquanto que no caso de as tensões serem máximas os 35kW são alcançados com um desfasamento bastante inferior. Tendo em

conta as considerações feitas no capítulo anterior acerca das condições para *soft-switching*, e lembrando que para valores de M diferentes de 1 irá existir um valor mínimo de defasamento para que o conversor funcione neste modo, é importante dimensionar a indutância por forma a maximizar a utilização de *duty-cycles* elevados. Com base nesta relação o valor definido para a indutância de fugas do transformador será 0,129 mH.

Conclui-se que o dimensionamento foi realizado com sucesso pois o conversor é capaz de trabalhar dentro da gama de potência desejada sejam quais forem os valores de tensão nas duas pontes.

4.3 Simulação do modelo do conversor

Esta dissertação tem como objetivo estudar o funcionamento de um conversor para uma central fotovoltaica com armazenamento de energia. É, portanto, um dos principais objetivos a criação de um conversor capaz de cumprir todos os requisitos e especificações pretendidos para o projeto. Depois de estudado no capítulo três o funcionamento em *steady-state* dos conversores Dual Active Bridge apresenta-se de extrema relevância a comprovação dos modelos matemáticos através da simulação do conversor em diversos regimes de funcionamento.

Neste subcapítulo apenas será simulado o conversor sem a ligação com o modelo de baterias desenvolvido pelo que as simulações serão realizadas em software PSIM sob as seguintes condições:

- O barramento de corrente contínua do lado primário do transformador é representado por uma fonte de tensão ideal
- O barramento de corrente contínua do lado das baterias é representado por uma fonte de tensão ideal
- Os semicondutores de ambas as pontes são ideais
- O transformador é ideal e a razão de transformação é de 1:1, sendo adicionada uma indutância fugas em série com o valor de 0.129mH

Apresentam-se nas figuras 4.11 e 4.12 os esquemas implementados em PSIM para o circuito de potência e para o circuito de controlo, respetivamente.

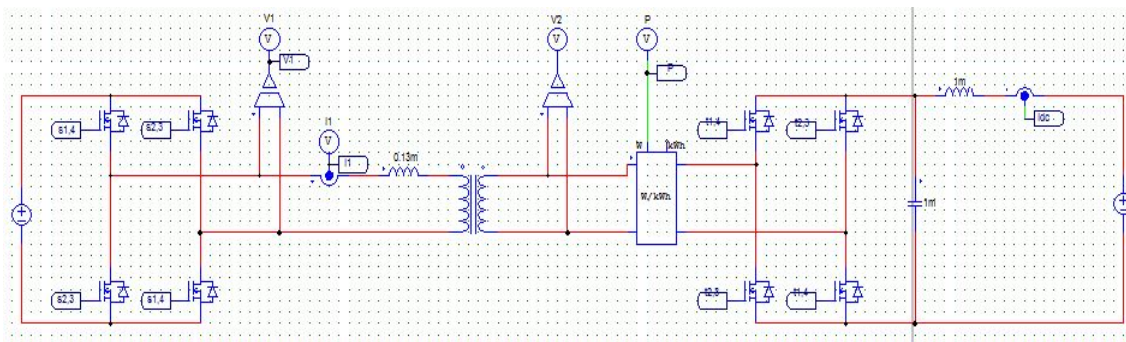


Figura 4.11 - Circuito de potência do conversor DAB implementado em PSIM

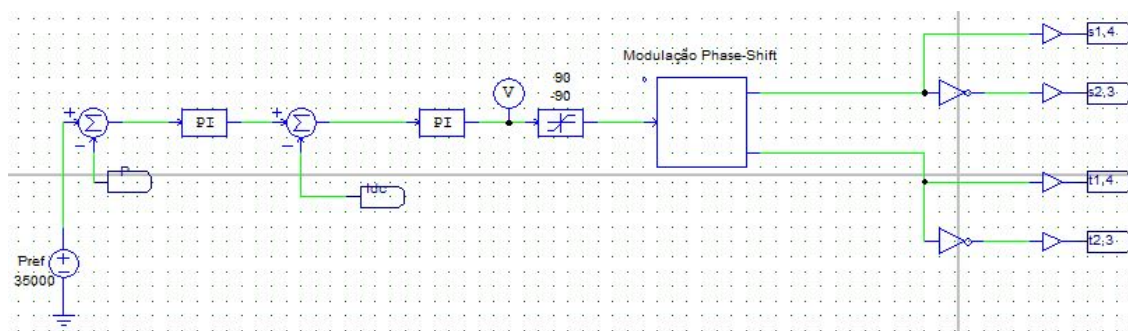


Figura 4.12 - Circuito de controlo implementado em PSIM para testes do conversor

Estes circuitos servirão de base para todos os testes a efetuar neste subcapítulo.

4.3.1 Bidirecionalidade

A primeira característica que se pretende verificar no funcionamento do modelo do conversor é a sua capacidade de transferir potência nos dois sentidos. Primeiramente irá ser verificado o funcionamento com uma referência de potência positiva sendo que de seguida será verificado o funcionamento com uma referência negativa. Considera-se que a potência circula no sentido positivo quando passa da ponte primária para a ponte secundária. Para as duas situações será analisada a potência transferida assim como o valor da corrente na indutância e os valores de tensão gerado pelas duas pontes em cada um dos lados do transformador.

Colocando 25 kW como referência de potência os resultados obtidos são os seguintes.

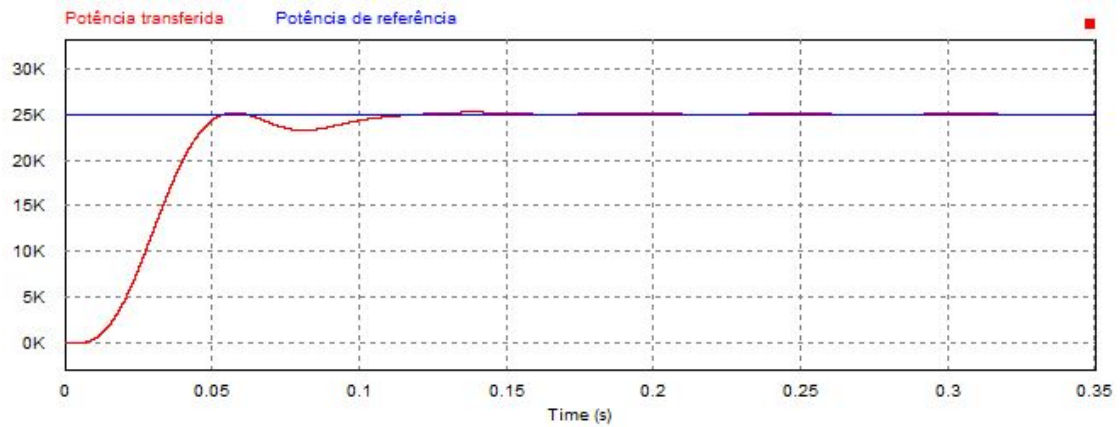


Figura 4.13 - Gráfico da potência transferida e da potência de referência obtidos no teste da bidirecionalidade com uma referência de 25kW

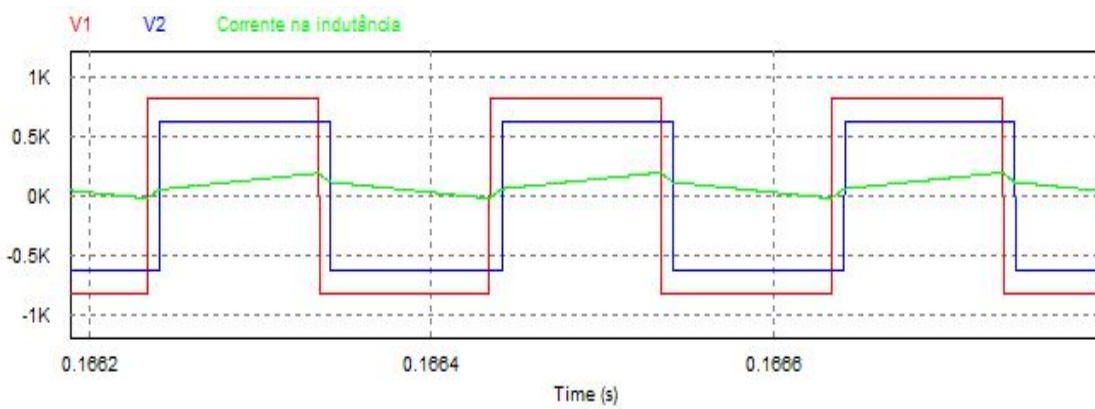


Figura 4.14 - Gráfico das tensões nas duas pontes e da corrente na indutância de fugas do transformador obtidos no teste da bidirecionalidade com uma referência de 25kW

Alterando o valor de referência para -25 kW obtêm-se os seguintes resultados.

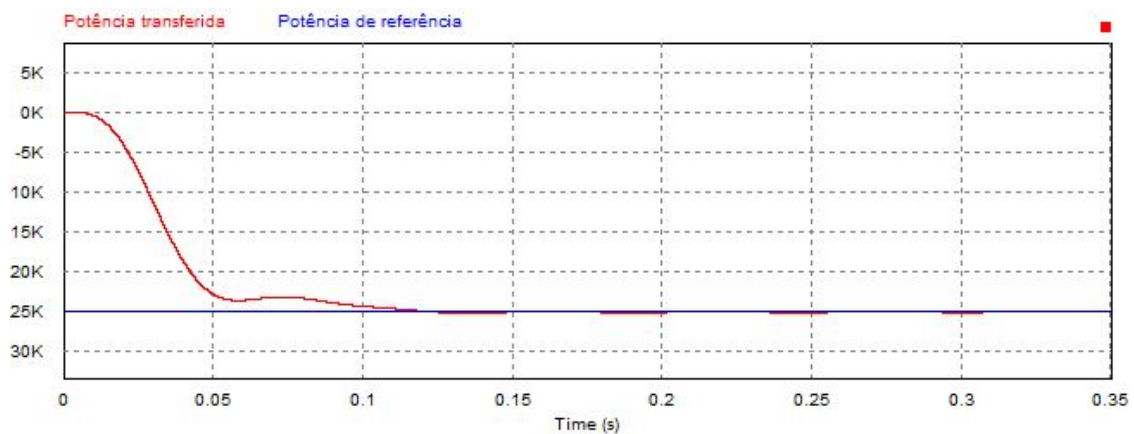


Figura 4.15 - Gráfico da potência transferida e da potência de referência obtidos no teste da bidirecionalidade com uma referência de -25kW

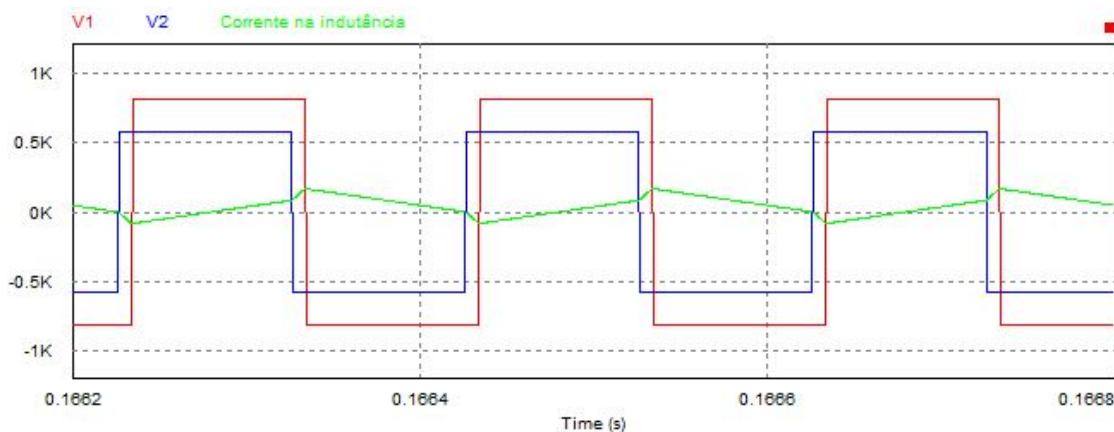


Figura 4.16 - Gráfico das tensões nas duas pontes e da corrente na indutância de fugas do transformador obtidos no teste da bidirecionalidade com uma referência de -25kW

Analisando as figuras podem retirar-se várias conclusões. Através das figuras 4.13 e 4.15 verifica-se que o modelo do conversor cumpre o requisito de trânsito bidirecional de potência pois observa-se que na primeira figura o valor de potência alcançado é positivo e na segunda figura é negativo. É também possível confirmar que a potência circula da ponte com a tensão em avanço para a ponte com a tensão em atraso, como se observa pelas figuras 4.16 e 4.16. Serve também esta simulação para comprovar o comportamento da corrente na indutância de fugas do transformador, indo de encontro ao referido durante o estudo teórico.

4.3.2 Operação em modo Buck e Boost

Um das características mais importantes deste conversor é a sua capacidade de operar em modo Buck e em modo Boost.

Para verificar o funcionamento do modelo nestes dois modos foi verificado o seu funcionamento nas duas seguintes situações:

- Modo Buck com $V_1=800$ V, $V_2=600$ V e $P=35$ kW
- Modo Boost com $V_1=600$ V, $V_2=800$ V e $P=35$ kW

De seguida apresentam-se os resultados obtidos nas simulações do modelo para o modo Buck.

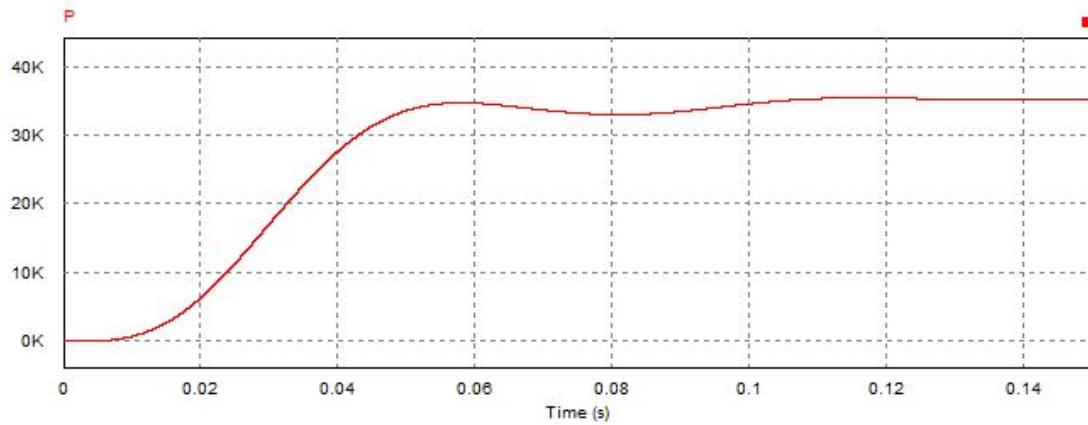


Figura 4.17 - Gráfico da potência transferida pelo conversor em modo Buck

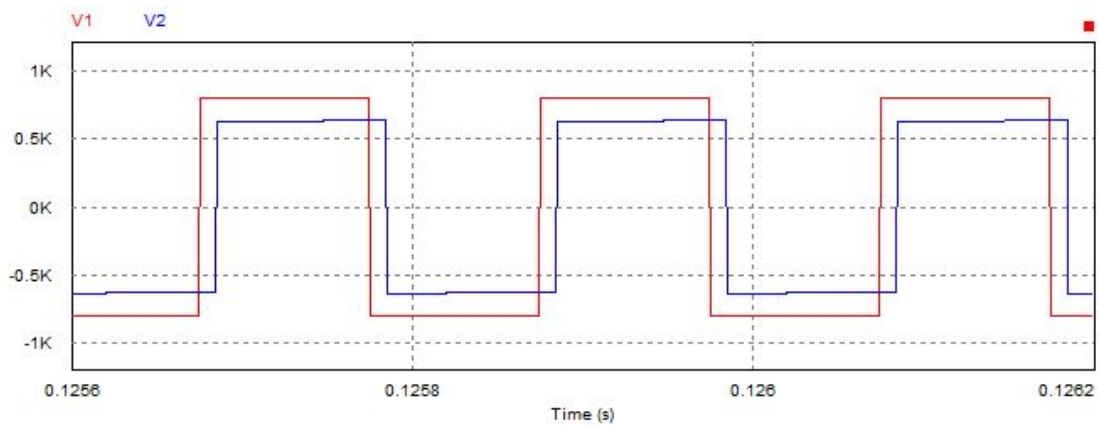


Figura 4.18 - Gráfico das tensões nas duas pontes do conversor em funcionamento em modo Buck

Verifica-se, conforme esperado, que a tensão de entrada, V1, é superior à tensão de saída, V2, e que o conversor funciona corretamente neste modo para a potência desejada.

Apresentam-se agora as simulações do modelo do conversor a funcionar no segundo modo, o modo Boost.

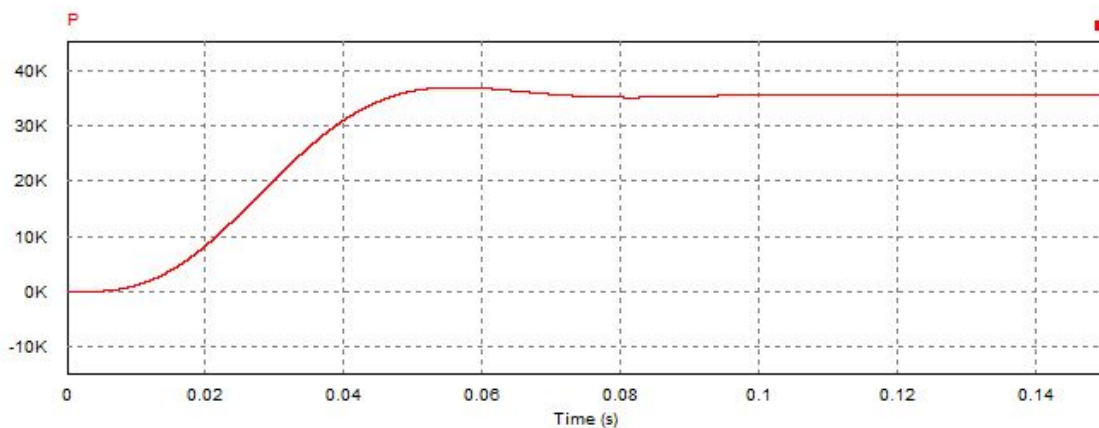


Figura 4.19 - Gráfico da potência transferida pelo conversor em modo Boost

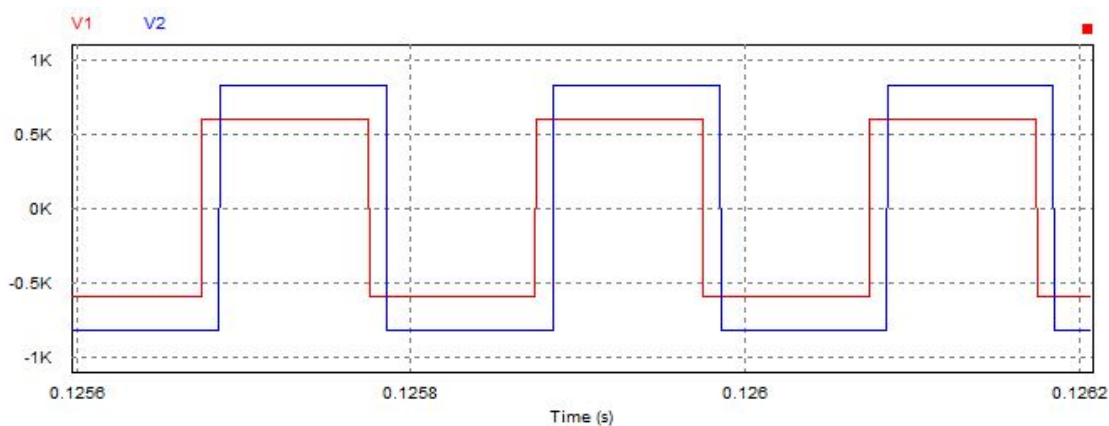


Figura 4.20 - Gráfico das tensões nas duas pontes do conversor em funcionamento em modo Boost

Neste modo a tensão de entrada, V1, é inferior à tensão de saída, V2. O funcionamento do conversor neste modo é também o esperado, gerando a potência desejada.

Pode então concluir-se que o modelo funciona corretamente quer para o modo Buck quer para o modo Boost.

4.3.3 Potência em função do desfasamento

Neste teste pretende-se verificar a potência transferida pelo conversor em função do desfasamento, comparando-se com o gráfico 4.10 obtido através dos modelos matemáticos.

Assim, para uma tensão de entrada de 450V e uma tensão de saída de 400V os resultados foram presentes na figura

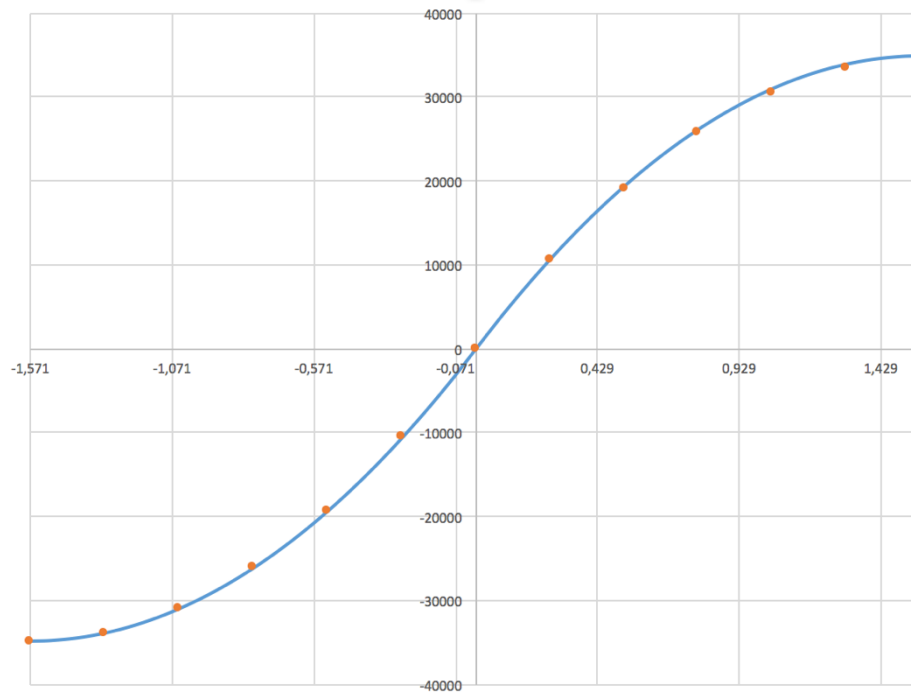


Figura 4.21 - Gráfico da potência em função do desfasamento

Observa-se que os valores obtidos na simulação são bastante próximos dos obtidos pelo modelo matemático.

Após a realização de todos estes testes ao conversor pode-se afirmar que o modelo foi bem desenvolvido.

4.4 Simulação do conversor com a bateria

Depois de verificado o correto funcionamento do modelo do conversor a operar com duas fontes de tensão ideais, apresenta-se como objetivo desta dissertação a simulação do conversor substituindo uma dessas fontes ideais pelo modelo da bateria implementado e validado anteriormente nesta dissertação.

As simulações serão realizadas em software Psim sob as seguintes condições:

- O barramento de corrente contínua do lado primário do transformador é representado por uma fonte de tensão ideal
- O barramento de corrente contínua do lado das baterias é representado por uma fonte de tensão controlada pelo modelo da bateria e por uma resistência interna
- Os semicondutores de ambas as pontes são ideais
- O transformador é ideal e a razão de transformação é de 1:1, sendo adicionada uma indutância de fugas em série com o valor de 0.129mH

Apresentam-se nas figuras 4.21 e 4.22 os esquemas implementados em PSIM para o circuito de potência e para o circuito de controlo, respetivamente.

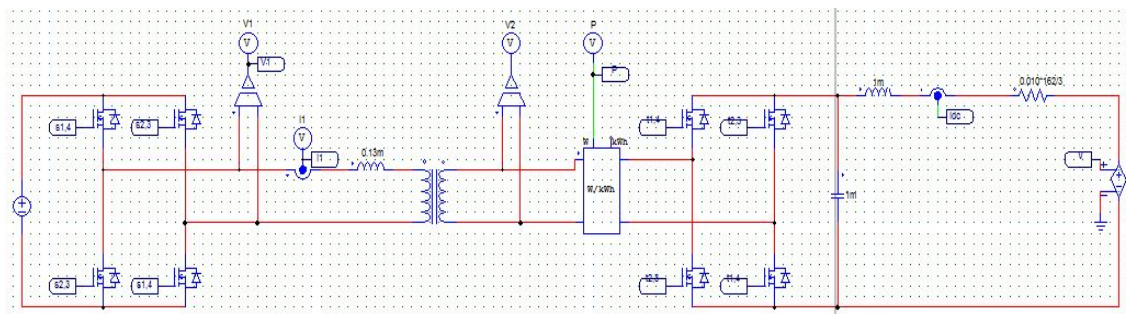


Figura 4.22 - Circuito de potência do conversor DAB implementado em PSIM para testes com a bateria

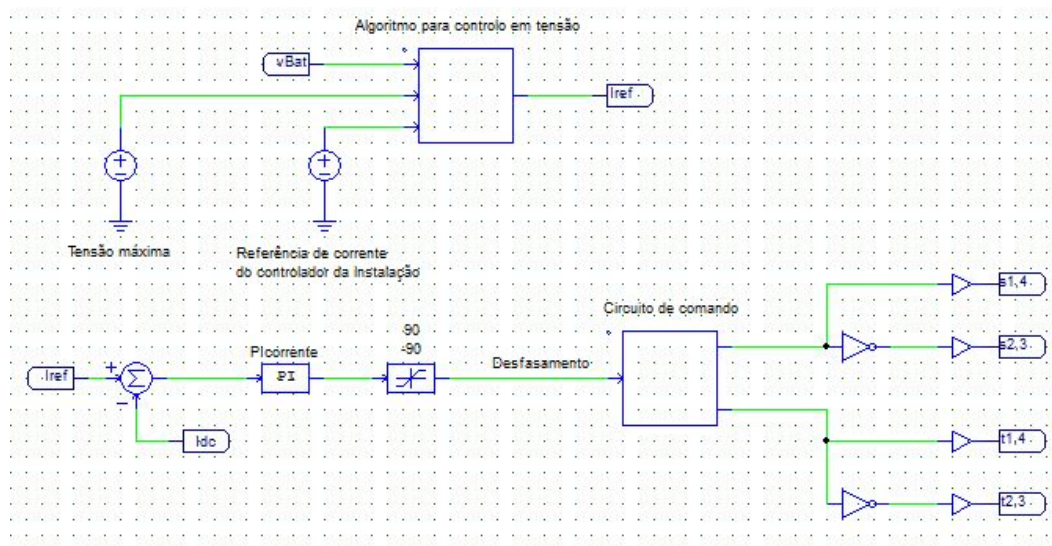


Figura 4.23 - Circuitos de controlo e comando do conversor implementados em PSIM para testes do conversor com a bateria

Estes circuitos servirão de base para todos os testes a realizar neste subcapítulo.

4.4.1 Descarregamento da bateria

Neste teste pretende-se verificar o funcionamento do conversor quando descarrega uma bateria totalmente carregada. Esta descarga realiza-se com uma corrente constante de 60A. De seguida apresentam-se os resultados obtidos nesta simulação.

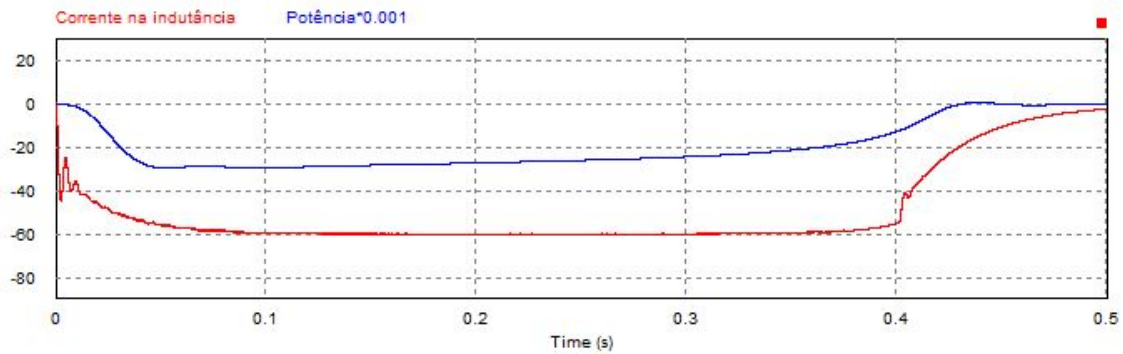


Figura 4.24 - Gráfico da potência transferida e da corrente na indutância de fugas do transformador quando o conversor descarrega a bateria

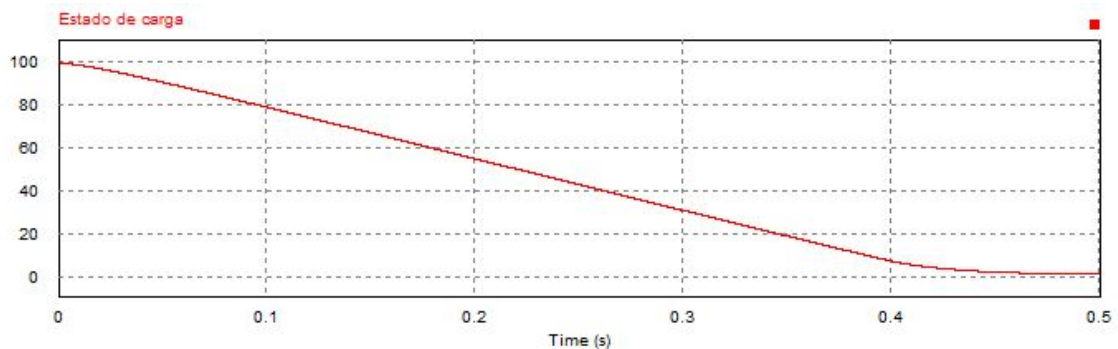


Figura 4.25 - Gráfico do estado de carga quando o conversor descarrega a bateria

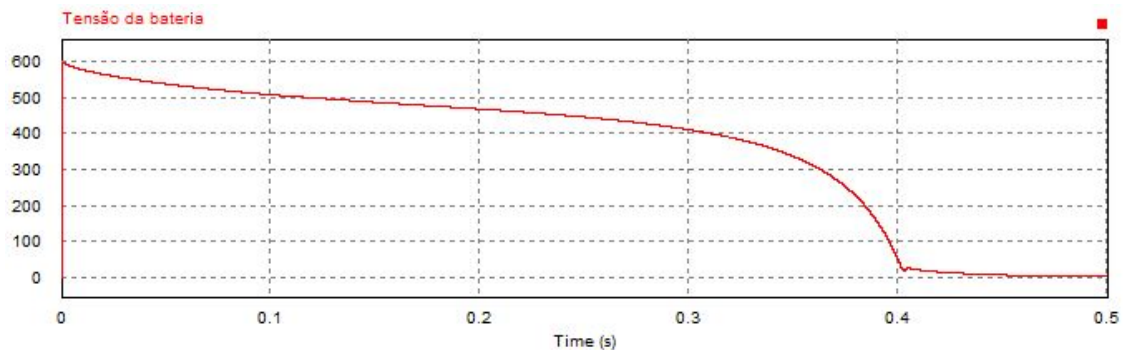


Figura 4.26 - Gráfico da tensão na bateria quando é descarregada pelo conversor

Verifica-se que o conversor é capaz de transferir a corrente pretendida até ao momento em que a tensão nas baterias desce exponencialmente e se aproxima de zero. Quando o estado de carga das baterias é zero verifica-se que a corrente é também zero, facto previsível uma vez que a bateria não dispõe de mais energia para transferir. Podemos verificar, até esse ponto, que independentemente do valor de tensão nas baterias o conversor é capaz de manter estável o valor de corrente a transferir.

Observando o funcionamento do conversor dentro da gama de tensões em que a bateria irá funcionar (400-600V), podemos afirmar que o conversor cumpre os requisitos.

4.4.2 Carregamento da bateria

Como foi explicado no capítulo anterior o processo de carga de uma bateria funciona de maneira completamente diferente do processo de descarga. No processo de carga a bateria começa por ser carregada com uma corrente constante passando depois a ser carregada com tensão constante segundo o algoritmo implementado para a gestão da carga das baterias. Neste teste pretende-se verificar o funcionamento do conversor e do controlo implementado quando se carrega uma bateria com um estado de carga inicial de 13%. A carga realiza-se inicialmente com uma corrente constante de 30A, passando depois a tensão constante. De seguida apresentam-se os resultados obtidos nesta simulação.

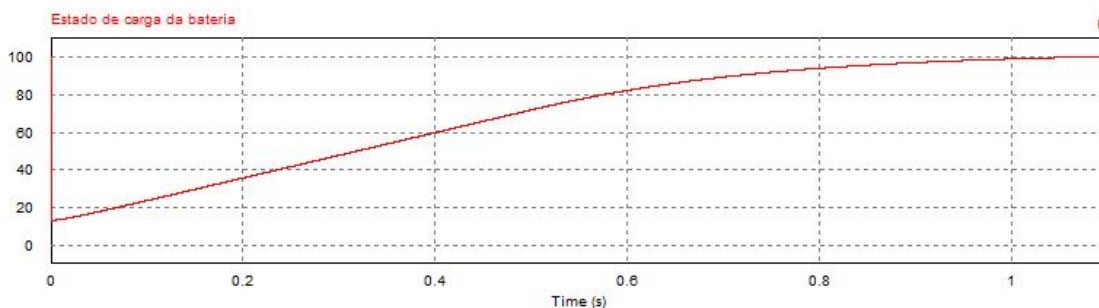


Figura 4.27 - Gráfico do estado de carga da bateria quando é carregada pelo conversor

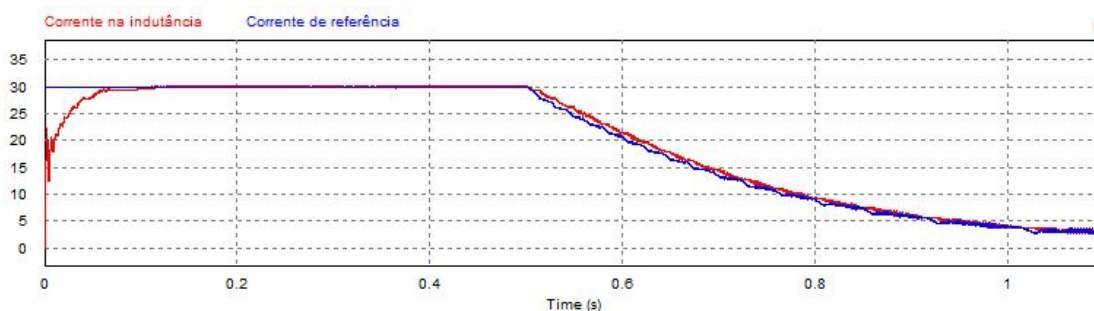


Figura 4.28 - Gráfico da corrente na indutância do transformador e da corrente de referência quando a bateria é carregada pelo conversor

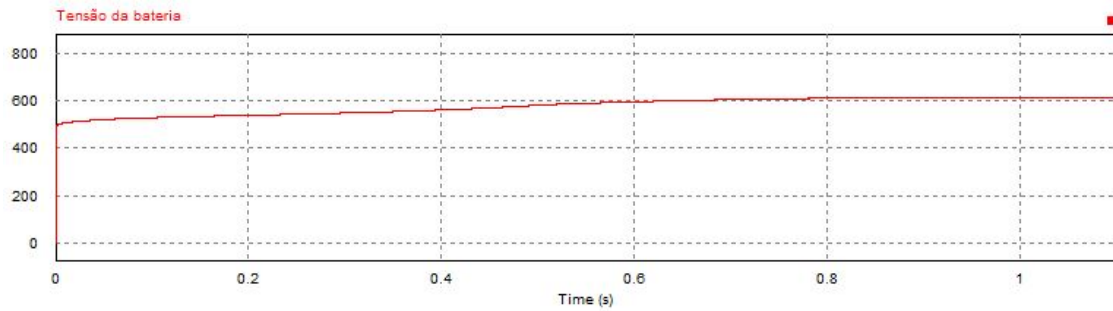


Figura 4.29 - Gráfico da tensão na bateria quando é carregada pelo conversor

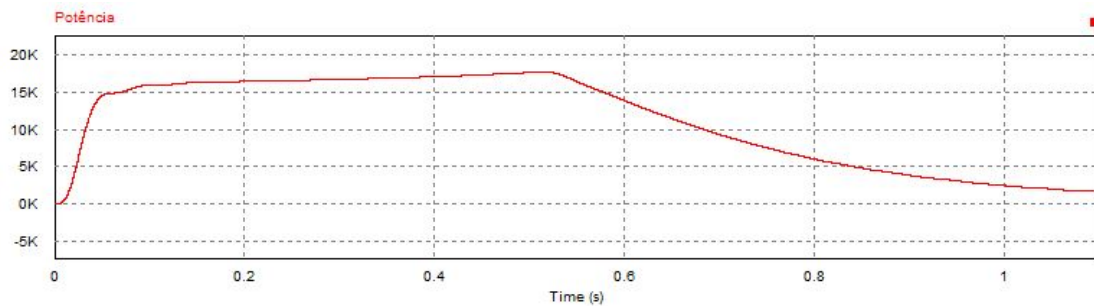


Figura 4.30 - Gráfico da potência transferida quando a bateria é descarregada pelo conversor

Verifica-se o correto funcionamento do conversor e do algoritmo que gere o carregamento das baterias. Numa primeira fase do carregamento o algoritmo dá como referência uma corrente constante e, posteriormente, altera essa referência de corrente por forma a manter a tensão na bateria constante. Já o conversor é capaz de seguir esta referência de corrente fornecendo sempre às baterias a corrente necessária. Este processo permite carregar a bateria até ao seu estado de carga máximo.

4.4.3 Alteração entre carregamento e descarregamento

Neste teste pretende-se verificar o funcionamento do conversor quando sucessivamente alterna entre o carregamento e o descarregamento de uma bateria. A descarga realiza-se com uma corrente constante de 60A, sendo que a carga é feita inicialmente com corrente constante de 60A no sentido inverso passando depois a ser feita com tensão constante.

O processo é iniciado descarregando a bateria completamente carregada. Quando o estado de carga chega aos 40% inverte-se a corrente passando a carregar a bateria até esta chegar ao estado de carga de 80%. Quando chega aos 80% inverte-se novamente a corrente até voltar a atingir os 40% de estado de carga. Este processo repete-se ciclicamente.

Os resultados obtidos nesta simulação apresentam-se nas figuras 4.30, 4.31, 4.32 e 4.33.

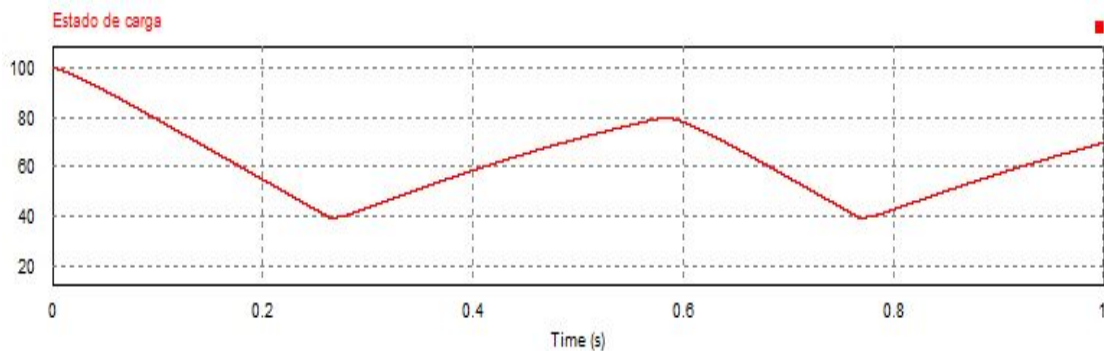


Figura 4.31 - Gráfico do estado de carga da bateria quando é carregada e descarregada sucessivamente pelo conversor

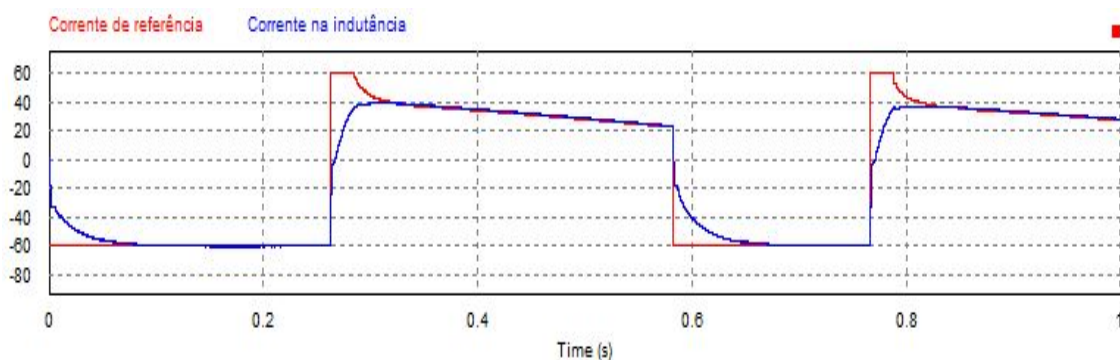


Figura 4.32 - Gráfico da corrente na indutância do transformador e da corrente de referência quando a bateria é sucessivamente carregada e descarregada pelo conversor

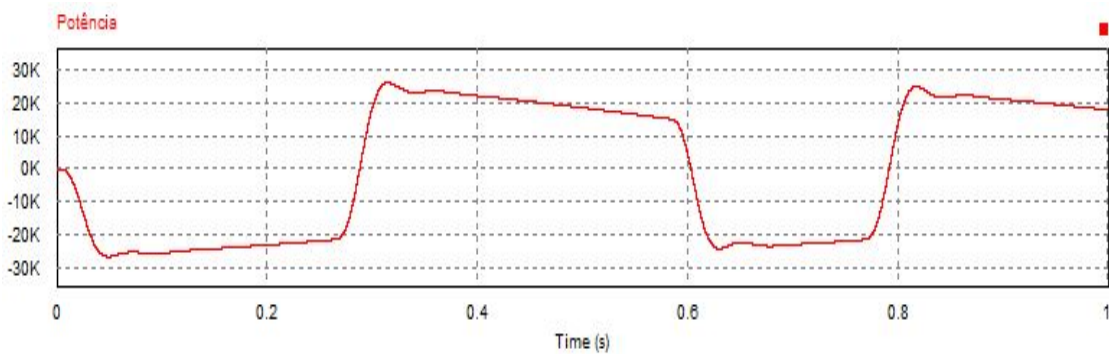


Figura 4.33 - Gráfico da potência transferida pelo conversor quando sucessivamente carrega e descarrega a bateria

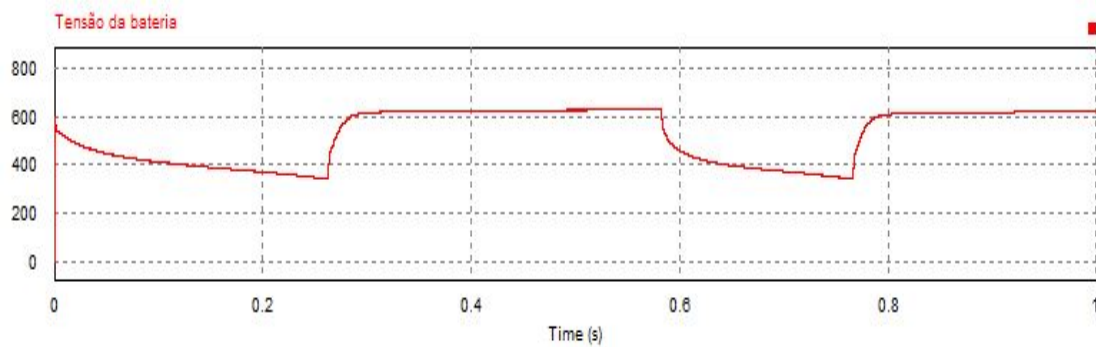


Figura 4.34 - Gráfico da tensão na bateria quando é sucessivamente carregada e descarregada pelo conversor

Analisando os gráficos verifica-se que, inicialmente, a descarga é realizada a corrente constante de -60A , tal como previsto. De seguida, e quando o valor do estado de carga atinge os 40%, a referência de corrente altera-se para os 60A constantes. Observa-se que o conversor não é capaz de fornecer essa corrente à bateria pois antes de o controlador de corrente estabilizar no valor desejado o carregamento entra no modo de tensão constante. Isto deve-se, uma vez mais, à dinâmica da bateria ser bastante acelerada para permitir simular vários períodos de carga durante o tempo de simulação. Na realidade esta dinâmica seria bastante mais lenta e o conversor atingiria sem problemas o valor de corrente pretendido. Assinalada esta diferença observa-se que o conversor funciona corretamente no modo de tensão contínua, alterando o valor de referência da corrente para continuar a carga controlando a tensão na bateria.

Fazendo uma análise comparativa entre os testes realizados neste subcapítulo e os realizados no subcapítulo 4.1 para carregar e descarregar as baterias sem o uso do conversor, apesar de não se notarem diferenças no processo de descarga, é evidente a necessidade da utilização de um conversor capaz de gerir todo o processo de carga.

Conclui-se que o conversor cumpre os requisitos para esta aplicação assim como o algoritmo desenvolvido permite gerir corretamente o processo de carga e descarga das baterias.

4.5 Sumário

No primeiro subcapítulo começou por se realizar uma série de teste à bateria culminando na validação do modelo desenvolvido.

De seguida, no segundo subcapítulo, foi dimensionada a bateria a ser utilizada em funcionamento com o conversor, segundo os requisitos iniciais do sistema.

No terceiro subcapítulo foram realizados vários testes ao conversor permitindo validar o modelo desenvolvido.

No quarto subcapítulo foi testado o conversor em funcionamento com a bateria, objetivo principal desta dissertação. Conclui-se que o conversor foi bem modelado e dimensionado e também que o seu controlo e algoritmo de carga permitem efetuar corretamente a gestão da carga de uma bateria.

Capítulo 5

Conclusões e trabalho futuro

5.1 Conclusões

Nesta dissertação pretendia-se estudar o funcionamento de um conversor CC/CC capaz de efetuar o trânsito de potência entre uma central fotovoltaica e um conjunto de baterias. Com base nos requisitos propostos para este sistema foram delineados os objetivos para esta dissertação no primeiro capítulo.

Após o estudo de várias topologias passíveis de serem implementadas nesta aplicação a topologia *Dual Active Bridge* foi aquela que revelou um maior potencial face aos requisitos do sistema a desenvolver. Fatores como o isolamento galvânico para as baterias, a capacidade de funcionamento em modo *buck* ou *boost*, a capacidade de trânsito de potência bidirecional e a possibilidade de operação em *soft-switching* estiveram na base desta decisão.

Analisada com maior detalhe a topologia *DAB* foi possível verificar, através de modelos matemáticos estabelecidos, as características enunciadas no capítulo anterior para este conversor. Através do estudo das condições para operação em modo *soft-switching* concluiu-se que se M for igual a 1 a condição de *soft-switching* se verifica para qualquer valor de desfasamento. Contudo, se M for diferente de 1 irá sempre haver um valor mínimo para o duty-cycle que limita a área de *soft-switching*. Torna-se assim importante, no momento do desenho do transformador, escolher um valor de “ n ” que faça com que M se aproxime, tanto quanto possível, do valor 1.

Para além do valor de “ n ” do transformador, também o dimensionamento da sua indutância de fugas se revela de extrema importância para o funcionamento do conversor, pois limita a potência que este é capaz de transferir. Neste ponto, através de modelos matemáticos, é obtido um valor máximo para a indutância de fugas para que o conversor opere à potência

desejada. Conclui-se que este valor máximo deve ser o utilizado pois permite maximizar a utilização de duty-cycles elevados e assim garantir melhores condições para operação em soft-switching.

O comando do conversor foi realizado segundo o método fase-shifting. Este método foi escolhido pois apresentava como vantagem um fácil controlo, sendo apenas necessário variar o desfasamento para controlar a potência transferida. Verifica-se que a potência máxima transferida ocorre quando o desfasamento é de +90 ou -90 graus sendo nula quando o desfasamento é zero.

Para o controlo do conversor foi desenvolvido um algoritmo que permite, em função da potência que se pretende fornecer ou extrair das baterias, controlar a carga/descarga das baterias em tensão ou corrente. Quando se pretende descarregar a bateria é efetuado um controlo em corrente e quando se pretende carregar a bateria é efetuado um período de controlo em corrente seguido de um período de controlo em tensão, segundo os requisitos da bateria.

Para ser possível a validar o funcionamento do conversor e dos algoritmos de controlo enquanto se carrega e descarrega baterias desenvolveu-se um modelo que permite simular o comportamento das baterias. Para tal foi adaptado para software Psim um modelo existente em Matlab/Simulink.

Após a realização de simulações, e comparando os valores obtidos através dos modelos de simulação com os valores obtidos através das expressões matemáticas, conclui-se que os modelos obtidos para o conversor e para as baterias são válidos assim como o dimensionamento de todos os componentes.

Também se verifica que o conversor desenvolvido assim como os circuitos de comando e controlo são capazes de efetuar corretamente a gestão da carga e descarga das baterias.

Considera-se, portanto, que foram cumpridos todos os objetivos para esta dissertação.

5.2 Trabalho futuro

Como trabalho futuro sugere-se o estudo do rendimento do conversor através do cálculo perdas, designadamente as perdas de comutação, de condução e incluindo a indutância de magnetização do transformador. A integração das perdas nos modelos desenvolvidos é também sugerida.

Apesar de ter sido utilizado o comando por *fase-shift* pela sua simplicidade de controlo era interessante fazer uma comparação com outros métodos existentes.

Nesta dissertação foi analisado o funcionamento do conversor em *steady-state*, sugere-se posteriormente a análise do conversor para pequenos sinais com o objetivo de desenvolver um controlo mais preciso.

Após a realização destas etapas a implementação de um modelo físico seria interessante para fazer a comparação com os modelos e resultados apresentados.

Referências

- [1] Zhan Wang, Interleaved Multi-Phase Isolated Bidirectional DC-DC Converter and its Extension - Doctoral Thesis, 2012
- [2] Juan Carlos López Rodríguez, Diseño y control de convertidores cc/cc aplicados a sistemas híbridos de generación distribuida - Doctoral Thesis, 2014
- [3] M.E. Glavin, Paul K.W. Chan, S. Armstrong, and W.G Hurley, "A Stand-alone Photovoltaic Supercapacitor Battery Hybrid Energy Storage System" in *2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008)*
- [4] YUHANG DENG, "Study of multiphase bidirectional dc-dc converter Interfacing with energy storage for fuel cell vehicle Using power hardware-in-the-loop concept" - Doctoral Thesis, 2010
- [5] Kheraluwala, M.N., et al., Performance characterization of a high-power dual active bridge. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1992. 28(6): p. 1294-1301.
- [6] Kheraluwala, M.H., et al. Performance characterization of a high power dual active bridge DC/DC converter. in *Industry Applications Society Annual Meeting, 1990.*, Conference Record of the 1990 IEEE. 1990.
- [7] Krismer, F., Modeling and Optimization of Bidirectional Dual Active Bridge DC-DC Converter Topologies - Doctoral Thesis, 2010
- [8] Alonso, A.R., et al. An overall study of a Dual Active Bridge for bidirectional DC/DC conversion. in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE*. 2010.
- [9] <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html> , em Janeiro 2016

- [10] Qin, Hengsi, "Dual active bridge converters in solid state transformers" (2012). Doctoral Dissertations. Paper 1914.
- [11] Fu, Jianfu, "Multiport high frequency transformer coupled bidirectional Dc-Dc converters for hybrid renewable energy system" - Doctoral thesis, 2012
- [12] Sandro Filipe Martins do Vale, "Micro inversor para painel fotovoltaico", Master thesis, 2012
- [13] Pedro Miguel de Sousa Peixoto, "Conversor DC/DC de Elevada Eficiência", Master thesis, 2014
- [14] Guacaneme, J. et al. "Dynamic modeling of a dual active bridge DC to DC converter with average current control and load-current feed-forward" in *Int. J. Circ. Theor. Appl.* 2015; 43:1311-1332
- [15] Mohan, N., T.M. Undeland, and W.P. Robbins, *Power Electronics - Converters, Applications, and Design* (3rd Edition). 2003: John Wiley & Sons.
- [16] M.E. Glavin, Paul K.W. Chan, S. Armstrong, and W.G Hurley, "A Stand-alone Photovoltaic Supercapacitor Battery Hybrid Energy Storage System" 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2008
- [17] BoB Bell and ajay Hari," Topology Key to Power Density in Isolated DC-DC Converters" *Power Electronics Technology*, 2011
- [18] Rashid, M.H., *Power Electronics Handbook*. 2001: Academic Press.
- [19] HUIYING ZHENG, "Solar photovoltaic energy generation and conversion –from devices to grid integration" Doctoral thesis, 2013
- [20] S. D'Arco, R. Rizzo, D. Coll-Mayor, P. Tricoli, "Energy Management of Stand-Alone Power Systems with Renewable Energy Sources", 2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS)
- [21] H. Qin and J. W. Kimball, "Ac-ac dual active bridge converter for solid state transformer," in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2009, pp. 3039-

3044, 2009.

[22] F. Krismer, J. Biela, and J. Kolar, "A comparative evaluation of isolated bi-directional dc/dc converters with wide input and output voltage range," in IEEE Industry Applications Society (IAS) Annual Meeting, 2005, vol. 1, pp. 599-606, Oct. 2005.

[23] Mohan, N., T.M. Undeland, and W.P. Robbins, Power Electronics - Converters, Applications, and Design (3rd Edition). 2003: John Wiley & Sons.