



Mário António Correia da Silva

Topologias Activa/Passiva para Gestão de Energia em Sistemas Híbridos

Dissertação de Mestrado

4 de Setembro de 2013



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



Universidade de Coimbra
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Dissertação de Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
- Especialização em Automação -

Topologias Activa/Passiva para Gestão de Energia em Sistemas Híbridos

Mário António Correia Silva

Orientador:

Professor Doutor Humberto Manuel Matos Jorge

Co-orientadores:

Professor Doutor João Pedro Fernandes Trovão

Professor Doutor Paulo José Gameiro Pereirinha

Júri:

Presidente: Professor Doutor Luís Alberto da Silva Cruz

Vogais:

Professor Doutor Humberto Manuel Matos Jorge

Professora Doutora Lúcia Maria dos Reis Albuquerque Martins

Coimbra, Setembro de 2013

“O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia”

Robert Collier

Agradecimentos

O percurso efectuado na elaboração desta dissertação foi longo e nem sempre linear, pelo que, no momento da sua apresentação é de toda justiça afirmar que ele não teria chegado a bom termo se não fossem as sugestões, orientações e os apoios, de diversa ordem, que me foram facultados e que aqui, reconhecidamente enumero.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Humberto Jorge, o apoio e orientação prestada ao longo deste trabalho e a contribuição na revisão do texto da dissertação.

Ao Professor Doutor João Trovão e ao Professor Doutor Paulo Pereirinha, não apenas pela orientação do trabalho, estímulo e acompanhamento empenhado manifestados desde a primeira hora, mas também pela amizade e por terem confiado em mim até ao fim.

Ao Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra e ao Instituto Superior Engenharia de Coimbra por terem disponibilizado algum do equipamento e instalações utilizados para a realização do trabalho experimental.

À FCT, o apoio dado através do Projecto MESMO-EV: *Multiple Energy Storage Systems Management Optimization for Electric Vehicles* (PTDC/EEA-EEL/121284/2010 e FCOMP-01-0124-FEDER-020391), que permitiu cobrir parte dos encargos económicos inerentes à realização deste trabalho.

A todos os amigos que me acompanharam nesta jornada académica, especialmente ao Carlos Silva e Joana Figueira, com os quais pude partilhar momentos inesquecíveis.

Quero agradecer aos meus colegas de laboratório, Hugo Melo e Felipe Machado, pelo enorme companheirismo, entreatajuda e boa disposição, tanto nos momentos de trabalho como de lazer.

E por último, mas de forma alguma menos importante, ao meu Pai, Mário Silva, à minha Mãe, Emília Maria, e à minha irmã, Mónica, por serem uma família atenta e interessada no meu sucesso e realização pessoal, que me apoia e ajuda a manter a cabeça erguida ao longo dos altos e baixos da vida.

Resumo

O aumento das preocupações em torno das questões ambientais, do preço do petróleo, e da eficiência energética, tem vindo a encorajar e estimular uma crescente procura e o desenvolvimento de soluções alternativas de transporte. Assim, o Veículo Eléctrico tem ganho especial relevância nos desenvolvimentos para uma mobilidade cada vez mais sustentável. Os recentes desenvolvimentos em torno dos veículos eléctricos apontam para a necessidade de uma abordagem ampla e cuidada no que diz respeito às fontes de energia comercialmente disponíveis e, dentro destas, as passíveis de serem aplicadas neste tipo de sistemas.

As fontes de energia são, no caso do veículo eléctrico, de extrema importância, pois são as responsáveis pelo seu funcionamento. O veículo eléctrico tem a necessidade de uma fonte de energia com elevada potência específica e com elevada energia específica, no entanto, não existe actualmente disponível uma fonte de energia que satisfaça estas necessidades. As fontes disponíveis actualmente possuem apenas uma das características referidas, elevada potência específica ou elevada energia específica.

A resolução deste problema torna-se assim uma motivação para o uso de múltiplas fontes de energia em veículos eléctricos. Esta abordagem traz consigo outros desafios, tais como, o método de interligação entre as fontes de energia, o método de interligação das mesmas com o sistema de propulsão (motor, variador electrónico de velocidade), e a estratégia de gestão de energia para uma eficiente regulação das fontes de energia.

Assim, o trabalho realizado passou pelo projecto, implementação e comparação de várias topologias de electrónica de potência para a interligação de múltiplas fontes de energia num veículo eléctrico, bem como o estudo e implementação de estratégias para a gestão energética dessas fontes de energia.

Para comprovar o funcionamento das topologias propostas e da estratégia de gestão de energia procedeu-se à sua simulação em ambiente MatLab/Simulink, posteriormente foram feitos testes experimentais utilizando *software* e *hardware* da National Instruments.

Palavras-chave: Veículo Eléctrico; Múltiplas Fontes de Energia; Topologias; Electrotécnica de Potência; Gestão de Energia.

Abstract

The increased concern with environment, the rising of the oil price and energetic efficiency encourages and stimulates an urgent search for novel transportation means. Therefore, the Electric Vehicle is gaining prominence on the way to sustainable mobility. Recent developments on electric vehicle's area point to the necessity of a careful approach concerning the energy sources suitable for electric vehicles.

Energy sources are very important for the well functioning for the electric vehicles. The electric vehicle has the necessity of a high power and high density source, nevertheless, there are not in the market a source that comprises these two aspects.

The resolution for this problem becomes the motivation for the hybridization concept on electric vehicles. This concept brings a few challenges like, the interconnection between the energy sources, the interconnection of the energy sources to the load (motor, voltage source inverter) and the strategy of the energy management for the used sources.

Then, the developed work has gone through the project, implementation and comparison of the power electronic topologies to interconnect the sources on the electric vehicle. The energy strategy has been also studied.

To prove the functionality of the proposed topologies and its energy management a simulation was done in MatLab/Simulink environment. Moreover, experimental tests were done in the laboratory using software and hardware from National Instruments.

Keywords: Electric Vehicle; Multiple Energy Sources; Topologies; Power Electronics; Energy Management.

Conteúdo

Resumo	vi
Abstract	viii
Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xiv
Nomenclatura	xvi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento e motivação	1
1.2 Objectivos da dissertação	2
1.3 Trabalho realizado	2
1.4 Estrutura da dissertação	2
2 Estado da Arte	5
2.1 Fontes de energia	5
2.2 Topologias utilizadas em sistemas híbridos	6
2.3 Gestão de energia em sistemas híbridos	8
3 Projecto dos Controladores	11
3.1 Tipo de controladores	11
3.2 Arquitectura de controlo	11
3.2.1 Topologias passivas	12
3.2.2 Topologia activa híbrida	13
4 Sistema de Gestão de Energia	17
4.1 Gestão de energia em topologias passivas	17
4.2 Gestão de energia na topologia activa	18
4.3 Gestão de energia baseada em controladores de lógica difusa	20
5 Simulação	27
5.1 Topologia Passiva vs Topologia Passiva Híbrida	28
5.2 Topologia Passiva Híbrida vs Topologia Activa Híbrida	31

5.3	Simulação da gestão de energia inteligente para topologia activa híbrida . . .	33
6	Comparação Experimental das Topologias	39
6.1	Topologia passiva vs topologia passiva híbrida	40
6.2	Topologia passiva híbrida vs activa híbrida	42
6.3	Gestão de energia inteligente para topologia activa híbrida	46
7	Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros	55
7.1	Conclusão	55
7.2	Sugestões para trabalhos futuros	57

Lista de Figuras

2.1	Comparação de fontes de energia aplicáveis em VE's	6
2.2	Topologia passiva híbrida	7
2.3	Topologia semi-activa	7
2.4	Topologias activas	8
3.1	Arquitectura de controlo para uma fonte de energia	11
3.2	Arquitectura de controlo para a topologia passiva	13
3.3	Arquitectura de controlo para a topologia activa híbrida	14
3.4	Arquitectura de controlo para a topologia activa híbrida	15
4.1	Topologia passiva híbrida	18
4.2	Topologia activa híbrida	19
4.3	Desagregação da frequência do sinal de potência	19
4.4	Topologia activa híbrida com FLC	20
4.5	Funcionamento do controlador de lógica difusa	21
4.6	Conjunto das <i>membership functions</i>	22
4.7	Corrente nas fontes de energia em função das variáveis k e I_t^*	24
5.1	Tensão no barramento DC ao longo do ciclo de condução	28
5.2	Potência nas fontes e no barramento DC ao longo do ciclo de condução	29
5.3	Corrente nas fontes ao longo do ciclo de condução	29
5.4	Tensão nas fontes ao longo do ciclo de condução	30
5.5	Tensão no barramento DC ao longo do ciclo de condução	31
5.6	Potência nas fontes e no barramento DC ao longo do ciclo de condução	32
5.7	Corrente nas fontes ao longo do ciclo de condução	32
5.8	Tensão no barramento DC ao longo do ciclo de condução	33
5.9	Tensão no barramento ao longo do ciclo de carga	34
5.10	Potência nas fontes ao longo do ciclo de carga	35
5.11	Corrente nas fontes ao longo do ciclo de carga	36
5.12	Tensão nas fontes ao longo do ciclo de carga	36
6.1	Imagem de bancada com o protótipo experimental	39
6.2	Esquema do protótipo experimental	40
6.3	Tensão no barramento DC ao longo do ciclo de condução	41

6.4	Potência das fontes ao longo do ciclo de condução	41
6.5	Corrente nas fontes ao longo do ciclo de condução	42
6.6	Tensão nas fontes ao longo do ciclo de condução	42
6.7	Tensão no barramento ao longo do ciclo de condução	43
6.8	Distribuição das potências do ciclo de condução pelas fontes	44
6.9	Níveis de corrente nas fontes durante o ciclo de condução	45
6.10	Níveis de tensão nas fontes durante o ciclo de condução	45
6.11	Tensão no barramento ao longo do ciclo de condução	47
6.12	Distribuição das potências do ciclo pelas fontes	48
6.13	Níveis de corrente nas fontes durante o ciclo de condução	49
6.14	Níveis de tensão nas fontes durante o ciclo de condução	49
6.15	Tensão no barramento ao longo do ciclo de carga	50
6.16	Potência nas fontes ao longo do ciclo de carga	51
6.17	Corrente nas fontes ao longo do ciclo de carga	52
6.18	Tensão nas fontes ao longo do ciclo de carga	52

Lista de Tabelas

4.1	Regras aplicadas no controlador de lógica difusa	23
5.1	Parâmetros das fontes de energia utilizadas	27

Nomenclatura

ARTEMIS - Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems

cRIO - Compact Reconfigurable Input Output

Bat - Bateria(s)

DC - *Direct Current* (Corrente continua)

DC_{Link} - Barramento DC comum

HSE - *High Specific Energy* (Energia Específica Elevada)

HSP - *High Specific Power* (Potência Específica Elevada)

IGBT - *Insulated Gate Bipolar Transistor* (Transistor bipolar de porta isolada)

PID - Proporcional Integral Derivativo

PWM - *Pulse Width Modulation* (Modulação por largura de pulso)

SC - *Supercapacitor* (Supercondensador)

SoC - *State of the Charge* (Estado de carga)

VE - Veículo Eléctrico

VEIL - Veículo Eléctrico Isento de Licença de condução

VEV - Variador Electrónico de Velocidade

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento e motivação

Existe actualmente a intenção generalizada e crescente, por parte da comunidade mundial, de que as pessoas se tornem mais amigas do ambiente. Apesar de esta não ser uma preocupação que atinja todas as nações de igual modo, pois vivemos num mundo onde impera a desigualdade, começam a surgir, sobre tudo no países mais desenvolvidos, soluções para esta problemática.

A maioria das soluções passam pela redução da dependência dos combustíveis fósseis, onde, com uma breve análise, se pode concluir que o sector dos transportes desempenha um papel muito importante, se não o mais importante.

Desta forma, a crescente utilização dos veículos eléctricos assume um papel fundamental para uma mobilidade mais sustentável.

Hoje, passados mais de 130 anos depois da criação do primeiro veículo eléctrico por William Ayrton e John Perry [1], ainda falamos deste tema com uma mão cheia de dúvidas. Actualmente as questões à volta dos veículos eléctricos, para além do seu preço, estão maioritariamente relacionadas com as fontes de energia utilizadas e consequentemente com a sua autonomia. A menos que seja alcançado um grande avanço tecnológico ao nível do armazenamento electroquímico de energia, o futuro dos veículos eléctricos passará, pelo menos em alguns casos, por sistemas de alimentação com múltiplas fontes de energia [2, 3, 4], a fim de beneficiar das melhores características de cada fonte actualmente disponíveis comercialmente.

Nesta dissertação dar-se-á primazia à temática da hibridização de fontes de energia, onde se destacam particularmente os tipos de fonte actualmente mais utilizados em hibridização de fontes de energia, a forma como esta é realizada e, por último, o tipo de gestão de energia utilizada em cada uma dessas hibridizações.

1.2 Objectivos da dissertação

A presente dissertação teve como objectivos principais, o estudo comparativo de diferentes topologias utilizadas na hibridização de fontes de energia, a análise das estratégias de gestão passíveis de serem aplicadas às topologias em causa e a construção em ambiente laboratorial de um protótipo por forma a validar experimentalmente os estudos realizados.

Todo o estudo desenvolvido sobre as topologias activa/passiva para sistemas híbridos está directamente ligado à temática do veículo eléctrico, como exemplo de carga, onde a hibridização é uma mais-valia, e portanto este será focado ao longo de todo o trabalho.

1.3 Trabalho realizado

O trabalho efectuado na presente dissertação centrou-se inicialmente no estudo das topologias utilizadas em sistemas híbridos e sua gestão. Para isso foi efectuada uma análise ao estado da arte no que diz respeito às fontes de energia utilizadas em sistemas híbridos, bem como, a análise aos tipos de conversores que permitem a construção das diferentes topologias.

A análise efectuada teve sempre em consideração a viabilidade da implementação prática dos sistemas em causa, nomeadamente no protótipo VEIL (Veículo Isento de Licença).

Na fase seguinte procedeu-se ao estudo da arquitectura de controlo a utilizar nas várias topologias e sua implementação prática em ambiente Matlab/Simulink. Foi ainda abordada a implementação de um controlador de lógica difusa como camada de alto nível de gestão de energia, para maximizar as potencialidades da topologia activa híbrida, sendo esta classificada como estratégia de gestão de energia inteligente.

Por último, tendo sido uma das fases mais difíceis desta dissertação, procedeu-se à construção do protótipo que serviu para realizar os testes experimentais. Nesta fase foram efectuadas todas as ligações físicas relacionadas com as diferentes topologias (fontes de energia, converdores DC-DC, sensores, elementos passivos e controlador), bem como, a passagem de todo o código existente em ambiente Matlab/Simulink para a linguagem LabVIEW.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em sete capítulos. O primeiro capítulo (1) é a introdução, neste capítulo são descritos o enquadramento e os objectivos deste trabalho, é ainda feita uma abordagem sucinta ao trabalho realizado durante a dissertação e à estrutura da mesma.

O segundo (2) capítulo, dá ao leitor uma noção do estado da arte no que diz respeito às técnicas de gestão e às topologias utilizadas na literatura de referência na área dos veículos eléctricos.

Nos terceiro (3) e quarto (4) capítulos são abordadas as diferentes topologias, estratégia de gestão de energia aplicável a cada topologia, bem como a arquitectura que permite o seu controlo.

No quinto (5) capítulo, são apresentados os modelos utilizados na simulação dos diferentes sistemas e respectivos resultados de simulação, com vista a uma abordagem mais rápida e eficaz à implementação experimental das diversas topologias estudadas durante a realização deste trabalho.

A implementação dos diversos set-ups laboratoriais e os resultados experimentais obtidos são apresentados e discutidos no sexto (6) capítulo.

Por último, no sétimo (7) capítulo apresenta-se ao leitor as conclusões deste trabalho bem como sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 Fontes de energia

Existem actualmente várias fontes de energia que devem ser classificadas essencialmente pela energia e potência específica que as caracterizam. A energia específica determina o alcance/autonomia do veículo eléctrico e a potência específica define a potência máxima, em função da massa da fonte, determinando as suas capacidades de aceleração.

Portanto, para aplicações em veículos eléctricos, as propriedades desejáveis para o sistema de alimentação são uma potência específica elevada, uma energia específica elevada e um elevado número de ciclo de carga-descarga, e por conseguinte uma grande vida útil. Como é conhecido, ainda permanecem desafios técnicos para resolver simultaneamente esses requisitos de desempenho, prevalecendo fortes restrições ao investimento inicial e custos de reposição.

As fontes de energia plausíveis de serem aplicadas nestes veículos são, baterias (chumbo (Pb), níquel cádmio (Ni-Cd), hidretos metálicos de níquel (Ni-MH) e iões de Lítio (Li-ion)), supercondensadores (SCs), pilhas de Combustível (Fuel Cells - FC). Fontes de energia como volantes de inércia (Flywheels), e painéis fotovoltaicos (PV), foram outrora consideradas benéficas para aplicações em VE, mas os estudos mais recentes apontam, respectivamente, em sentido contrário devido à falta de segurança, fraca relação preço-capacidade energética, prejuízo ambiental e baixa eficiência [2, 3].

A Figura 2.1 mostra a comparação entre várias fontes de energia aplicáveis a veículos eléctricos, tendo por base a sua energia e potência específicas.

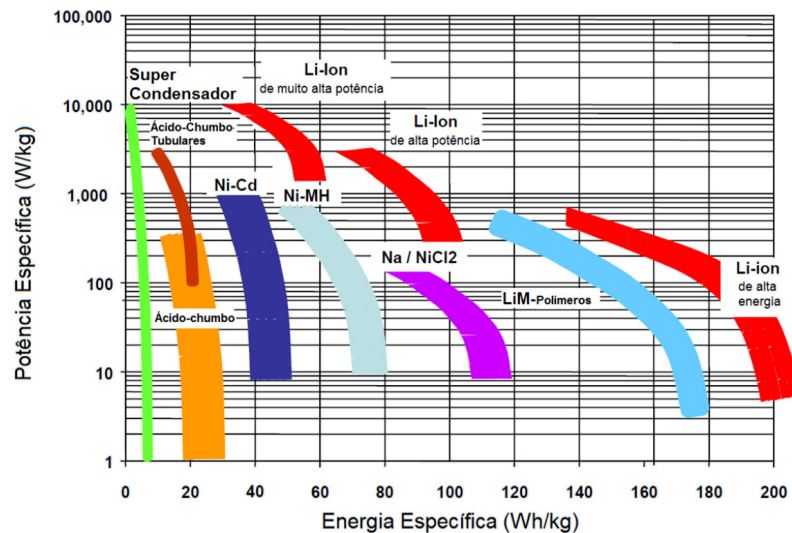


Figura 2.1: Comparação de fontes de energia aplicáveis em VE's [5]

Através da Figura 2.1 fica evidenciado que as fontes utilizadas para a aplicação em veículos eléctricos são maioritariamente baterias e supercondensadores.

2.2 Topologias utilizadas em sistemas híbridos

A escolha da topologia correcta é de grande importância para aplicação em veículos eléctricos, a topologia adequada vai garantir a utilização correcta das fontes de energia, tirando o máximo proveito das características das mesmas, garantindo ainda que a potência é entregue ao elemento seguinte (barramento DC, VEV ou motor) respeitando a gama de funcionamento onde este tem melhor rendimento.

Os veículos eléctricos, com recurso a múltiplas fontes de energia, necessitam de uma arquitectura do sistema de alimentação bastante evoluída, resultado da interligação de um maior número de sistemas de electrónica de potência, o que significa uma maior complexidade de todo o sistema (potência e comando).

As topologias estão normalmente classificadas de acordo com os graus de liberdade que as mesmas oferecem no controlo do fluxo de potência. Assim, estas podem ser classificadas em: topologias passivas, topologias semi-activas e topologias activas, tendo as mesmas sido já abordadas em trabalhos nesta área [6, 7, 8, 9]. As topologias passivas são as mais simples, podendo ser utilizadas só com uma fonte ou permitindo ainda a hibridização através da ligação em paralelo das fontes em causa. A Figura 2.2 ilustra a topologia passiva híbrida, a hibridização é feita com baterias e SCs. Apesar de a topologia passiva poder ser configurada para a utilização com uma ou mais fontes, toda a energia transferida da(s) fonte(s) para o barramento DC é regulada por um conversor DC-DC, para adaptatividade dos níveis de tensão.

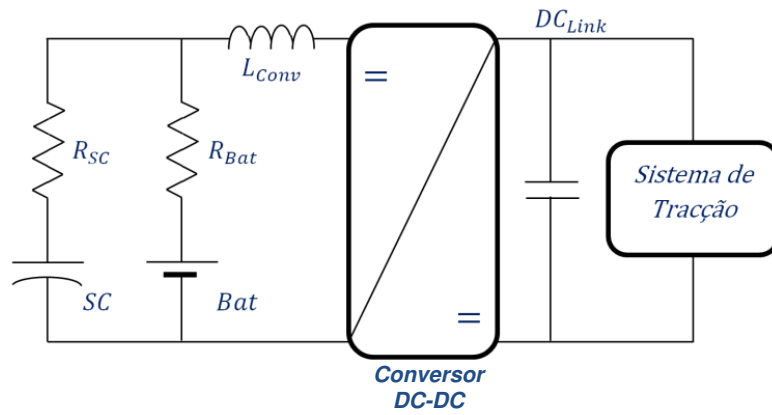


Figura 2.2: Topologia passiva híbrida

A Figura 2.3 apresenta uma possível configuração para a topologia semi-activa, esta topologia envolve sempre o uso de duas fontes de energia, sendo que, uma delas é regulada por um conversor DC-DC e a outra está directamente ligada ao barramento DC. Esta topologia não permite uma utilização eficaz da fonte que está ligada ao barramento DC, dado que, esta fonte vai sofrer com as variações constantes deste barramento por acção da potência exigida pela carga.

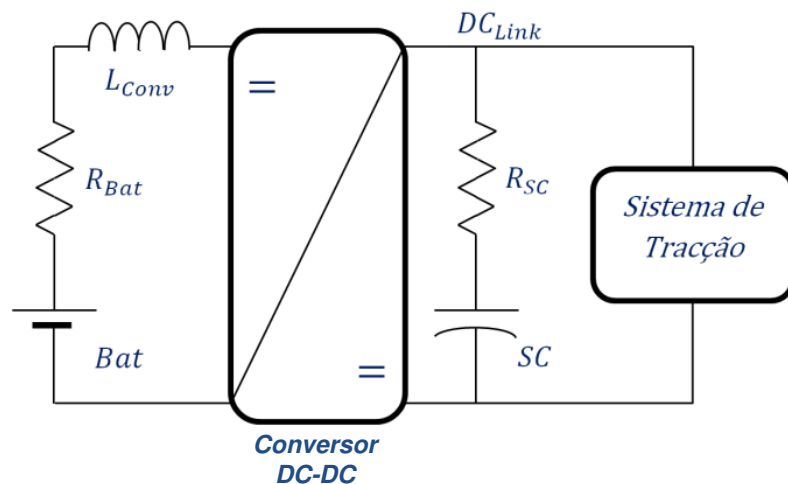


Figura 2.3: Topologia semi-activa

A posição ocupada pelas fontes na topologia semi-activa pode permutar, a da Figura 2.3 mostra que a fonte ligada ao barramento DC são os SCs e que a fonte que é controlada pelo conversor DC-DC são as baterias. Existem topologias semi-activas em que são as baterias a estarem ligadas directamente ao barramento DC e são os SCs, ou outra fonte, a serem regulados pelo conversor DC-DC.

A topologia activa é apresentada na Figura 2.4 em duas configurações diferentes. Na topologia activa ambas as fontes são reguladas por um conversor DC-DC, o que traz a esta topologia um acréscimo no esforço de controlo. A Figura 2.4a mostra a topologia activa numa configuração série, isto é, a energia para fluir da fonte mais à esquerda para o barramento DC tem que passar obrigatoriamente pela outra fonte e pelo respectivo conversor DC-DC. Esta

configuração tem a desvantagem de não haver a possibilidade de trocas energéticas directas entre o barramento DC e as duas fontes de energia.

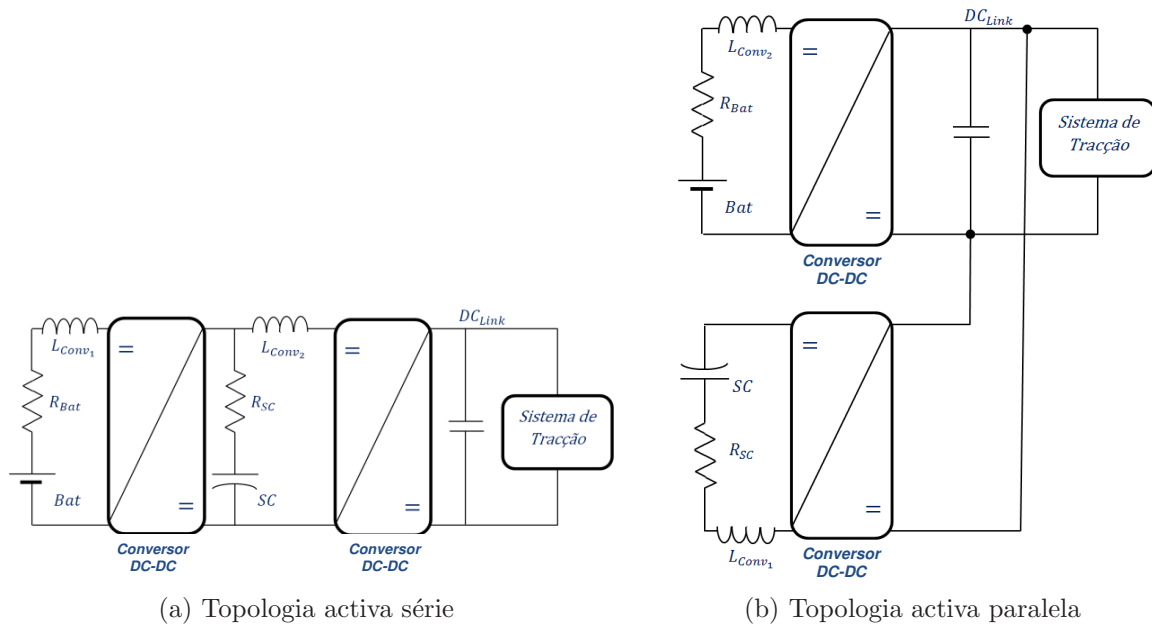


Figura 2.4: Topologias activas

A Figura 2.4b mostra a topologia activa em configuração paralela. Esta configuração é efectuada através da ligação em paralelo do conjunto fonte de energia e conversor DC-DC. Também aqui o esforço de controlo é alto devido ao controlo independente das duas fontes de energia. Esta topologia permite que hajam trocas de energia directas entre o barramento DC e qualquer uma das fontes, permite ainda que o sistema continue em funcionamento no caso de falha de uma das fontes ou conversores DC-DC, o que não acontecia com a topologia activa em configuração série.

É possível verificar que as topologias passiva e semi-activa têm associadas a si um menor número de comutadores de potência, sendo por isso mais fáceis de controlar e de menor custo. Porém, estas duas topologias não oferecem um número de graus de liberdade tão grande como a topologia activa. Apesar da topologia activa ter associado um maior esforço de controlo e um maior número de comutadores de potência, esta torna-se vantajosa na medida em que permite uma gestão mais criteriosa das fontes de energia.

2.3 Gestão de energia em sistemas híbridos

A gestão de energia está intrinsecamente relacionada com a topologia utilizada na hibridização das fontes. A implementação de um sistema de alimentação com recurso a múltiplas fontes de energia, implica o desenvolvimento de um sistema de gestão de energia que optimize as transferências de potência entre as fontes e os actuadores. Essa gestão deverá ser feita com o objectivo de maximizar a autonomia do veículo e o ciclo de vida das fontes de energia, garantindo uma ampla utilização da capacidade instalada no veículo, e recorrendo a uma ou

a outra fonte, ou mesmo a duas em simultâneo, em função das características do percurso a realizar e das fontes utilizadas. Assim, é fundamental que uma gestão eficiente dos fluxos de energia, em veículos eléctricos com múltiplas fontes, tenha um sistema de controlo associado, capaz de responder instantaneamente a picos de potência aquando da aceleração ou desaceleração do veículo (por exemplo, circuitos urbanos ou ultrapassagens rápidas), sem perda da capacidade de condução [10]. Portanto, com o aumento da complexidade do sistema de energia eléctrica embarcado neste tipo de veículos, serão necessárias estratégias de gestão e de controlo mais evoluídas, no sentido de se extrair o máximo benefício de um sistema de alimentação com múltiplas fontes [11].

O conceito de gestão de energia é principalmente baseado nas operações de armazenamento e fornecimento de potência de cada fonte, para instantaneamente fazer coincidir a potência fornecida com a solicitada pelo veículo ou a gerada pelo sistema de tracção com a armazenada.

Podem ser encontradas na literatura um elevado número de abordagens relativamente às estratégias de gestão de energia [12]. Estas podem ser baseadas em regras ou em métodos de optimização matemática. Um dos métodos baseados em regras é o da desagregação da frequência do sinal de potência, este consiste na divisão em altas frequências e baixas frequências, por forma a que estes possam servir como referência nas fontes cujas características se encaixem na dinâmica dos respectivos sinais obtidos [9]. Este método pode ser aplicado de duas formas distintas, estando uma delas relacionada com a topologia passiva híbrida e a outra com a topologia activa híbrida.

A obtenção da desagregação na frequência do sinal de potência é possível quando se utiliza a topologia passiva híbrida na medida em que, fazendo a ligação em paralelo de duas fontes com diferentes características dinâmicas, estas fontes de energia vão reagir de forma diferente às solicitações de potência. A fonte com a dinâmica de resposta mais rápida vai funcionar como filtro para as componentes de alta frequência do sinal de potência. A desvantagem deste método é a sua inflexibilidade, dado que, depois de escolhidas as fontes de energia a hibridizar, as frequências de sinal vistas pelas fontes vão ser sempre iguais, funcionando assim como um filtro onde é impossível alterar a frequência de corte.

A outra forma de obter a desagregação na frequência do sinal de potência é através do conhecimento prévio do ciclo de condução do veículo eléctrico, isto é, conhecendo o sinal de potência que vai ser pedido às fontes de energia pode-se fazer a desagregação do mesmo na frequência. A utilização deste método implica a utilização da topologia passiva, visto que, depois de feita a desagregação são obtido pelo menos dois sinais que servirão de referência para as respectivas fontes de energia.

Ainda baseado em regras temos o exemplo dos *Fuzzy Logic Controllers* (FLC) [13], onde o conhecimento de experiências anteriores facilita na construção destas mesmas regras, porém este método pode ser aplicado em tempo real. Os métodos de optimização matemáticos, como o caso do *Particle Swarm Optimization* (PSO) ou *Simulated Annealing* (SA), são métodos que minimizam ou maximizam funções objectivo por forma a garantir o

valor óptimo de determinadas variáveis [14, 15]. Os métodos de optimização podem ser aplicados em situações onde o ciclo de condução do veículo eléctrico é previamente conhecido, e assim é obtida a optimização global, ou podem ser aplicados em tempo real, obtendo-se uma optimização chamada de optimização local [14, 15].

Capítulo 3

Projecto dos Controladores

3.1 Tipo de controladores

Este capítulo tem como propósito a apresentação dos controladores utilizados para o comando de toda a electrónica dos conversores DC-DC.

O controladores utilizados são de natureza Proporcional Integrativa Derivativa (PID). Esta é uma tecnologia de controlo que actualmente é bastante utilizada no controlo de processos industriais e que tenta corrigir o erro entre a variável medida do processo e o *set-point* desejado. Esta correcção é obtida através da aplicação de um sinal correctivo de saída, para ajustar a resposta do sistema de acordo com o pretendido [16, 17, 18].

3.2 Arquitectura de controlo

A arquitectura de controlo utilizada para as diferentes topologias baseia-se num método chamado *Decoupling Method*, sendo este um método bastante robusto cuja funcionalidade foi já comprovada em vários trabalhos teóricos e experimentais presentes na literatura de referência [19, 20].

O *Decoupling Method* permite o controlo da estabilidade do barramento DC através do controlo em corrente da fonte de energia. Este método utiliza para isso uma cascata de controladores PI como ilustra a Figura 3.1. A cascata de controladores é composta por um controlador PI de tensão seguido de um controlador PI de corrente.

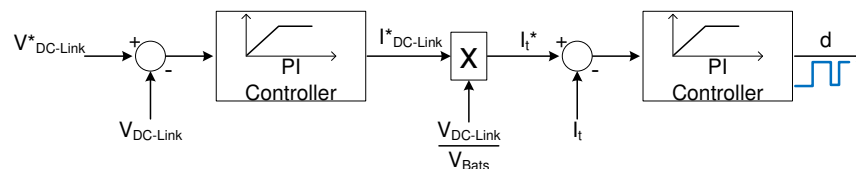


Figura 3.1: Arquitectura de controlo para uma fonte de energia

O primeiro controlador PI (Figura 3.1 à esquerda) controla a tensão do barramento DC, para isso este controlador recebe o *set-point* de tensão desejado ($V_{DC-Link}^*$) e a mesma variável do processo medida ($V_{DC-Link}$), actuando por forma a anular o erro entre o *set-point* e a

tensão medida. O sinal de saída deste controlador é o valor numérico da corrente referida ao barramento DC ($I_{DC-Link}^*$) que seria necessária para anular o erro de tensão verificado, este valor de corrente será transformado por forma a ser referido à tensão da fonte e depois tomado como referência para o controlador seguinte. Baseando-se na igualdade da potência de entrada e de saída do conversor DC-DC, o valor da corrente referido ao barramento DC, $I_{DC-Link}$, pode ser referido à fonte como mostra a equação 3.1.

$$P_{in} = P_{out} \Leftrightarrow V_{in} \cdot I_{in} = V_{out} \cdot I_{out} \Leftrightarrow I_{in} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \cdot I_{out} \quad (3.1)$$

Deve-se ter em consideração que, para a explicação do funcionamento da arquitectura de controlo, a entrada do conversor DC-DC está ligada à fonte de energia e a saída está ligada ao barramento DC. Assim a equação 3.1 pode ser reescrita como mostra a equação 3.2.

$$V_{fonte} \cdot I_{fonte} = V_{DC-Link} \cdot I_{DC-Link} \Leftrightarrow I_{fonte} = \frac{V_{DC-Link}}{V_{fonte}} \cdot I_{DC-Link} \quad (3.2)$$

A corrente calculada, referida à fonte de energia, necessária para fazer face ao erro de tensão será tida como referência do segundo controlador PI.

O segundo controlador PI (Figura 3.1 à direita) vai calcular o erro entre a corrente de referência e a corrente medida, respectivamente I_t^* e I_t na Figura 3.1, sendo a saída deste controlador o sinal de *Pulse Width Modulation* (PWM) a aplicar aos comutadores de potência.

O *Decoupling Method* tem como grande vantagem o facto de, depois de calculada a corrente referida à fonte de energia como corrente total necessária para compensar o erro de tensão, esta corrente não ter necessariamente que ser extraída de uma única fonte de energia. Tratando-se de topologias activas híbridas a corrente calculada pode ser dividida em parcelas, onde cada parcela pode ser pedida a uma fonte de energia diferente, bastando para isso aumentar o número de controladores PI de corrente e os respectivos conversores DC-DC consoante o número de fontes de energia com que se pretende trabalhar.

3.2.1 Topologias passivas

A arquitectura global de controlo para o caso da topologia passiva só com baterias está ilustrada na Figura 3.2.

No caso onde são usadas apenas baterias como fonte de energia teremos o *Decoupling Method* baseado na equação 3.3. Neste caso as variáveis sob controlo dos controladores de tensão e de corrente são, respectivamente, o $V_{DC-Link}$ e o I_{Bat} .

$$V_{Bat} \cdot I_{Bat} = V_{DC-Link} \cdot I_{DC-Link} \Leftrightarrow I_{Bat} = \frac{V_{DC-Link}}{V_{Bat}} \cdot I_{DC-Link} \quad (3.3)$$

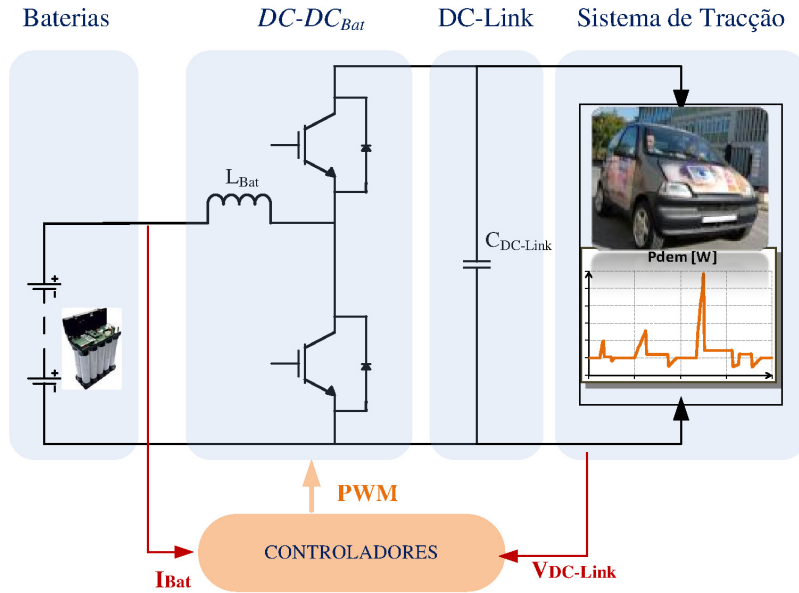


Figura 3.2: Arquitectura de controlo para a topologia passiva

No caso em que é utilizada a topologia passiva híbrida, a única alteração a registar é a adição de uma fonte de energia à que já existe, ficando as duas fontes directamente acopladas. Recorrendo à Figura 3.2 e considerando que a segunda fonte seriam super-condensadores, as duas fontes iriam partilhar a mesma bobina, denominada na figura por L_{Bat} , e o mesmo conversor DC-DC, denominado na figura por $DC - DC_{Bat}$.

Assim, e porque as duas fontes seriam ligadas em paralelo directamente nos seus terminais, a corrente que atravessaria a bobina L_{Bat} seria a soma das correntes proveniente das baterias e dos SCs, por outras palavras, na Figura 3.2 onde se lê I_{Bat} deveria ler-se $I_{Bat\&SCs}$. Em termos de equações, para o caso da topologia passiva híbrida, o *Decoupling Method* baseia-se na equação 3.4.

$$V_{Bat\&SCs} \cdot I_{Bat\&SCs} = V_{DC-Link} \cdot I_{DC-Link} \Leftrightarrow I_{Bat\&SCs} = \frac{V_{DC-Link}}{V_{Bat\&SCs}} \cdot I_{DC-Link} \quad (3.4)$$

Ao nível do controlador PI não haverá qualquer alteração uma vez que, para este, não estarão visíveis o número de fontes de energia que contribuem para o sistemas, pois, este controlador terá apenas acesso à informação do sensor de corrente $I_{Bat\&SCs}$ (que como já foi referido é o somatório de I_{Bat} e I_{SCs}) e à informação do sensor de tensão $V_{Bat\&SCs}$.

3.2.2 Topologia activa híbrida

No caso da aplicação do *Decoupling Method* à topologia activa híbrida há um aumento da complexidade ao nível do controlo. Neste caso as fontes de energia serão vistas, pelos respectivos controladores, como independentes umas das outras e serão consideradas tantas fontes quantas as escolhidas para integrar o sistema global.

Para um número indefinido de fontes de energia o *Decoupling Method* baseia-se na equação

3.5, onde as variáveis sob controlo são as correntes de cada fonte de energia e a tensão do barramento DC $\{I_{fonte_1}, I_{fonte_2}, \dots, I_{fonte_n}, V_{DC-Link}\}$.

$$V_{fonte_1} \cdot I_{fonte_1} + V_{fonte_2} \cdot I_{fonte_2} + \dots + V_{fonte_n} \cdot I_{fonte_n} = V_{DC-Link} \cdot I_{DC-Link} \quad (3.5)$$

Considerando a existência de duas fontes de energia, sendo baterias e SCs, a equação 3.5 é reescrita como mostra a equação 3.6.

$$P_{Bat} + P_{SCs} = P_{DC-Link} \Leftrightarrow V_{Bat} \cdot I_{Bat} + V_{SCs} \cdot I_{SCs} = V_{DC-Link} \cdot I_{DC-Link} \quad (3.6)$$

As variáveis sob controlo, para este caso, são o $V_{DC-Link}$ por parte do controlador de tensão, I_{Bat} por parte do controlador de corrente das baterias e I_{SCs} por parte do controlador de corrente dos super-condensadores.

A Figura 3.3 mostra a arquitectura de controlo proposta para a topologia activa híbrida.

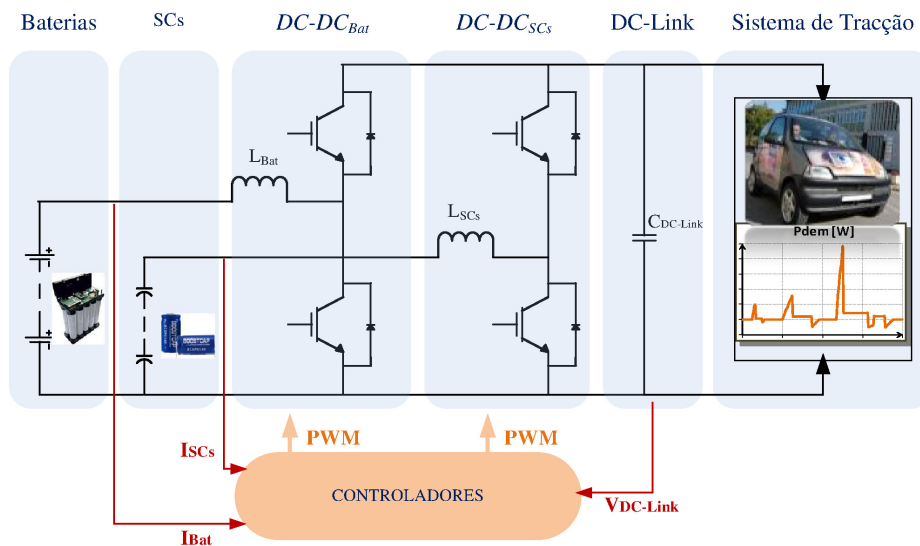


Figura 3.3: Arquitectura de controlo para a topologia activa híbrida

Pode-se ver na Figura 3.3 que cada fonte de energia tem uma bobina e um conversor DC-DC associado, e por isso necessita de um controlador independente. O número de controladores para esta topologia é igual ao número de fontes de energia (controladores de corrente) mais um controlador de tensão, ou seja, o número de controladores é igual a $n_{fontes} + 1$.

Esta topologia permite, com a atribuição de um controlador a cada fonte de energia, uma melhor implementação da gestão de energia, existe ainda a possibilidade da aplicação de várias estratégias para a implementação dessa gestão [15, 21].

A Figura 3.4 mostra a arquitectura de controlo e a forma como a gestão foi incorporada nesta arquitectura.

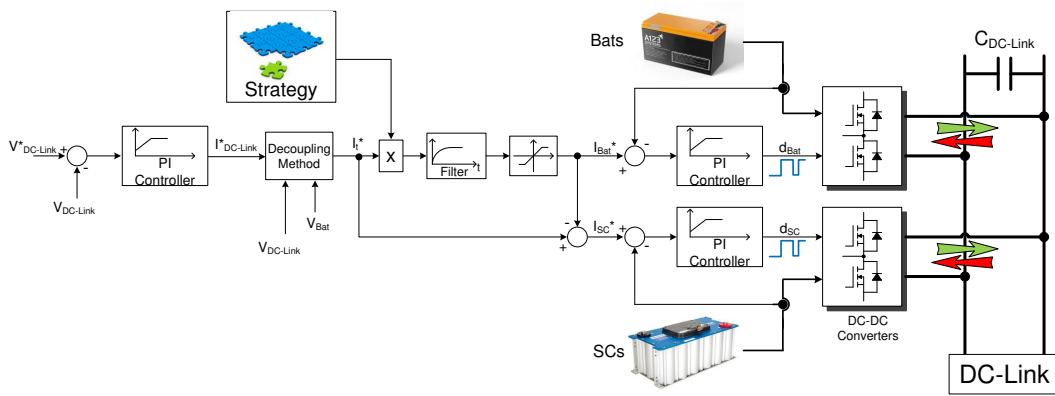


Figura 3.4: Arquitectura de controlo para a topologia activa híbrida

No bloco de estratégia apresentado na Figura 3.4, pode ser implementada qualquer estratégia, de acordo com o projectista e com as fontes de energia utilizadas. O método de introdução desta estratégia permite que se actue sobre uma das fontes, neste caso as baterias, sendo o sistema compensado pela outra fonte de energia, SCs. Esta compensação surge pelo facto de haver uma malha de erro entre os sinais de corrente de cada fonte, sendo o sinal de erro passado aos SCs.

Capítulo 4

Sistema de Gestão de Energia

Neste capítulo serão abordadas as estratégias de gestão de energia a ter em conta para cada topologia. Este é um tópico de maior importância em sistemas híbridos, nomeadamente na área dos veículos eléctricos. Na presente dissertação foram abordadas as seguintes topologias: topologia passiva (só com baterias), topologia passiva híbrida (baterias + SCs) e a topologia activa híbrida (baterias + SCs).

A gestão de energia está separada neste capítulo em duas secções, secção da gestão de energia em topologias passivas e a secção da gestão de energia na topologia activa híbrida.

4.1 Gestão de energia em topologias passivas

A problemática da gestão de energia para o caso da topologia passiva só com uma fonte não se coloca, dado que, toda a energia flui entre a única fonte de energia existente e o barramento DC.

No caso da topologia passiva híbrida já se pode considerar a existência de um tipo de gestão de energia, ainda que esta seja bastante limitada. De salientar que na topologia passiva híbrida os SCs vão ser utilizados na mesma gama de tensão das baterias, este é um aspecto a ter em consideração durante o dimensionamento do *pack* de SCs e pode ser considerado como um aspecto bastante negativo. A Figura 4.1 mostra a configuração utilizada nesta dissertação para o caso das topologias passivas, incluindo a malha de controlo de tensão e de corrente.

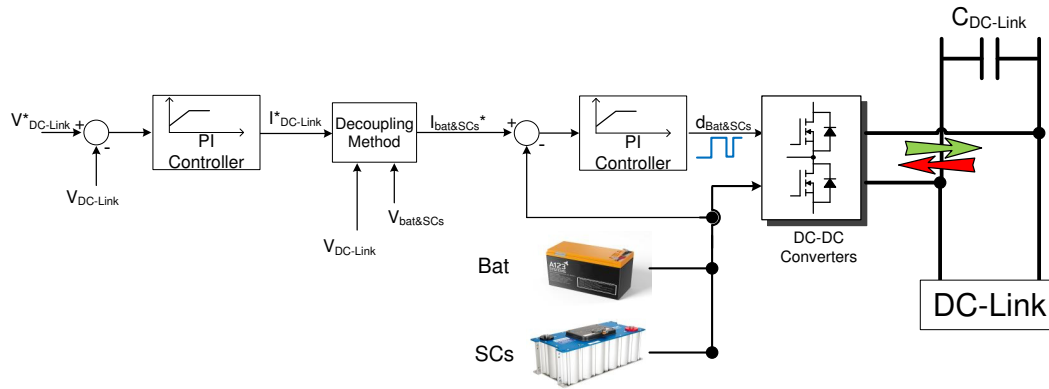


Figura 4.1: Topologia passiva híbrida

Como foi já referido, apenas a topologia passiva híbrida se apresenta capaz de realizar gestão de energia, ainda que de um modo muito simples. A escolha das fontes vai influenciar directamente a gestão de energia dado que vão ser ligadas em paralelo fontes com diferentes características, nomeadamente, a resistência interna de cada uma. Este um aspecto de elevada importância para se obter algum tipo de gestão de energia com resultados práticos.

A resistência interna de cada fonte influencia na sua resposta dinâmica, a fonte com menor resistência interna terá uma resposta dinâmica mais rápida e com menores perdas ao contrário da fonte com maior resistência interna [6]. Das fontes de energia consideradas neste trabalho (baterias e SCs), são os SCs que têm a menor resistência interna. Portanto, durante as transições de elevada frequência e elevada amplitude exigidas ao conjunto das fontes, serão estes a responder com maior rapidez.

Com a junção de baterias e SCs conseguem-se alcançar aspectos positivos como a redução do *ripple* na corrente das baterias, o uso de baterias com menor taxa de descarga e uma utilização mais eficiente das mesmas. Com o aumento da capacidade dos SCs obtém-se uma resistência interna mais baixa e consegue-se uma aproximação do valor máximo e mínimo de corrente atingidos nas baterias, no entanto este incremento de capacidade nos SCs traz desvantagens ao nível do volume ocupado, peso e custo dos mesmos [6].

4.2 Gestão de energia na topologia activa

A topologia activa híbrida surge na tentativa de eliminar alguns dos pontos negativos verificados com a topologia passiva híbrida, nomeadamente, o uso dos SCs numa gama de tensão mais alargada e diferente da das baterias e a possibilidade de um ajuste para uma maior contribuição dos SCs, obtendo-se desta forma uma gestão de energia mais influente no sistema, que se pretende mais eficiente e eficaz [9, 6, 21].

A Figura 4.2 mostra a topologia activa híbrida utilizada nesta dissertação, com as malhas de controlo.

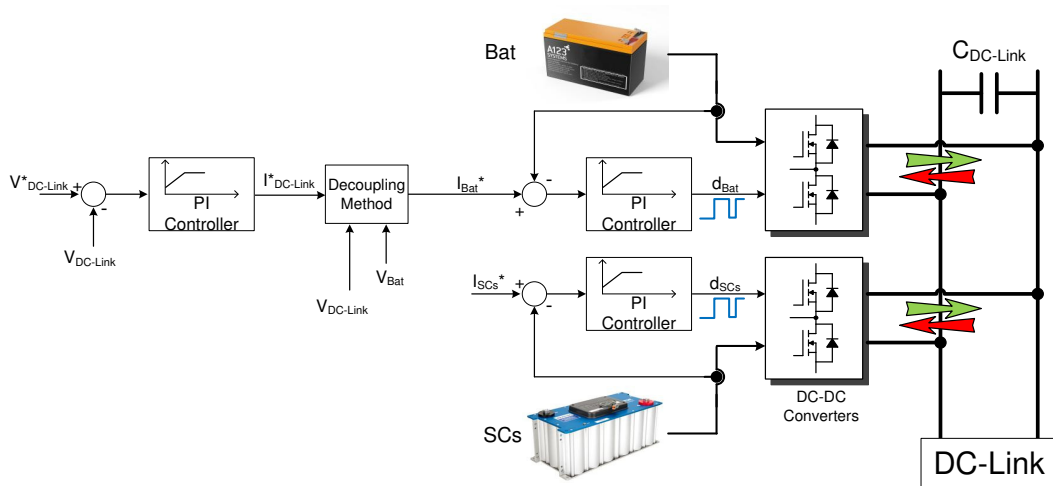


Figura 4.2: Topologia activa híbrida

A primeira estratégia de gestão de energia aplicada a esta topologia foi a desagregação da frequência do sinal de potência. A desagregação do sinal é obtida previamente através da aplicação de um filtro passa-alto ao sinal de potência solicitada às fontes. Na prática, o fornecimento de energia ao veículo divide-se num fornecimento contínuo de potência assegurado pelas baterias e as oscilações serão afectas aos SCs, como mostra a Figura 4.3.

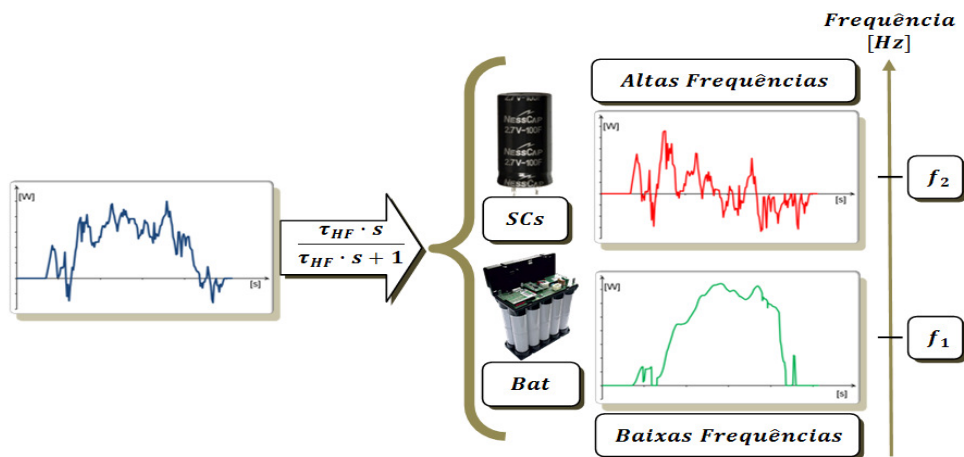


Figura 4.3: Desagregação da frequência do sinal de potência

A obtenção da potência a ser fornecida pelos SCs é dada pela equação 4.1

$$P_{SCs} = \frac{\tau_{HF} \cdot s}{\tau_{HF} \cdot s + 1} \cdot P_{ciclo} \quad (4.1)$$

onde s é o operador de Laplace, τ_{HF} é a constante de tempo do filtro e P_{ciclo} a potência solicitada pelo veículo durante o ciclo de condução. A potência a ser fornecida pelas baterias é dada pela equação 4.2.

$$P_{Bat} = P_{ciclo} - P_{SCs} \quad (4.2)$$

Esta estratégia de gestão da potência, com base na filtragem das componentes do sinal de potência, foi amplamente apresentada e discutida na literatura [10, 22, 23].

Algumas desvantagens podem ser apontadas a este tipo de estratégia, como por exemplo, a necessidade do conhecimento integral prévio do ciclo de condução, a escolha por vezes difícil da frequência de corte do filtro ou o facto de ser exigido ao sinal de referência dos SCs que seja rigorosamente síncrono com o sinal da potência exigida no ciclo de condução, o que por vezes pode não acontecer.

4.3 Gestão de energia baseada em controladores de lógica difusa

Por forma a tentar compensar as desvantagens do método apresentado anteriormente, foi desenvolvida uma arquitectura de forma a permitir que os sinais nunca estejam dessincronizados, bem como a possibilidade de integração de uma estratégia de controlo com maior capacidade de decisão nesta mesma arquitectura.

A Figura 4.4 mostra a arquitectura de controlo e gestão de energia proposta para a topologia activa híbrida, sendo esta baseada na Figura 3.4.

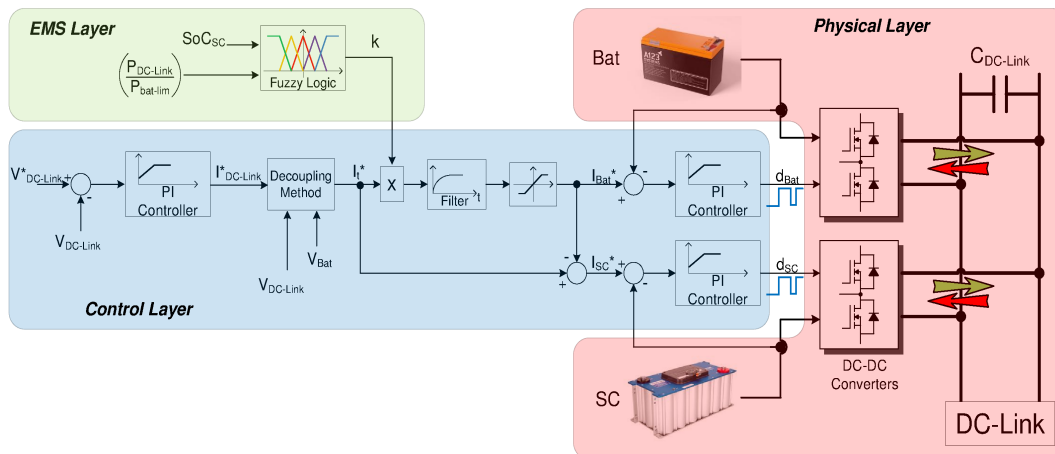


Figura 4.4: Topologia activa híbrida com FLC

A Figura 4.4 está dividida de uma forma hierárquica em camadas, sendo a camada de mais alto nível referente à gestão de energia e designada por *EMS Layer*, a camada intermédia constituída pelos controladores e designada por *Control Layer*, e a camada de mais baixo nível constituída por todo o *hardware*, designando-se por *Physical Layer*.

A arquitectura de gestão e controlo presente na Figura 4.4 apresenta várias vantagens relativamente à da Figura 4.2 [24]. A primeira das vantagens é a não separação dos sinais dentro da malha de controlo, eliminando assim problemas de sincronismo. A inclusão de um filtro passa-baixo e de um saturador na linha do controlador de corrente das baterias é também uma vantagem, prevenindo o aparecimento de pedidos de potência de alta amplitude e frequência às baterias, e a construção de uma malha de erro de corrente permitindo que os SCs façam sempre a compensação entre o valor de referência dado pelo *Decoupling Method* e os limites das baterias.

4.3. GESTÃO DE ENERGIA BASEADA EM CONTROLADORES DE LÓGICA DIFUSA

Esta arquitectura tem ainda a vantagem de lhe poder estar associada uma estratégia de gestão de energia com capacidade de decisão e assim mais evoluída do que a da desagregação de frequência, como a que será apresentada a seguir, baseada num controlador de lógica difusa.

O controlador de lógica difusa é um método que utiliza um princípio de funcionamento causa-efeito do tipo “se..então” e é baseado em regras definidas pelo projectista.

Este é um método de controlo conhecido e bastante aplicado [12, 25, 26] pelo facto de a linguagem que define as suas regras de funcionamento ser uma linguagem de termos naturais, por outras palavras, a linguagem humana pode ser usada para descrever tanto o problema como a sua solução, sendo por isso facilmente compreensível [13].

A simplicidade dos controladores de lógica difusa vai para além da sua fácil interpretação, pois, este método de controlo não necessita de modelos matemáticos complexos, sendo esta uma característica que permite a sua aplicação a problemas onde a obtenção dos modelos seria bastante complexa. Estes controladores são aplicáveis a sistemas altamente não lineares, desde que seja bem conhecida sua gama de funcionamento. São ainda tidos como sendo bastante robustos dada a forma como facilmente podem ser adaptados a novas circunstâncias.

Em termos de entradas e saídas, este tipo de controlador pode ser *Single Input Single Output* (SISO), *Multiple Input Single Output* (MISO) ou *Multiple Input Multiple Output* (MIMO), sendo o controlador utilizado nesta dissertação do tipo MISO. Este é constituído por duas variáveis de entrada, cujos nomes são respectivamente SoC_{SCs} e $Power Ratio$, sendo esta segunda denominada ao longo do texto por δ . A saída do controlador é a variável $SCs - Contribute$ e é denominada no texto por k .

A Figura 4.5 apresenta, em forma de diagrama, o funcionamento deste tipo de controladores.

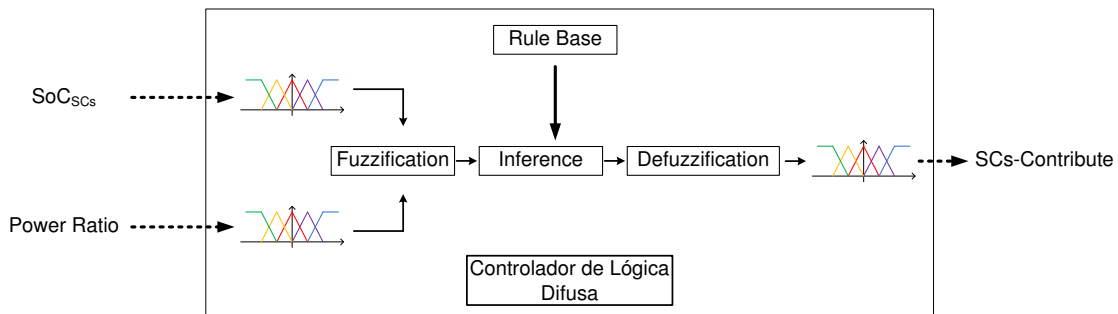


Figura 4.5: Funcionamento do controlador de lógica difusa

O controlador de lógica difusa está constantemente a ler o valor das variáveis de entrada e a aplicar condições do tipo:

“Se δ verifica funçãoⁱ E SoC_{SCs} verifica função^j Então k é igual à funçãoⁿ”

onde funçãoⁱ representa o conjunto de funções relativas à variável δ , função^j representa o conjunto de funções relativas à variável SoC_{SCs} e funçãoⁿ o conjunto de funções relativas

à variável k .

Aos conjuntos de funções das várias variáveis dá-se o nome de *membership functions*, estas funções, de entradas e saídas, são representadas como mostra a Figura 4.6

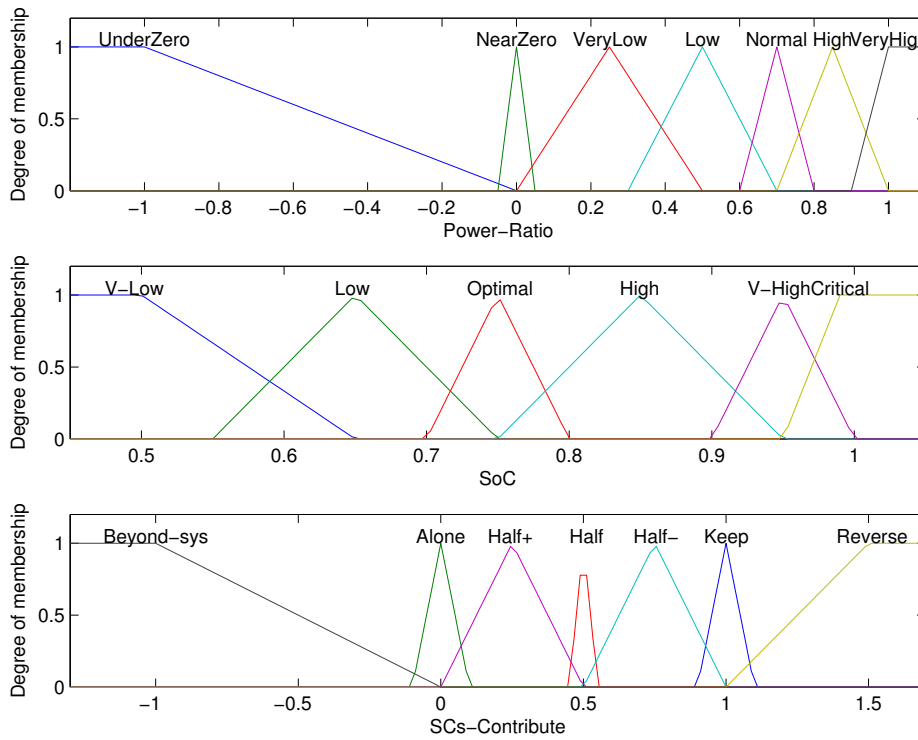


Figura 4.6: Conjunto das *membership functions*

Para o caso da variável de entrada δ consideram-se a existência de sete funções, são elas: a função *UnderZero* contempla os valores de δ abaixo de zero, $\delta \leq 0$, esta situação ocorre no caso de uma travagem regenerativa; a função *NearZero* serve para identificar uma situação de potência pedida às fontes de energia perto de zero, estando na gama $\delta \in [-5\%, 5\%]$; a função *VeryLow* foi escolhida por forma a englobar os valores de $\delta \in [0\%, 50\%]$; a função *Low* verifica-se quando está a ser pedida uma potência baixa às fontes de energia, estando esta função em $\delta \in [30\%, 70\%]$; quando a potência pedida às fontes está no intervalo $\delta \in [60\%, 80\%]$, a função verificada é *Normal*; para os casos em que $\delta \in [70\%, 100\%]$ a função considerada é *High*; a última função desta variável chama-se *VeryHigh*, esta ocorre quando está a ser pedida uma potência muito elevada, $\delta \geq 90\%$.

A variável SoC_{SCs} contempla a existência de seis funções, sendo estas: a função *V-Low* para valores de SoC dos SCs muito baixos, estando na gama $SoC_{SCs} \in [0\%, 65\%]$; para valores de SoC_{SCs} no intervalo $SoC_{SCs} \in [55\%, 75\%]$ será considerada a função *Low*; o valor de SoC_{SCs} considerado como sendo óptimo está contido na função com os valores $SoC \in [70\%, 80\%]$, chamando-se esta função de *Optimal*; a função *High* ocorre quando os valores de SoC_{SCs} estão na gama de $SoC_{SCs} \in [75\%, 95\%]$; quando são registados valores de SoC_{SCs} na gama $SoC_{SCs} \in [90\%, 100\%]$ a função associada será a função *V-High*; por último, temos a gama de valores em que o SoC_{SCs} é considerado como sendo crítico, estando os mesmos valores na gama $SoC \geq 95\%$, chamando-se esta função de *Critical*.

4.3. GESTÃO DE ENERGIA BASEADA EM CONTROLADORES DE LÓGICA DIFUSA

O último grupo de funções, pertencentes à variável de saída k , é constituído por sete funções, sendo elas: a função de saída *Beyond-sys*, que ocorre quando $k \leq 0$; quando o controlador de lógica difusa coloca os SCs a fazer todo o suporte do sistema estamos perante a função de saída *Alone*, estando esta função na gama $k \in [-10\%, 10\%]$; a função *Half+* ocorre quando o controlador faz com que os SCs suportem mais de metade da potência pedida ao sistema, estando os valores de k em $k \in [0\%, 50\%]$; valores de $k \in [45\%, 55\%]$ fazem com que os SCs suportem metade da potência pedida, chamando-se esta função de *Half*; a função de saída *Half-* representa os valores de $k \in [50\%, 100\%]$, nesta situação os SCs contribuem com menos de metade da potência pedida ao sistema; a função que deixa os SCs com um contributo residual, é a função *Keep*, para esta função os valores de k estão na gama $k \in [90\%, 110\%]$; a última função desta variável de saída chama-se *Reverse*, esta função de saída toma valores de $k \geq 100\%$, esta situação ocorre quando o contributo dos SCs é contrário ao do sistema.

Os valores de saída de k são aplicados directamente à variável I_t^* da Figura 4.4, assim a corrente pedida à bateria estará de acordo com a equação 4.3 e a corrente pedida aos SCs estará de acordo com a equação 4.4.

$$I_{Bat}^*(t) = k \cdot I_t^*(t) \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad I_{Sat}^- \leq I_{Bat}^* \leq I_{Sat}^+ \quad (4.3)$$

$$I_{SCs}^*(t) = I_t^*(t) - I_{Bat}^*(t) \quad (4.4)$$

As regras aplicadas ao controlador de lógica difusa estão, em parte, apresentadas na Tabela 4.1. A apresentação segue a forma de condições causa-efeito “se...então” típica destes controladores.

Tabela 4.1: Regras aplicadas no controlador de lógica difusa

Power Ratio (δ)		SoC	SCs-Contribute (k)		
se	UnderZero	e	Optimal	então	Alone
	UnderZero		High		Half+

	NearZero		Optimal		Keep

	VeryLow		Low		Reverse

	Normal		Low		Reverse
	Normal		Critical		Alone

	High		Optimal		Half

	VeryHigh		V-Low		Half-
	VeryHigh		V-High		Alone

Para um melhor entendimento da forma como este controlador influencia o comporta-

mento dos SCs no sistema, apresenta-se na Figura 4.7 um gráfico de superfície correspondente à forma como é pedida corrente às baterias e aos SCs. Esta solicitação de corrente às fontes de energia altera-se mediante a variação da corrente pedida $I_t^* \in [-5, 5]A$ e da variação do valor $k \in [-1, 1]$. Neste caso a variação do valor k foi induzida por forma a ser obtido o gráfico apresentado, no entanto, é o controlador de lógica difusa que decide o valor de k no caso do funcionamento real do sistema.

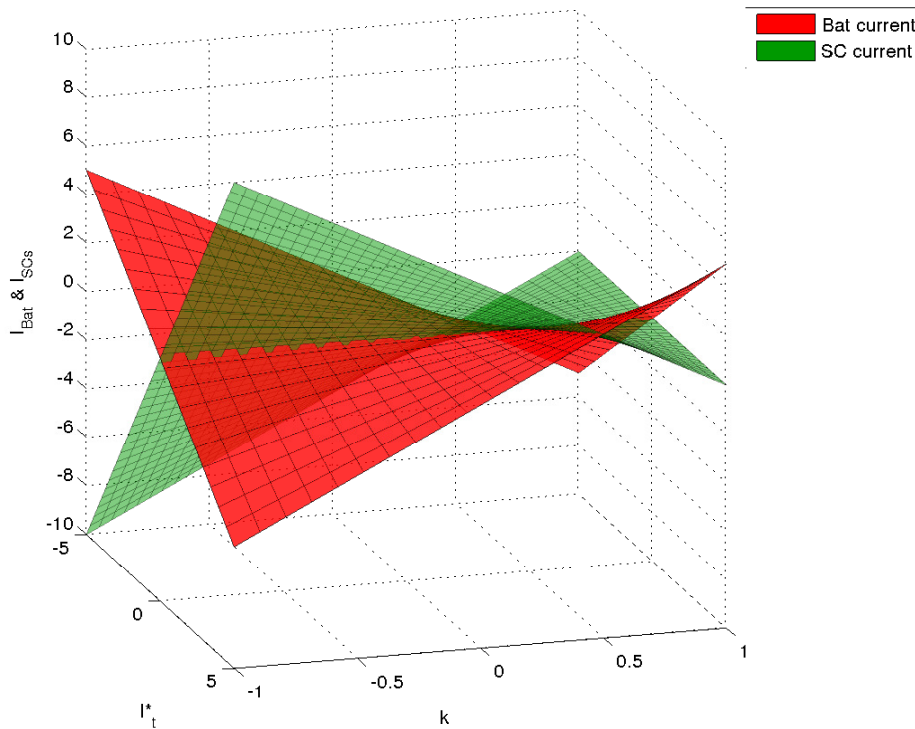


Figura 4.7: Corrente nas fontes de energia em função das variáveis k e I_t^*

Considerando como exemplo uma situação hipotética onde, num determinado momento do ciclo de condução, temos $SoC_{SCs} = 0,5$ e $\delta \leq 0$. Estes valores ao serem lidos pelo controlador de lógica difusa vão ser encaixados em funções, já abordadas, das correspondentes variáveis de entrada, ou seja, o SoC_{SCs} vai ser encaixado na função *V-Low* e o valor de δ vai ser encaixado na função *UnderZero*. A situação descrita é facilmente identificada como sendo uma travagem regenerativa, por parte do sistema, e um nível de estado de carga dos SCs considerado muito baixo.

A intenção neste tipo de situações é fazer com que os SCs sejam carregados com com toda a energia proveniente da travagem regenerativa e, se possível, contanto também com a ajuda extra das baterias para o carregamento. A regra definida neste tipo de situações é:

“**Se** δ é *UnderZero* **E** SoC_{SCs} é *V-Low* **Então** k é *Beyond-sys*”

utilizando os valores numéricos $I_t^* = -5A$ e $k = -1$, pois sabemos que de acordo com a regra definida anteriormente a função *Beyond-sys* faz com que os valores de k sejam negativos, podemos identificar na Figura 4.7 que os SCs vão ser carregados com uma corrente de

4.3. GESTÃO DE ENERGIA BASEADA EM CONTROLADORES DE LÓGICA DIFUSA

$$I_{SCs} = -10A.$$

Este carregamento surge por acção do controlador de lógica difusa, sendo que 5A são a contribuição por parte do sistema, devido à travagem, e os outros 5A são devido ao contributo das baterias para o carregamento dos SCs.

Através do exemplo dado anteriormente pode dizer-se que a arquitectura proposta para a topologia activa híbrida é funcional, na medida em que, permite a inclusão de um sistema de gestão de energia inteligente, contribuindo assim para uma melhor gestão de energia do sistema global.

Capítulo 5

Simulação

Neste capítulo são apresentados os resultados de simulação feitos em ambiente Matlab/Simulink necessários de todas as topologias propostas, topologia passiva, topologia passiva híbrida e topologia activa híbrida.

Os modelos utilizados, tanto das fontes de energia como do sistema carga utilizada nas simulações, foi abordado em vários estudos desta área da literatura, tendo os mesmos já sido publicados. Quanto às fontes de energia, foram utilizados os modelos de baterias e de condensadores existentes na *ToolBox Sim Power Systems* do Simulink, os parâmetros das fontes de energia foram ajustados para se aproximarem o mais possível dos parâmetros das fontes disponíveis em laboratório [9, 21]. A Tabela 5.1 mostra os parâmetros utilizados.

Tabela 5.1: Parâmetros das fontes de energia utilizadas

	Baterias	Supercondensadores
Tensão Nominal [V]	12	48,6
Capacidade/Capacitância	7Ah	5,5 F
# Packs	3 (em série)	2 (em paralelo)
Resistência Interna [mΩ]	120	45
Energia armazenada [Wh]	84	0.101
Potência específica [Wh/kg]	0,181	6,23

Quanto ao sistema de carga utilizado nas simulações, foi utilizado um método já desenvolvido em trabalhos anteriores [27, 28]. Esse método consistiu em fazer a modelização física de um veículo existente no mercado, posteriormente, a esse modelo físico, foi imposta uma curva normalizada de velocidade em função do tempo [29] para que se pudesse extrair a potência necessária à realização do percurso e velocidades impostas. A potência obtida através desse modelo foi então guardada em função do tempo e usada como carga dinâmica no modelo do Simulink.

A comparação, neste capítulo, será feita inicialmente entre a topologia passiva e a topologia passiva híbrida, por forma a que sejam identificadas as vantagens e desvantagens da hibridização passiva de fontes de energia.

Num outro tópico será feita a comparação entre a topologia passiva híbrida e a topologia activa híbrida, neste caso serão abordadas as vantagens e desvantagens da hibridização

passiva e activa de fontes de energia bem como a estratégia de gestão de energia aplicável a cada uma destas situações.

O último tópico abordará a comparação de duas estratégias de gestão de energia diferentes aplicáveis à topologia activa híbrida, sendo uma delas a desagregação da frequência do sinal de potência e a outra a gestão de energia avançada através de um controlador de lógica difusa.

5.1 Topologia Passiva vs Topologia Passiva Híbrida

A comparação da topologia passiva com a topologia passiva híbrida é feita nesta secção através de resultados de simulação para uma potência máxima de 500W, na topologia passiva, e de 750W na topologia passiva híbrida. O ciclo de condução escolhido foi o *Artemis urban driving cycle* num período específico de 200s chamado *Free-flow urban*, entre os 280s e os 480s.

A Figura 5.1 faz a comparação entre as duas topologias para a evolução da tensão do barramento DC ao longo do ciclo de carga.

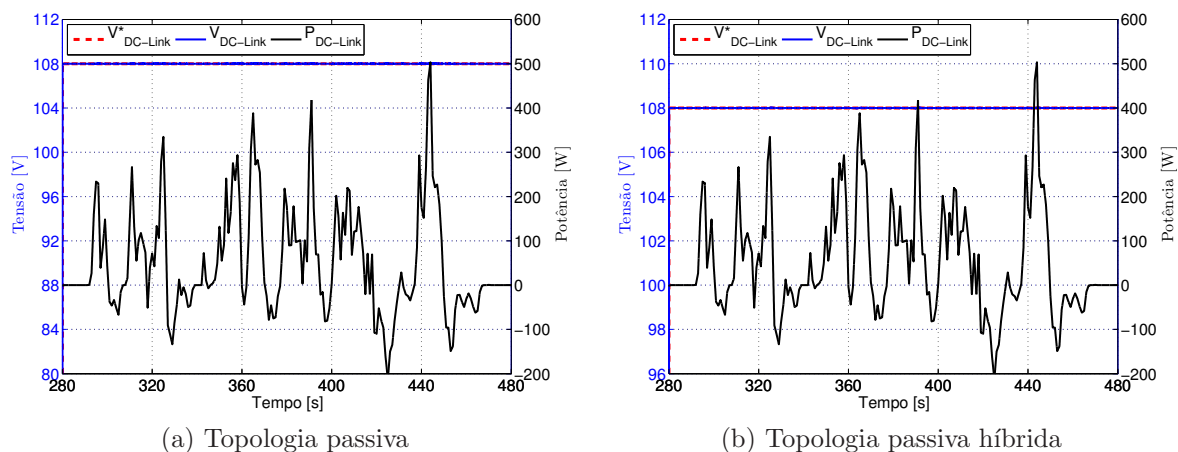


Figura 5.1: Tensão no barramento DC ao longo do ciclo de condução

É visível que não há variação da tensão do barramento DC em nenhuma das duas topologias da Figura 5.1, conclui-se por isso que a arquitectura de controlo permite manter a estabilidade da tensão no barramento DC.

A Figura 5.2 mostra a evolução dos valores de potência registados nas fontes ao longo do ciclo de condução.

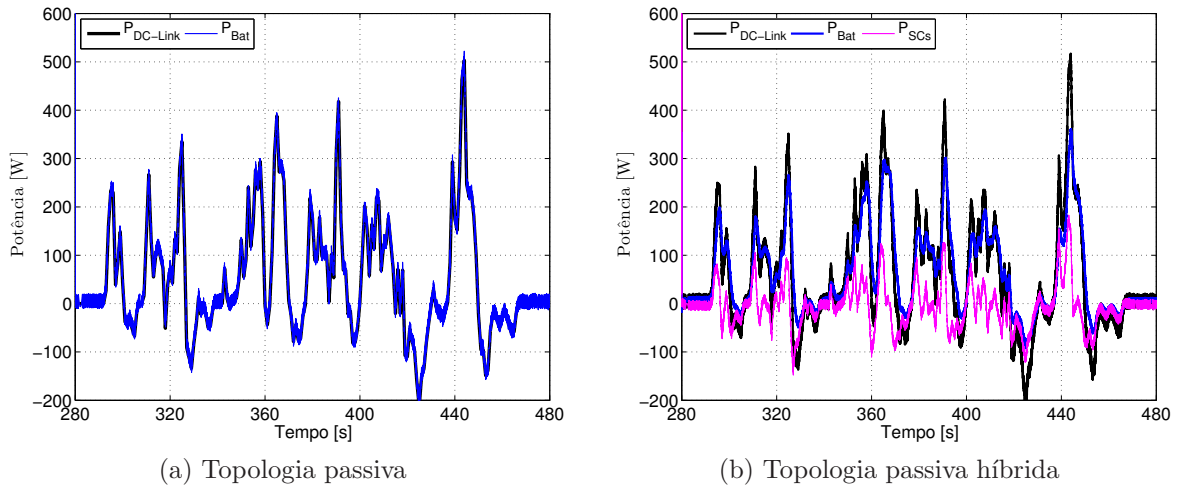


Figura 5.2: Potência nas fontes e no barramento DC ao longo do ciclo de condução

A Figura 5.2 é bastante elucidativa da potência que é requerida às baterias. No caso da topologia passiva toda a potência é pedida às baterias, incluindo as transições de alta frequência e alta amplitude, este comportamento constitui um aspecto negativo dado que as baterias, devido à resistência interna elevada, não têm uma dinâmica de resposta muito rápida. Assim, usando só baterias o sistema é menos eficiente e tem uma resposta dinâmica mais lenta.

No caso da topologia passiva híbrida com baterias e SCs, Figura 5.2b, o sistema torna-se mais eficiente dado que parte da potência é suportada pelos SCs, pois, os SCs tem uma resistência interna mais baixa que as baterias e assim consegue fornecer e receber energia com menores perdas. É ainda visível na Figura 5.2b que são os SCs a suportar as transições de alta frequência e que a amplitude máxima da potência fornecida pelas baterias é menor no caso da topologia passiva híbrida.

A contribuição em termos de corrente registada em cada fonte de energia pode ser vista na Figura 5.3.

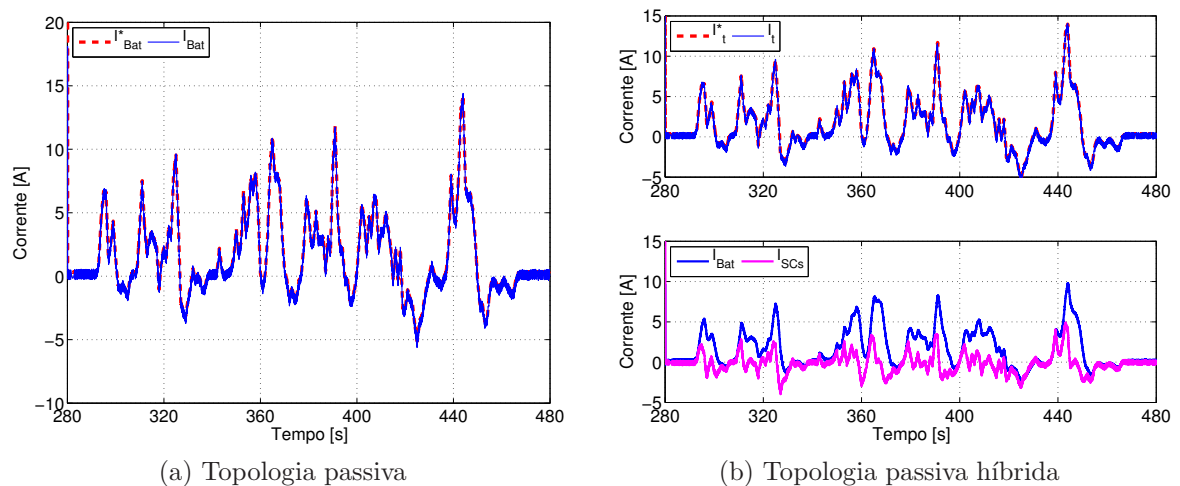


Figura 5.3: Corrente nas fontes ao longo do ciclo de condução

A Figura 5.3a mostra a referência de corrente dada pelo controlador de tensão, curva a vermelho, e a corrente medida na bateria, curva a azul. Vê-se que a corrente da bateria segue a referência sem erro. A mesma figura mostra que a bateria, como é a única fonte de energia, suporta picos de corrente superiores a 10A e está ainda sujeita às transições de alta frequência. A Figura 5.3b, referente à topologia passiva híbrida, mostra no gráfico superior a corrente de referência calculada pelo controlador de tensão, I_t^* , e a corrente medida e controlada pelo controlador de corrente, I_t , onde a corrente I_t é resultante do somatório das correntes das baterias e dos SCs. No gráfico inferior, da mesma figura, são mostradas as correntes nas baterias e nos SCs, é visível a contribuição de cada uma das fontes de energia durante o ciclo de condução. É visível que a contribuição dos SCs é dada maioritariamente nas transições de alta frequência e que a amplitude dos picos de corrente nas baterias nunca chegas aos 10A, sendo este um aspecto claramente positivo e não registado na topologia passiva.

A Figura 5.4 mostra a tensão aos terminais das fontes durante o ciclo de condução. Na topologia passiva a tensão é medida aos terminais da bateria, em quanto que na topologia passiva híbrida a tensão é medida aos terminais da ligação em paralelo entre as baterias e os SCs.

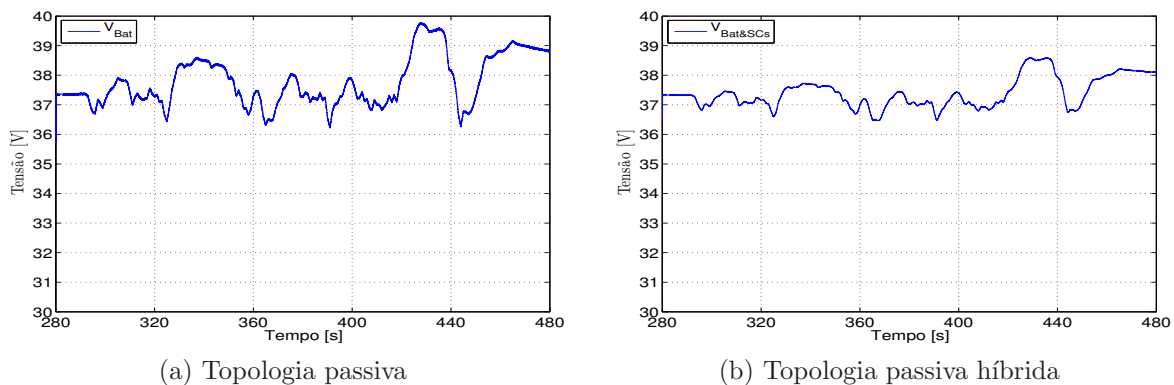


Figura 5.4: Tensão nas fontes ao longo do ciclo de condução

É visível, através da comparação das Figuras 5.4a e 5.4b, as vantagens da hibridização de fontes em relação à utilização de uma única fonte de energia. Estas figuras mostram que a tensão aos terminais da bateria não sofre uma variação de tão grande amplitude nem tão brusca na topologia passiva híbrida. No caso da topologia passiva, a tensão aos terminais da bateria está sujeita a variações entre os 36V e os 40V, no caso da topologia passiva híbrida esta amplitude de variação foi reduzida, variando entre os 37V e os 39V. Este aspecto constitui uma vantagem na utilização eficiente das fontes de energia, nomeadamente na utilização das baterias.

Os resultados de simulação apresentados e comentados nesta secção mostram que a hibridização de fontes traz vantagens, essas vantagens são registadas ao nível da resposta do sistema bem como à forma mais eficiente de como são utilizadas as fontes de energia. Porém, os resultados mostram que, na topologia passiva híbrida os SCs têm uma utilização redu-

zida, sendo a mesma registada apenas nas transições de alta frequência. Este facto deve-se à forma de como foi feita a hibridização, forma passiva. Para melhorar o contributo dos SCs é necessário fazer-se uma hibridização activa de fontes, e assim tornar mais evidente o contributo dos SCs.

5.2 Topologia Passiva Híbrida vs Topologia Activa Híbrida

Esta secção apresenta os resultados de simulação relativos à comparação entre a topologia passiva híbrida e à topologia activa híbrida.

Os resultados foram obtidos através da simulação dos sistemas referentes às duas topologias em causa para uma potência máxima de 750W. O ciclo de condução utilizado para esta simulação foi o ciclo de condução urbana *Artemis urban driving cycle* num período específico de 200s chamado *Free-flow urban*, entre os 280s e os 480s.

A Figura 5.5 mostra a evolução da tensão no barramento DC ao longo do ciclo de condução, é possível ver na mesma figura que não existe qualquer abaixamento de tensão em qualquer um dos caso testados, mantendo-se assim a estabilidade no barramento.

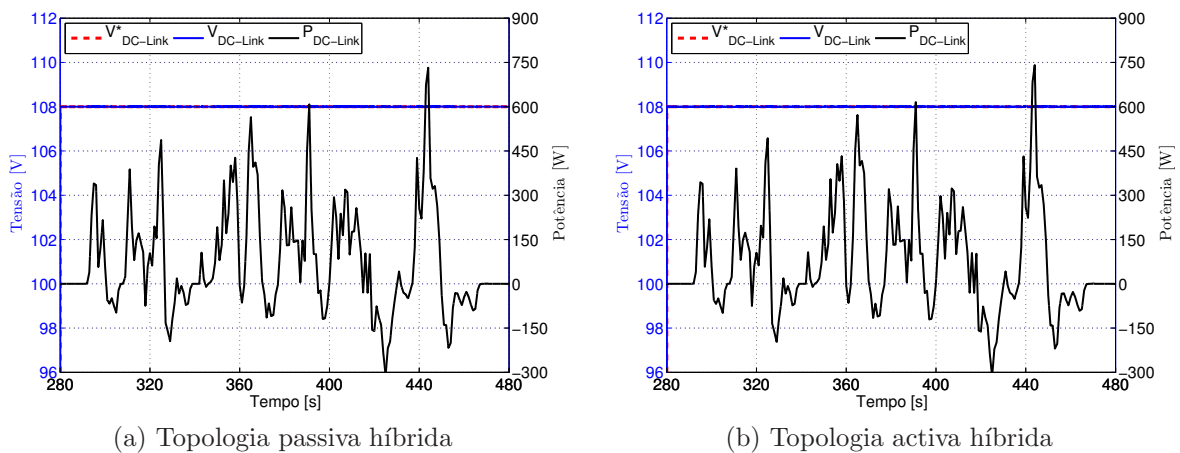


Figura 5.5: Tensão no barramento DC ao longo do ciclo de condução

Na Figura 5.6 apresenta-se a evolução da potência pedida às fontes de energia e a potência exigida no barramento DC, para o caso da topologia passiva híbrida e para o caso da topologia activa híbrida.

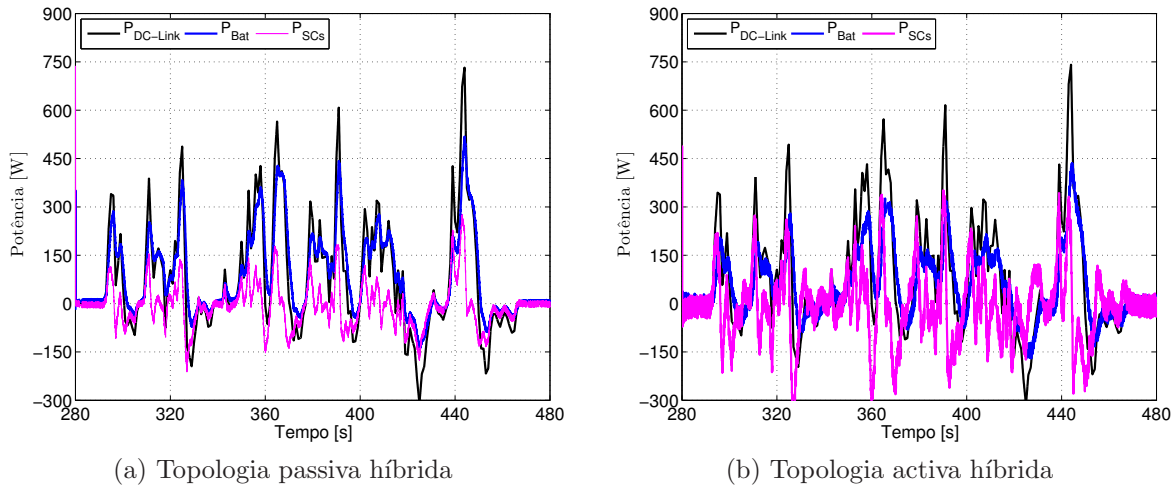


Figura 5.6: Potência nas fontes e no barramento DC ao longo do ciclo de condução

A comparação entre as Figuras 5.6a e 5.6b evidencia uma maior utilização dos SCs na topologia activa híbrida. Este aspecto está relacionado com a forma de controlo utilizada na topologia activa híbrida, pois, os SCs nesta topologia estão num conversor DC-DC isolado e sujeitos a uma referência de corrente que os obriga a um contributo maior, tanto nas transições ascendentes como nas transições descendentes.

Na Figura 5.7 são visíveis as curvas de corrente em cada fonte, tanto para a topologia passiva híbrida, Figura 5.7a, como para a topologia activa híbrida, Figura 5.7b. A Figura 5.7a mostra, no gráfico superior, a corrente de referência (I_t^*), dada pelo controlador de tensão, e a corrente medida na bobina do conversor DC-DC e controlada pelo controlador de corrente (I_t). No gráfico inferior desta figura pode ver-se a contribuição de cada fonte pela separação passiva da quantidade de corrente fornecida por cada fonte de energia. Torna-se claro, por observação da Figura 5.7a que o somatório da correntes I_{Bat} e I_{SCs} é igual à corrente controlada pelo controlador de corrente I_t . A Figura 5.7b mostra as curvas de corrente de referência para cada fonte e as curvas de corrente medidas.

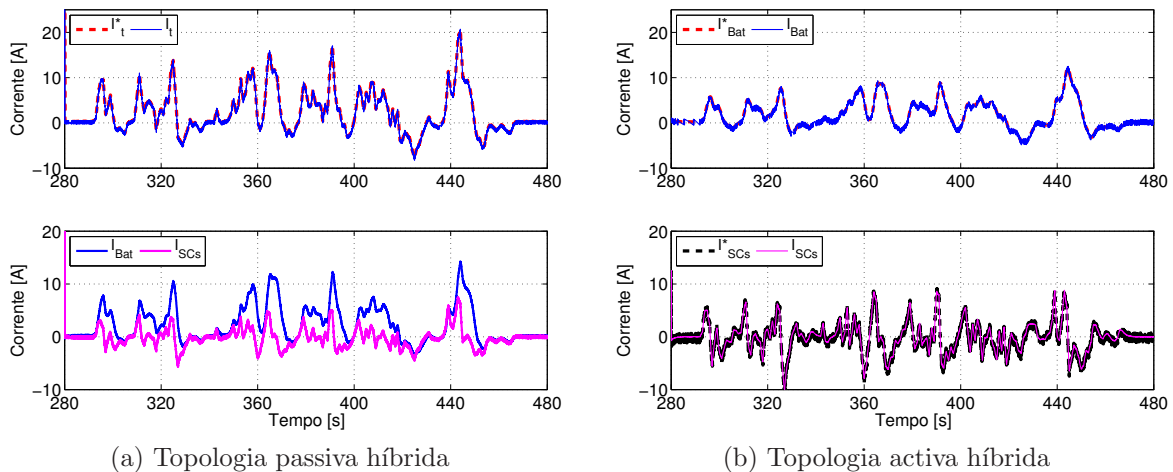


Figura 5.7: Corrente nas fontes ao longo do ciclo de condução

5.3. SIMULAÇÃO DA GESTÃO DE ENERGIA INTELIGENTE PARA TOPOLOGIA ACTIVA HÍBRIDA

Na Figura 5.7a vê-se que a variação dos valores de corrente registada nos SCs nunca sai de uma gama de aproximadamente $\pm 5A$. Contrariamente, na Figura 5.7b, a gama de variação dos SCs situa-se entre $\pm 10A$, este é um facto que evidencia a maior contribuição por parte dos SCs na topologia activa híbrida.

A Figura 5.8 estão as curvas de tensão nas fontes de energia para ambas as topologias.

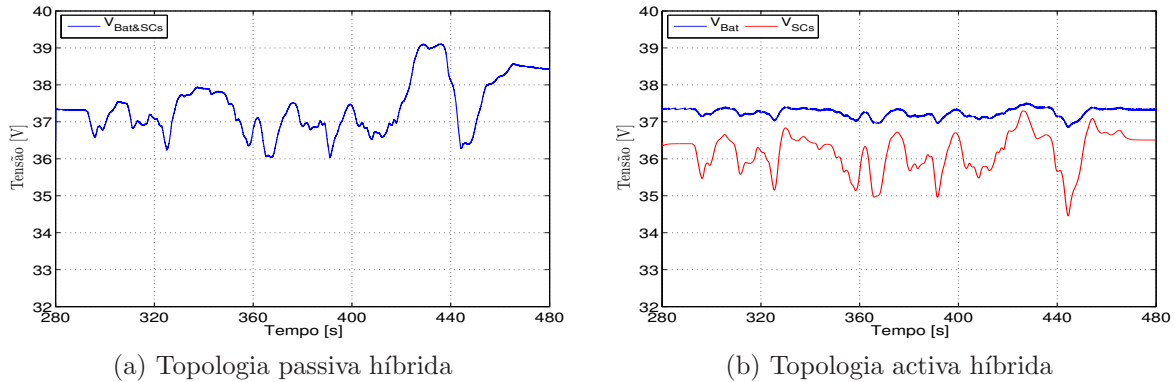


Figura 5.8: Tensão no barramento DC ao longo do ciclo de condução

A comparação das Figuras 5.8a e 5.8b mostra que existe uma grande diferença na variação de tensão aos terminais da bateria para as duas topologias. A topologia mais benéfica é a activa híbrida, pois é a que impõe às baterias uma variação de tensão menor ao longo do tempo. É visível que na topologia activa híbrida, Figura 5.8b, os SCs têm uma grande variação de tensão aos seus terminais ao longo do tempo, este facto deve-se à sua maior contribuição para o suporte da potência do sistema.

Com a apresentação dos resultados de simulação das topologias passiva, passiva híbrida e activa híbrida, mostrou-se um progresso sucessivo de acordo com a ordem que estas foram apresentadas. Este progresso enquadra-se nas pretensões iniciais de obter um barramento DC estável a variações de carga súbitas, fazer com que as baterias fossem poupadas das transições de alta frequência e alta amplitude, dado serem estas a fonte principal e dado o seu comportamento dinâmico, e fazer com que os SCs, como fonte suplementar do sistema, suportassem as transições de alta frequência e amplitude.

Mesmo tendo havido progressos, nota-se ainda a existência de uma lacuna ao nível da gestão de energia do sistema, pois, este poderia ser mais inteligente e poderia tomar decisões que, sem comprometer o bom funcionamento do sistema, pudessem dar ao sistema uma resposta dinâmica melhor. Tendo em vista a eliminação desta lacuna, na próxima secção são mostrados os resultados de simulação com um sistema de gestão inteligente.

5.3 Simulação da gestão de energia inteligente para topologia activa híbrida

Nesta secção são mostrados os resultados de simulação da topologia activa híbrida com uma estratégia de gestão de energia baseada num controlador de lógica difusa. Esta estratégia

é considerada inteligente na medida em que o controlador de lógica difusa tem a capacidade de decidir, com base em parâmetros medidos no sistema, se os SCs devem ser carregados ou se devem ser descarregados.

Foram efectuados vários testes de simulação com o objectivo de verificar a validade da incorporação deste controlador no sistema. A arquitectura de controlo dos testes efectuados baseou-se na arquitectura de controlo apresentada em 4.4.

Os testes foram realizados para o ciclo de condução urbana *Artemis urban driving cycle* num período específico de 200s chamado *Free-flow urban*, entre os 280s e os 480s. A potência máxima destes teste foi de aproximadamente 900W, sendo que neste caso o SoC dos SCs no início do ciclo é de 50%, o que faz deste teste um teste crítico. O teste efectuado é classificado como um teste crítico na medida em que, o SoC dos SCs é tão baixo que estes não poderão dar uma contribuição para o sistema se não forem carregados. No entanto a carga dos SCs durante o ciclo de condução é uma tarefa que exige bastante cuidado, pois, esta não pode comprometer a estabilidade do sistema global.

A Figura 5.9 mostra a evolução da tensão no barramento e a evolução do ciclo de condução ao longo do tempo.

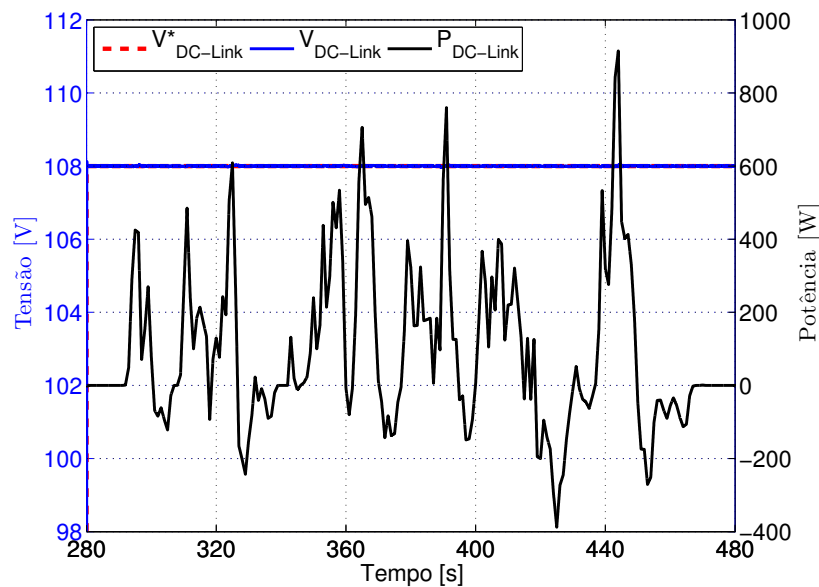


Figura 5.9: Tensão no barramento ao longo do ciclo de carga

É visível na Figura 5.9 que o barramento não foi afectado pela carga ou pelas decisões do controlador de lógica difusa, cumprindo a totalidade do ciclo de carga no nível de tensão pretendido.

A Figura 5.10 mostra a potência exigida pelo ciclo de carga, bem como a contribuição em termos de potência das duas fontes de energia, baterias e SCs.

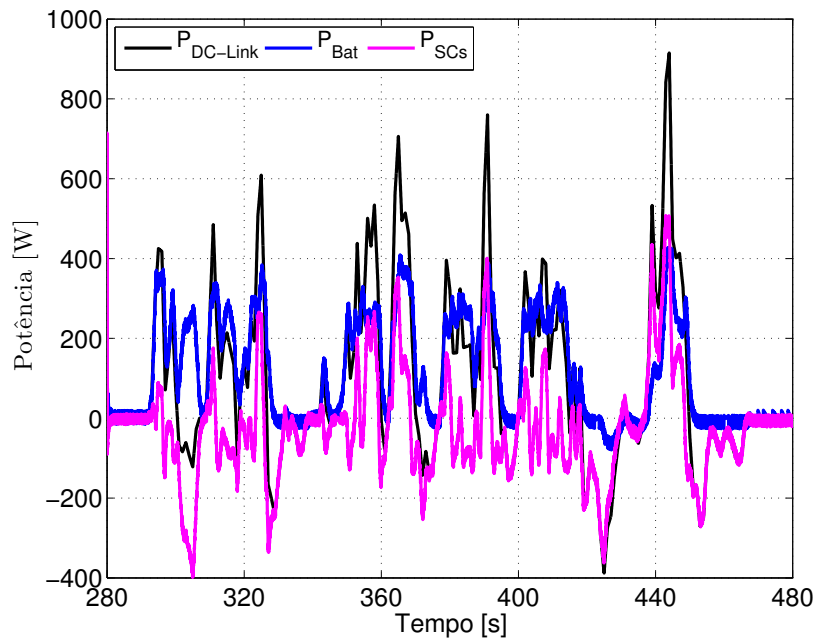


Figura 5.10: Potência nas fontes ao longo do ciclo de carga

Verifica-se um comportamento por parte das fontes de energia, perto dos 300s, que evidencia uma decisão do controlador de lógica difusa. Existe uma determinada quantidade de potência, originada por uma travagem regenerativa, que flui do barramento DC para as fontes. Esta energia é completamente absorvida pelos SCs e as baterias ainda ajudam no carregamento dos mesmos, sendo que, a energia que entra nos SCs resulta do somatório da energia proveniente do barramento DC e das baterias.

Dado que os SCs iniciaram o ciclo de condução com um nível de SoC muito baixo, o sistema de gestão de energia tomou um boa decisão ao aproveitar a energia de uma travagem regenerativa para os carregar e ainda usar as baterias para que essa carga fosse mais efectiva.

A Figura 5.11 mostra a contribuição de cada fonte de energia em termos de corrente.

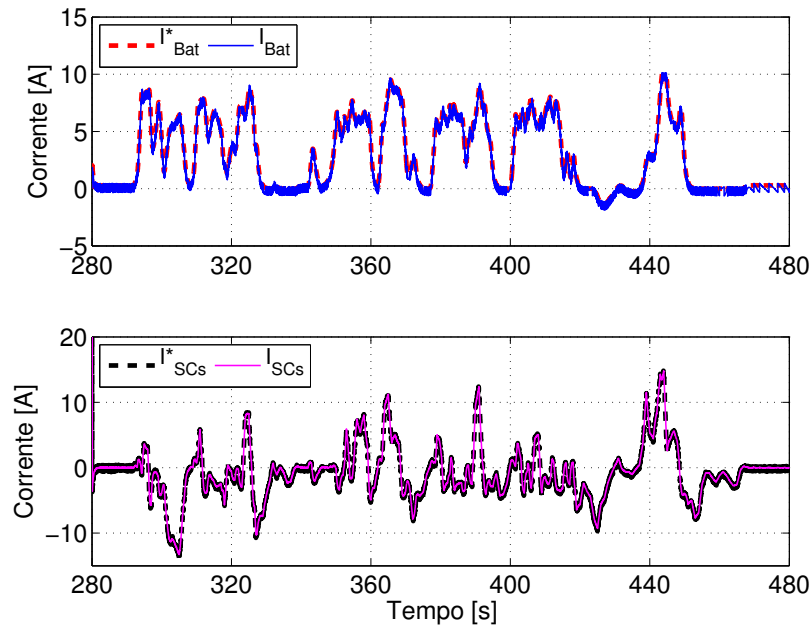


Figura 5.11: Corrente nas fontes ao longo do ciclo de carga

Ao comparar a corrente das baterias e dos SCs, Figura 5.11 no topo e em baixo respectivamente, pode ver-se que nas baterias não foram registados valores negativos de corrente. Este aspecto revela que durante as travagens regenerativas a energia foi absorvida pelos SCs, o que é um aspecto positivo, pois, este tipo de transferências de energia ajudam a carregar os SCs e poupam as baterias das transições de alta frequência.

A evolução da tensão aos terminais das fontes de energia está representada na Figura 5.12. Através desta figura pode dizer-se que a tensão aos terminais dos SCs teve uma tendência crescente na parte inicial do ciclo, o que permitiu o seu carregamento.

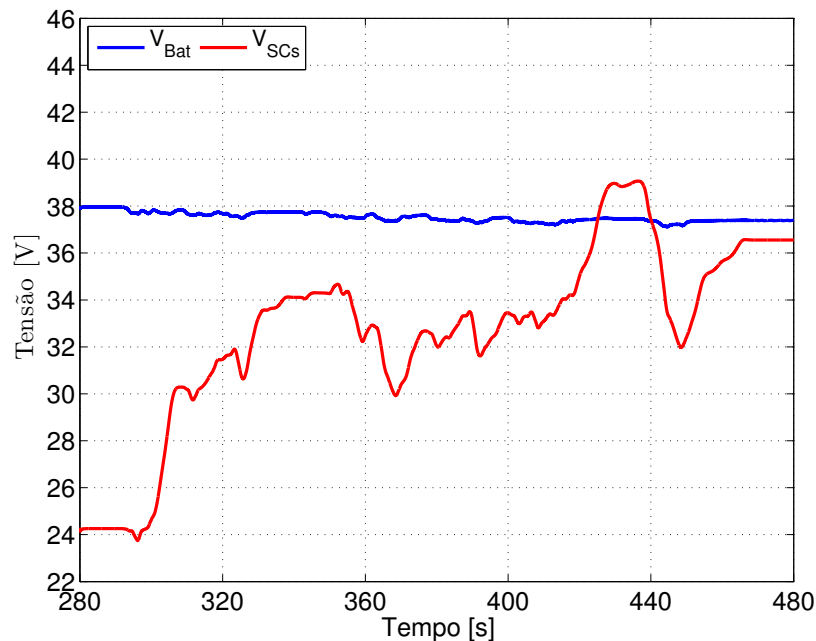


Figura 5.12: Tensão nas fontes ao longo do ciclo de carga

Ainda na Figura 5.12, é visível a baixa amplitude de variação da tensão aos terminais

5.3. SIMULAÇÃO DA GESTÃO DE ENERGIA INTELIGENTE PARA TOPOLOGIA ACTIVA HÍBRIDA

das baterias.

Foi possível mostrar, nesta secção, que a estratégia de gestão de energia permitiu iniciar um ciclo com um valor de SoC nos SCs bastante baixo, tendo este SoC sido recuperado para valores que permitiram uma posterior contribuição por parte dos SCs para o sistema.

De notar que o carregamento dos SCs foi feito no decorrer do ciclo de condução, se que houvesse, contudo, qualquer alteração na tensão do barramento DC. Assim pode concluir-se que, as decisões foram tomadas pelo controlador de lógica difusa no tempo correcto.

Foram ainda efectuados vários testes para valores de SoC entre os 50% e os 100%, em todos os testes realizados ficou comprovado o bom funcionamento do controlador de lógica difusa como método de implementação da gestão de energia para este sistema.

Capítulo 6

Comparação Experimental das Topologias

Este capítulo tem como objectivo a validação experimental das topologias bem como a discussão dos resultados obtidos. Para tal foi desenvolvido um protótipo representativo dos vários sistemas híbridos em laboratório. O protótipo permitiu a implementação experimental e testes de todas as topologias abordadas. Pretende-se, ainda com este capítulo, concluir à cerca das vantagens e desvantagens das topologias propostas assim como das estratégias de gestão inerentes a cada topologia. A montagem experimental realizada apresenta-se na Figura 6.1 e a sua constituição é representada esquematicamente na Figura 6.2.

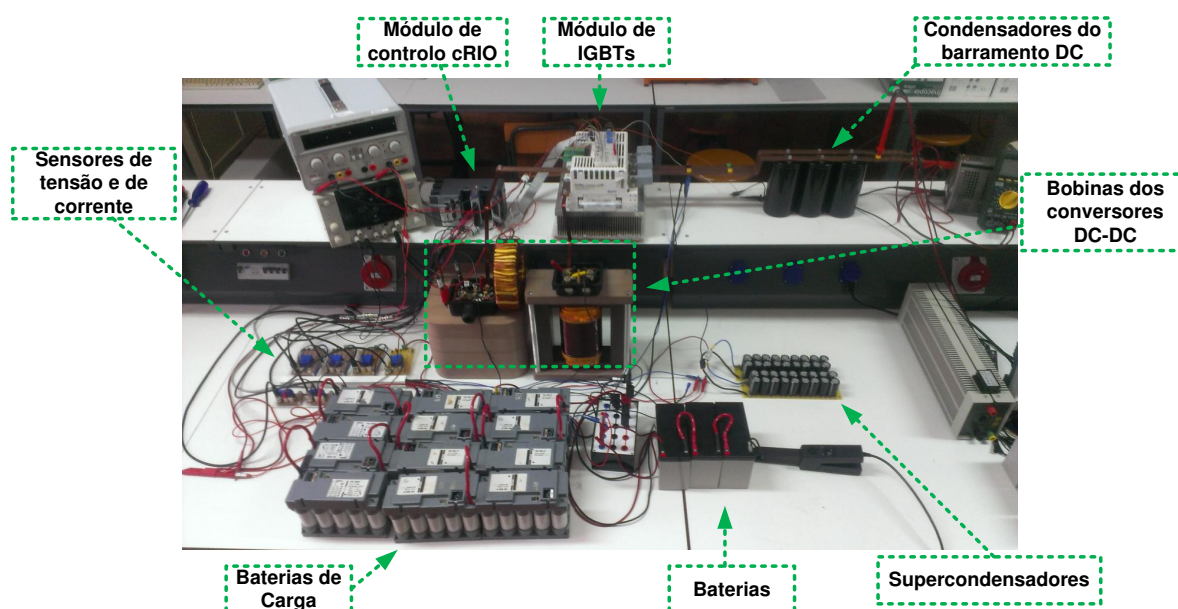


Figura 6.1: Imagem de bancada com o protótipo experimental

As fontes utilizadas para os testes experimentais foram:

1. Um pack de três baterias de Chumbo (PB) em série, onde cada bateria tinha uma tensão nominal de 12V e uma capacidade nominal de 10Ah. O pack tinha uma tensão de aproximadamente 36V;

- Dois packs de SCs, fabricados pela Nesscap, estes estavam em paralelo e a sua tensão máxima era de 48,6V. Os dois packs de SCs em conjunto tinham uma capacidade de aproximadamente 11F;

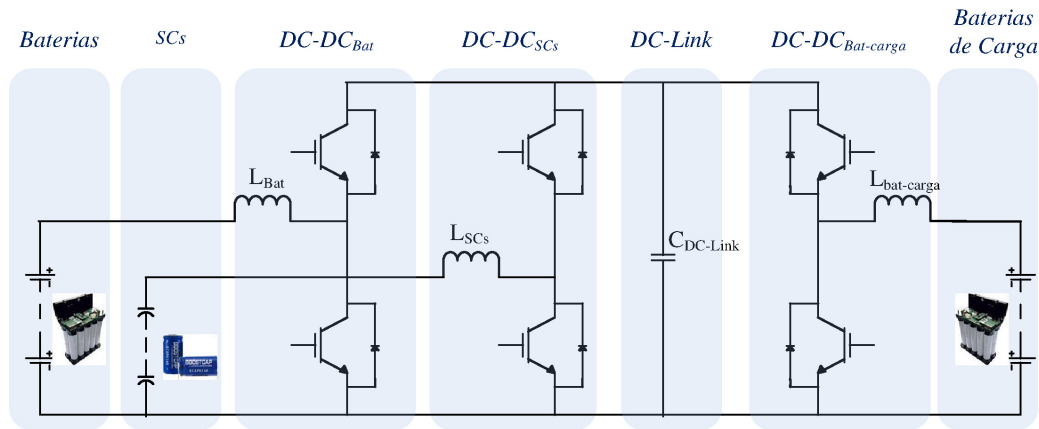


Figura 6.2: Esquema do protótipo experimental

O desenvolvimento deste protótipo incluiu, no decorrer deste trabalho, a montagem de todas as ligações inerentes à construção do sistema híbrido (ligação das fontes, bobinas, barramento DC e respectivos sensores).

Para fazer o controlo de todo o sistema, bem como a aquisição dos dados experimentais, foi utilizado hardware e software da National Instruments. O hardware utilizado foi uma CRIO (Compact Reconfigurable Input Output) e os módulos de aquisição e geração de sinal (tensão, corrente e PWMs). O LabVIEW foi o software utilizado no controlo, todo o código Matlab/Simulink utilizado nas simulações foi transcrito para esta linguagem, tendo ainda sido acrescentado às malhas de controlo do Capítulo 5 o código que permitiu fazer o datalogging, algo que não era preciso executar em ambiente Matlab/Simulink.

6.1 Topologia passiva vs topologia passiva híbrida

A comparação entre a topologia passiva e a topologia passiva híbrida permite-nos concluir à cerca dos benefícios da utilização de múltiplas fontes em sistemas de energia, bem como da gestão energética destes sistemas. Para tal, foram feitos testes às duas topologias em causa com uma potência máxima de 500W. A Figura 6.3 mostra o comportamento da tensão no barramento DC ao longo do ciclo de condução. Verifica-se, nesta figura, que a topologia passiva não suportou a tensão do barramento DC durante todo o ciclo, tendo este sofrido um abaixamento de tensão perto dos 450s. No teste efectuado à topologia passiva híbrida não foi registado qualquer abaixamento de tensão, este aspecto prende-se com o facto de na topologia passiva híbrida o contributo dos super-condensadores, mesmo sendo só nas transições, ter permitido o aumento da potência disponível e assim proporcionar uma boa resposta do sistema sem pôr em causa a estabilidade do barramento DC.

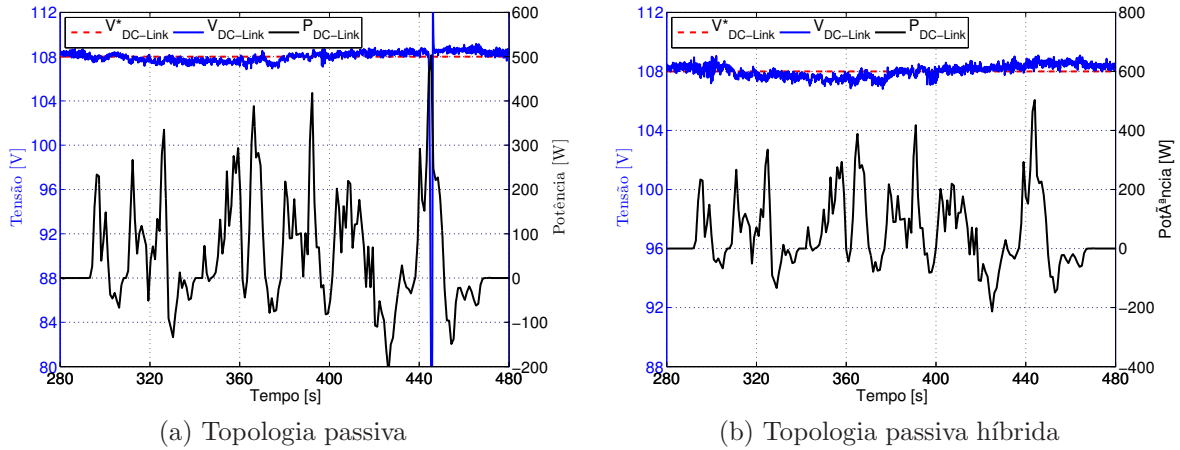


Figura 6.3: Tensão no barramento DC ao longo do ciclo de condução

A Figura 6.4 mostra a distribuição da potência perdida no barramento DC pelas fontes, que no caso da topologia passiva (Figura 6.4a) toda a potência é perdida às baterias. Na Figura 6.4b é visível a principal vantagem da topologia passiva híbrida, o contributo dos super-condensadores é feito nas transições de alta frequência, poupando assim as baterias e fazendo desta uma topologia mais eficiente, quando comparada com a topologia passiva só com baterias.

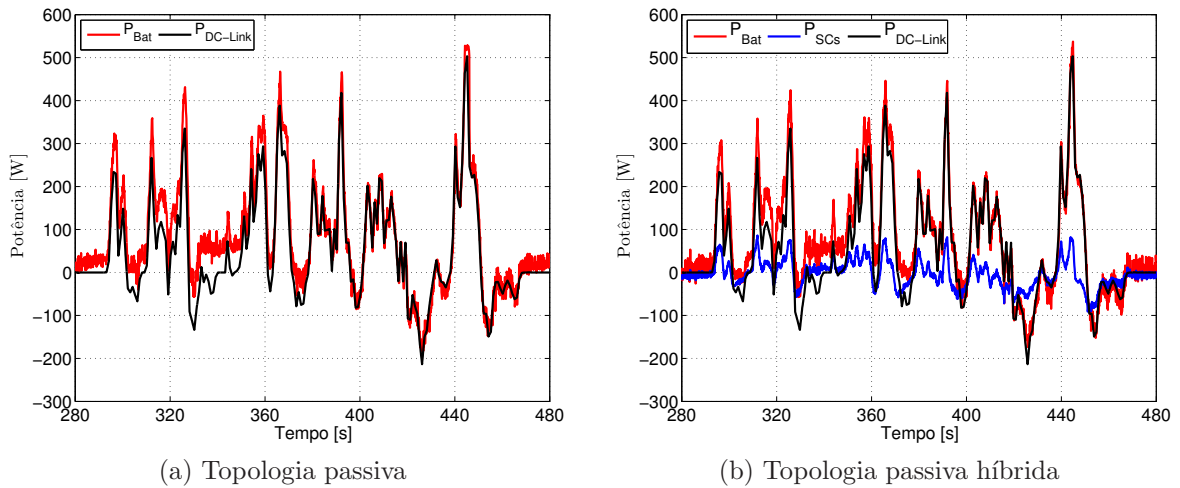


Figura 6.4: Potência das fontes ao longo do ciclo de condução

A Figura 6.5 mostra a evolução da corrente ao longo do ciclo de condução. Nessa figura é visível por comparação das Figuras 6.5a e 6.5b que o nível de corrente exigido às baterias é menor na topologia passiva híbrida. Na Figura 6.5a observa-se um pico na referência de corrente perto dos 450s, este pico deve-se ao incremento do erro no controlador da tensão, visto que houve uma queda na tensão no barramento DC. Porém, as baterias não seguiram essa referência dado que estavam limitadas por software a uma corrente máxima de 15A (em ambas as topologias).

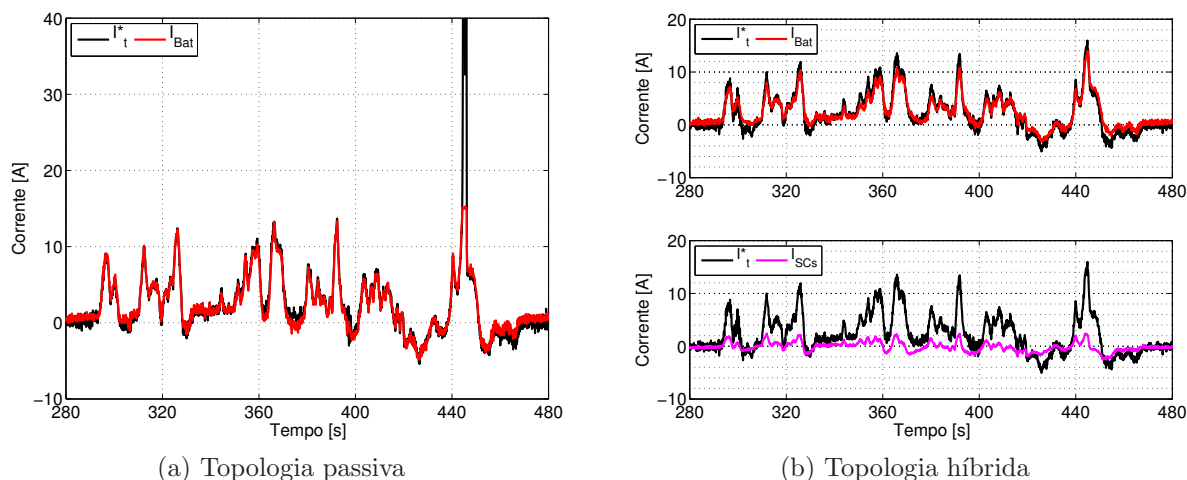


Figura 6.5: Corrente nas fontes ao longo do ciclo de condução

Pode-se ver na Figura 6.6 a variação de tensão aos terminais das fontes durante os testes realizados, é visível uma diminuição da amplitude dessa variação para o caso da topologia passiva híbrida, sendo este um aspecto positivo nomeadamente para as baterias.

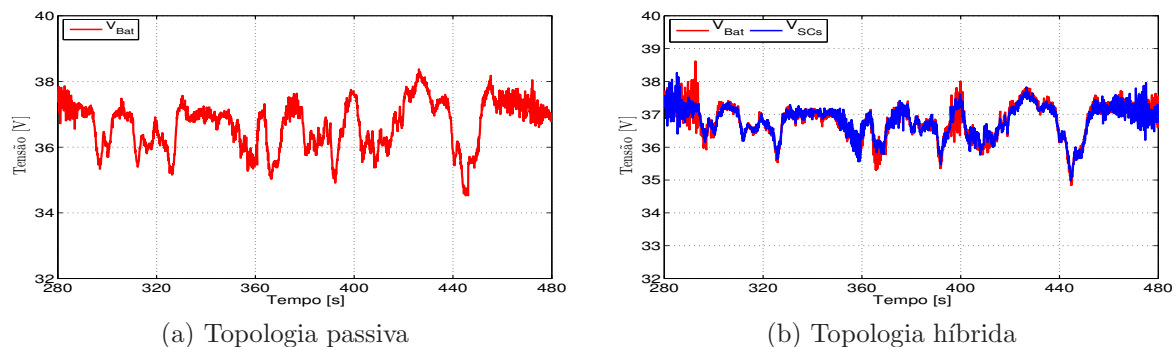


Figura 6.6: Tensão nas fontes ao longo do ciclo de condução

Com os testes comparativos entre a topologia passiva e a topologia passiva híbrida pode concluir-se que a inclusão dos super-condensadores em paralelo com as baterias constitui uma mais valia. Esta inclusão permitiu poupar as baterias das transições de alta frequência e cumpriu o objectivo de manter estável a tensão no barramento DC. Sabendo ainda que, das duas fontes utilizadas, as baterias são as que possuem uma resistência interna de maior valor, podemos concluir que ao ser menor o valor da corrente medido na bateria são também menores as perdas na resistência interna. Assim, a topologia passiva híbrida é mais eficiente que a topologia passiva só com baterias.

6.2 Topologia passiva híbrida vs activa híbrida

Foi comprovado na secção anterior, através de testes experimentais, que a inclusão de uma fonte que possa dar suporte às baterias constitui uma mais valia, nomeadamente no ponto fraco das baterias que são as transições de alta frequência e de grande amplitude

de potência solicitada. Contudo, existem algumas desvantagens na hibridização passiva de fontes, essas desvantagens podem ser apontadas quer ao nível da sua estratégia de gestão de energia, quer ao nível da distribuição da amplitude da potência solicitada nas transições, podendo uma das fontes incluídas estar a ser subaproveitada neste aspecto.

Assim, a presente secção pretende mostrar as mais valias da hibridização activa de fontes de energia por comparação entre a topologia passiva híbrida e a topologia activa híbrida, ou seja, a hibridização de fontes onde a cada uma se associa um conversor DC-DC para que se possam anular as desvantagens supra referidas.

Os testes levados a cabo nesta secção foram feitos para uma potência superior à utilizada nos testes anteriores, tendo esta sido aumentada para uma potência máxima de 750W.

A utilização de um conversor DC-DC independente para cada fonte traz consigo desafios ao nível do controlo e gestão de energia a aplicar em topologias activas híbridas. Este aspecto está relacionado a necessidade de atribuir a cada controlador uma referência de corrente, que terá de ser seguida pelo respectivo conversor DC-DC e fonte de energia. A referência de corrente a atribuir a cada controlador irá ditar o contributo de cada fonte de energia face às necessidades do sistema global, que por consequência, terá influência directa na gestão de energia utilizada.

A corrente a utilizar como referência para os super-condensadores foi obtida, nesta secção, pelo método da desagregação na frequência do sinal de potência. Este método consiste em dividir o sinal de potência do ciclo de condução em baixas frequências e altas frequências, tendo sido usado um $\tau = 8s$ (equação 4.1), as altas frequências serão atribuídas aos super-condensadores e as baixas frequências às baterias. Fica assim garantido que cada fonte de energia dará o seu contributo de acordo com as suas características de funcionamento.

A Figura 6.7 mostra a tensão no barramento DC ao longo do ciclo de condução para as duas topologias, em nenhuma das topologias testadas houve uma queda significativa do nível de tensão. Assim, pode concluir-se que o objectivo de manter a tensão no barramento DC estável ao longo de todo o ciclo foi cumprido.

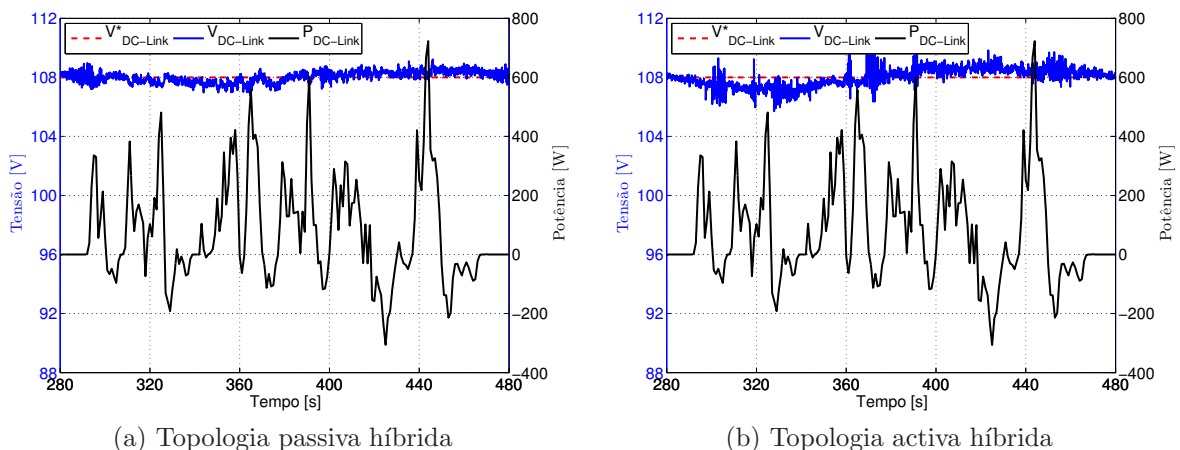


Figura 6.7: Tensão no barramento ao longo do ciclo de condução

De notar que, com a independência entre fontes, obtida na topologia activa híbrida, surge a necessidade de carregar os super-condensadores antes de cada teste, pois o facto de estes não estarem directamente em paralelo com as baterias permite que a tensão dos mesmos seja independente da tensão das baterias.

Para o teste em causa, a tensão aos terminais dos super-condensadores foi escolhida por forma a começar o teste com um valor de SoC muito próximo dos 100%, o que equivale a uma tensão pertos dos 48V (ver Figura 6.10b).

A Figura 6.8 mostra a contribuição, em termos de potência, de cada fonte ao longo do ciclo de condução aplicado.

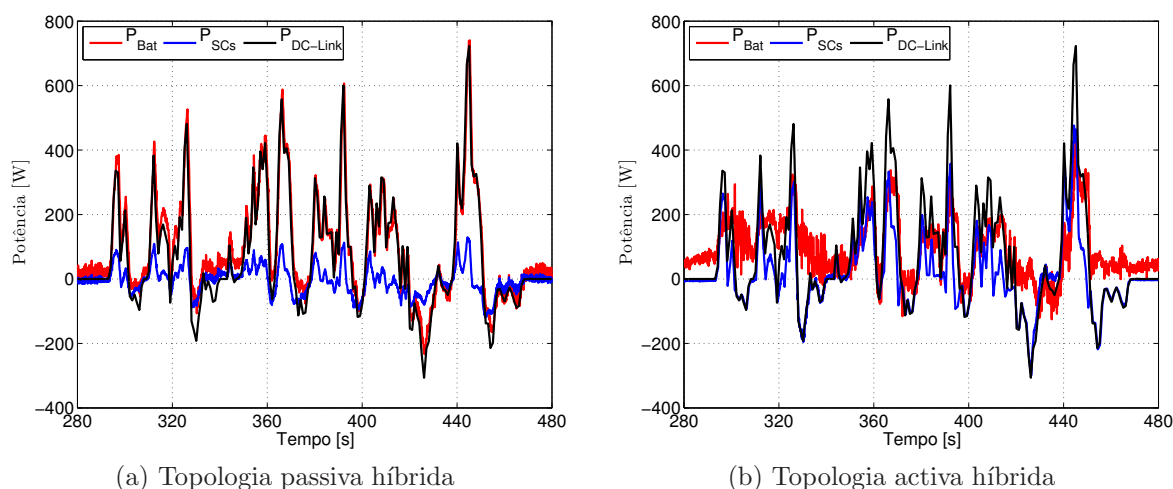
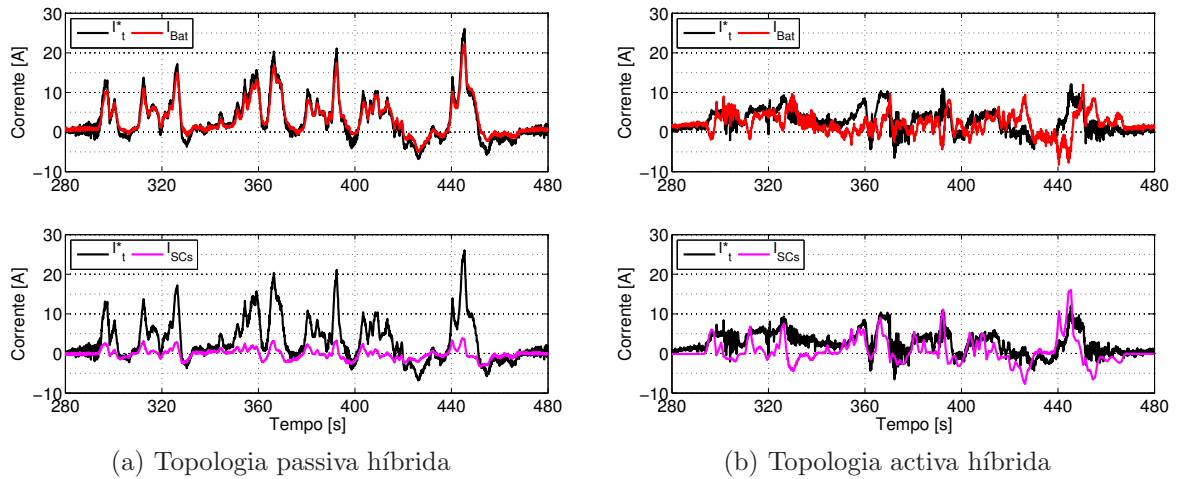


Figura 6.8: Distribuição das potências do ciclo de condução pelas fontes

É visível, por comparação das Figuras 6.8a e 6.8b, que no caso da topologia activa híbrida a contribuição dos super-condensadores é muito mais significativa que no caso da topologia passiva híbrida. Este aspecto é de extrema importância dado que, para além da contribuição dada pelos super-condensadores nas transições de alta frequência, estes contribuem também para a diminuição da amplitude máxima da potência fornecida pelas baterias. Assim, para a mesma potência global, temos uma distribuição mais uniforme da potência pedida a cada fonte, o que evidência o subaproveitamento dos super-condensadores na topologia passiva híbrida.

Tal como as curvas de potência, as curvas de corrente nas fontes mostram uma utilização das baterias onde a amplitude do valor máximo é menor na topologia activa híbrida (Figura 6.9).



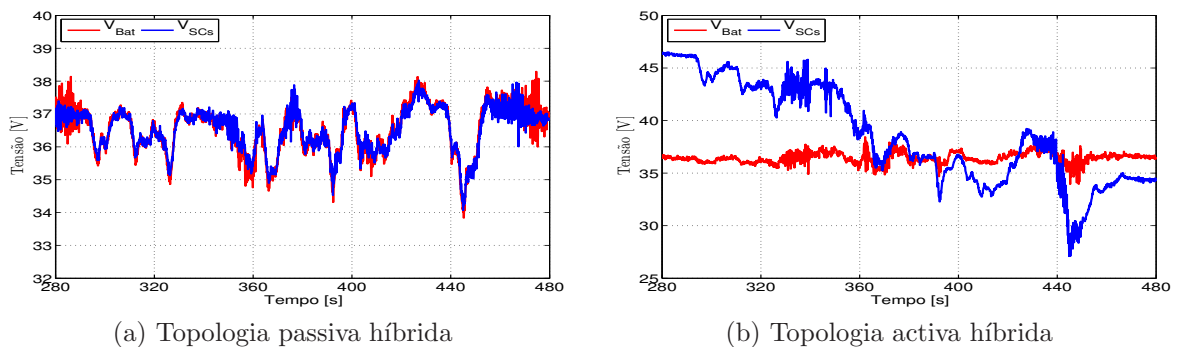
(a) Topologia passiva híbrida

(b) Topologia activa híbrida

Figura 6.9: Níveis de corrente nas fontes durante o ciclo de condução

É visível que no caso da topologia passiva híbrida, Figura 6.9a, a corrente na bateria chega a ultrapassar os 20A, enquanto que na topologia activa híbrida, Figura 6.9b, temos um valor registado máximo de 10A.

No caso da tensão aos terminais das fontes, Figura 6.10, nota-se que houve uma diminuição na variação de amplitude aos terminais da bateria para o caso da topologia activa híbrida, tendo essa variação passado para os super-condensadores. Este aspecto indica que as trocas de energia entre as baterias e o barramento DC não foram tão severas nesta topologia como tinham sido na topologia passiva híbrida. O sistema ficou assim mais eficiente dado que parte das trocas energéticas passaram para a fonte com menor resistência interna, originando menos perdas.



(a) Topologia passiva híbrida

(b) Topologia activa híbrida

Figura 6.10: Níveis de tensão nas fontes durante o ciclo de condução

Os testes experimentais apresentados nesta secção mostram que apesar de esta topologia necessitar de dois conversores DC-DC, o que pode ser apontado com desvantagem, foram conseguidas melhorias significativas ao nível da utilização das fontes de energia.

Houve uma distribuição mais uniforme da potência exigida às fontes, tornando o sistema mais eficiente, as transições de alta frequência continuaram a ser suportadas pelos super-condensadores e fez-se o aumento global da potência do sistema sem prejuízo para as baterias ou para a estabilidade do barramento DC. Este aspecto reforça a ideia de que a utilização

de super-condensadores e de baterias como sistema de energia híbrido é uma boa solução, desde que as potencialidades das duas fontes sejam devidamente exploradas.

De salientar que estes resultados foram obtidos com uma estratégia de gestão de energia bastante primária, sendo que para este tipo de gestão é necessário conhecer o ciclo de condução.

A próxima secção mostra que, utilizando uma arquitectura de controlo adequada bem como um sistema de gestão de energia com capacidade de decisão, a potência global do sistema pode ser aumentada mantendo as premissas da estabilidade da tensão no barramento DC e o uso adequado de cada fonte de energia.

6.3 Gestão de energia inteligente para topologia activa híbrida

A gestão de energia é, como ilustram os resultados da secção anterior, um aspecto de extrema importância em sistemas híbridos. Através de uma gestão de energia eficaz podem obter-se sistemas híbridos com menores perdas, maior potência e maior eficiência, levando a que a utilização das fontes de energia seja feita de uma forma mais racional, podendo até aumentar o seu ciclo de vida útil.

Os testes da secção anterior podem ser caracterizados, ao nível da gestão energética, como: **sem gestão**, para o caso da topologia passiva, onde as baterias eram a única fonte de energia; **gestão natural**, para o caso da topologia passiva híbrida, onde a gestão era feita pelo comportamento dinâmico natural de cada fonte; e uma gestão imposta pela **desagregação da frequência** do sinal de potência, onde as altas frequências são atribuídas aos super-condensadores e as baixas frequências são atribuídas às baterias, de modo a atingir um bom desempenho de ambas as fontes.

Contudo, os testes mostraram que ainda podem ser feitas melhorias, estas prendem-se com o carregamento controlado dos super-condensadores e com a regulação do seu estado de carga ao longo do ciclo de condução, sem que haja o conhecimento prévio do mesmo.

Este aspecto foi tido em consideração na última parte deste trabalho através do desenvolvimento de um método de gestão inteligente, foi para isso implementado um controlador de lógica difusa em linguagem LabVIEW, cujos resultados são apresentados nas Figuras 6.11 a 6.18.

Os resultados apresentados pretendem mostrar que, através de uma gestão inteligente, é possível iniciar um ciclo de condução com o estado de carga dos super-condensadores baixo sem que esse facto interfira na conclusão do ciclo. Os testes foram ambos realizados para a topologia activa híbrida, sendo a gestão o ponto diferenciador. Num dos testes foi implementada a gestão por desagregação da frequência do sinal de potência, no outro teste a gestão foi feita por um controlador de lógica difusa. Para a validação dos testes com o controlador de lógica difusa a potência foi aumentada para atingir um máximo de 900W, este aumento deveu-se à observação desta possibilidade através de testes preliminares.

6.3. GESTÃO DE ENERGIA INTELIGENTE PARA TOPOLOGIA ACTIVA HÍBRIDA

Nos dois casos, os super-condensadores iniciaram o ciclo de condução com um estado de carga bastante baixo, verifica-se através de resultados experimentais que o controlador de lógica difusa consegue, durante o ciclo de condução, recuperar o estado de carga dos super-condensadores para níveis que permitem um melhor desempenho dos mesmos.

A Figura 6.11 mostra a evolução da tensão no barramento DC ao longo do ciclo de carga. É visível na Figura 6.11a que houve uma queda na tensão do barramento DC perto dos 450s, este comportamento não se registou para o caso da gestão feita pelo controlador de lógica difusa, Figura 6.11b.

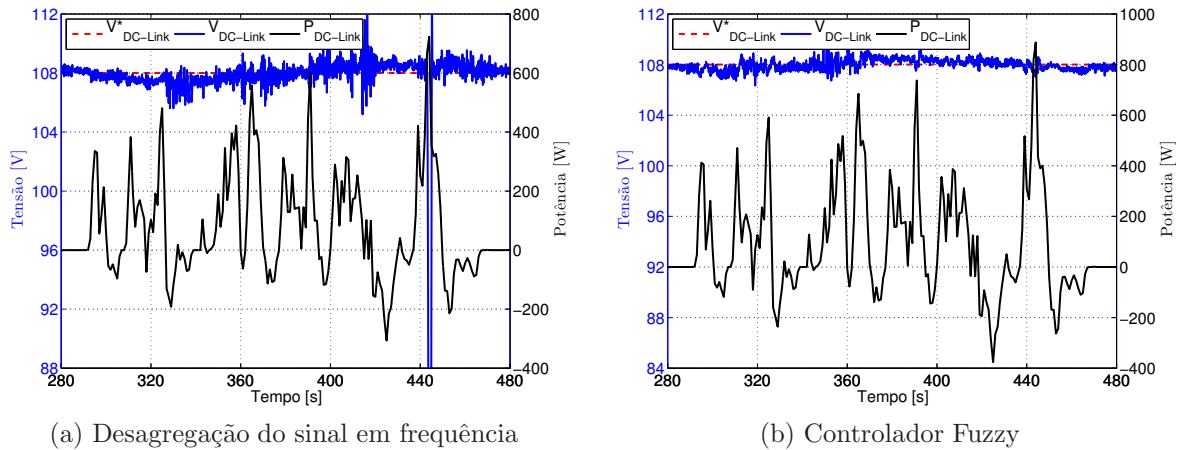


Figura 6.11: Tensão no barramento ao longo do ciclo de condução

A queda de tensão no barramento DC registada perto dos 450s, Figura 6.11a, ficou a dever-se ao contributo insuficiente dado por parte dos dos super-condensadores. Os super-condensadores não tinham, por volta dos 450s, um estado de carga suficientemente elevado que lhes permitisse dar um bom contributo. Este facto não teria ocorrido se, anteriormente, tivesse havido um carregamento dos super-condensadores que os deixasse prontos para uma resposta adequada a este tipo de situações.

Na Figura 6.12 podem ser vistas as curvas de potência pedida pela carga e as curvas de potência fornecidas por cada uma das fontes.

A Figura 6.12 mostra, por comparação, que mesmo tendo sido feito o teste da Figura 6.12b para uma potência mais elevada (+200W) que o da Figura 6.12a, os picos de potência exigidos às baterias foram semelhantes nos dois testes. Este é um aspecto particularmente interessante, pois, pode concluir-se que os super-condensadores foram uma fonte mais activa no seu contributo para o sistema. Este comportamento por parte dos super-condensadores resulta da influência directa que o controlador de lógica difusa tem no sistema.

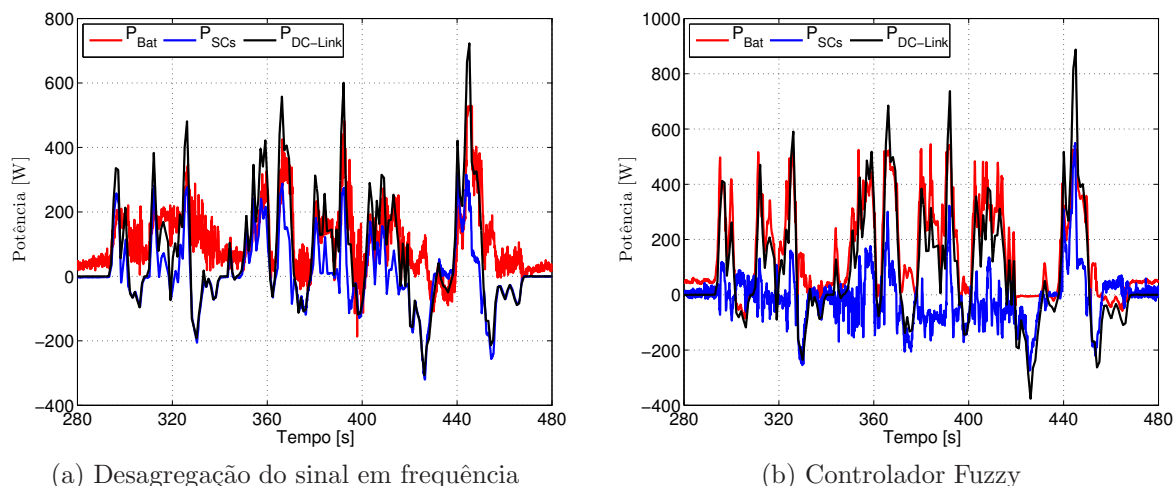


Figura 6.12: Distribuição das potências do ciclo pelas fontes

É ainda visível na Figura 6.12b que o controlador de lógica difusa promove o carregamento dos super-condensadores em períodos de tempo muito específicos. Perto dos 375s ocorre uma travagem regenerativa, como pode ver-se pela curva do $P_{DC-Link}$, para além de toda a energia da travagem ser direccionada para os super-condensadores, as baterias contribuem também para o seu carregamento. Também na Figura 6.12b pode ver-se que, entre os 400s e os 420s, a potência fornecida pelas baterias é bastante superior à potência exigida pela carga, este comportamento permite o carregamento dos super-condensadores mesmo quando está a ser pedida energia às baterias. De realçar ainda que esta troca regulada de energia entre as fontes não afectou em momento algum a estabilidade da tensão no barramento DC.

A Figura 6.13 mostra as curvas de corrente nas fontes para os testes realizados com os dois tipos de gestão. A Figura 6.13b, referente à gestão feita pelo controlador de lógica difusa, mostra por comparação dos sinais I_t^* , I_{Bat} e I_{SCs} , os espaços temporais onde houve o carregamento dos super-condensadores.

É possível visualizar nesta mesma figura que muito raramente a corrente nas baterias registou valores negativos, o que indica que a energia proveniente das travagens regenerativas foi absorvida essencialmente pelos super-condensadores, sendo este um aspecto claramente positivo.

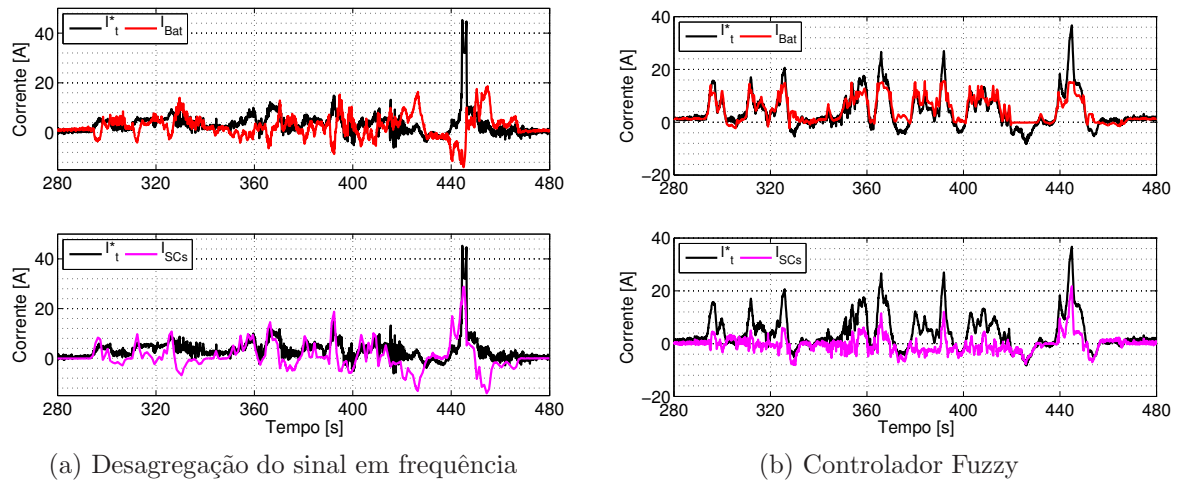


Figura 6.13: Níveis de corrente nas fontes durante o ciclo de condução

Na Figura 6.13a, referente à gestão através da desagregação em frequência, pode observar-se uma curva de corrente nas baterias com uma maior oscilação em comparação com a Figura 6.13b, o que se torna prejudicial para as mesmas. Pode ainda ser observado que a corrente nas baterias da Figura 6.13a atinge com maior frequência valores negativos, o que leva a concluir que não são os super-condensadores que absorvem a maior parte da energia proveniente das travagens regenerativas. Este aspecto está directamente relacionado com a estratégia de gestão feita através da desagregação da frequência do sinal de potência, isto porque, este método exige um maior contributo dos super-condensadores apenas nas alturas de transição da curva de potência requerida no sistema de alimentação.

A Figura 6.14 mostra a evolução da tensão aos terminais das duas fontes para cada um dos testes efectuados.

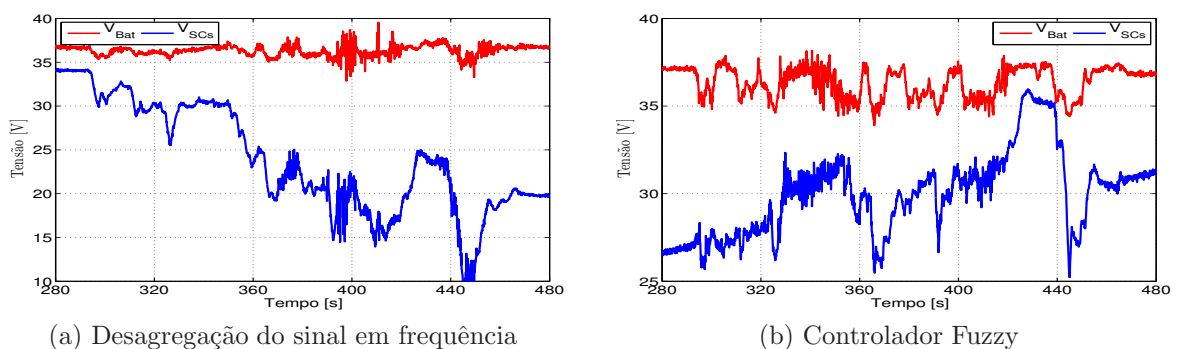


Figura 6.14: Níveis de tensão nas fontes durante o ciclo de condução

A comparação das Figuras 6.14a e 6.14b mostra que, para o caso da gestão feita com recurso à desagregação em frequência, a tendência geral do nível de tensão aos terminais dos super-condensadores é de constante descida. Consequentemente, o nível do estado de carga dos mesmos tem também uma tendência decrescente ao longo do ciclo, impedindo assim que os mesmos estejam em boas condições para uma contribuição eficaz.

No caso em que a gestão foi feita pelo controlador de lógica difusa, nota-se que nos

super-condensadores, para além das quedas que resultam da sua contribuição ao longo do ciclo, a tensão tem uma tendência evolutiva crescente. Deste modo, os super-condensadores recuperam sempre para um estado de carga que lhes permite fazer uma contribuição eficaz e eficiente ao longo de todo o ciclo.

Os testes realizados nesta secção permitem concluir que, com a inclusão de um sistema de gestão mais activo e capaz de tomar decisões na altura certa, o nível de potência pode ser aumentado sem que a potência das fontes de energia seja aumentada e sem que seja afectada a estabilidade do barramento DC.

No decorrer dos mesmos testes verificou-se a possibilidade de ir ainda mais longe com o sistema de gestão assente no controlador de lógica difusa e, não só se aumentou a potência global do sistema, como também, foram iniciados os testes com um valor de tensão aos terminais dos super-condensadores mais baixo, ou seja, estado de carga muito baixo. O controlador de lógica difusa foi capaz de promover a carga dos super-condensadores ao longo do ciclo (ver Figura 6.14b), sem que essa carga afectasse negativamente o comportamento das baterias ou do barramento DC.

A validação do sistema de gestão, através do controlador de lógica difusa, fica concluída com um último teste experimental sendo os resultados apresentados nas Figuras 6.15 a 6.18. Este teste teve a particularidade de ser iniciado com um valor de tensão aos terminais dos super-condensadores muito próximo do valor máximo. Desta forma, o valor inicial do estado de carga dos super-condensadores estava muito perto dos 100%, significando que teria de haver uma descarga dos mesmos, deixando-os pronto para absorver a energia de uma possível travagem regenerativa.

Na Figura 6.15 está presente a evolução da tensão do barramento DC durante o ciclo de condução. Nesta figura pode-se ver que o estado de carga inicial dos super-condensadores, perto dos 100%, não teve qualquer efeito negativo na tensão do barramento DC.

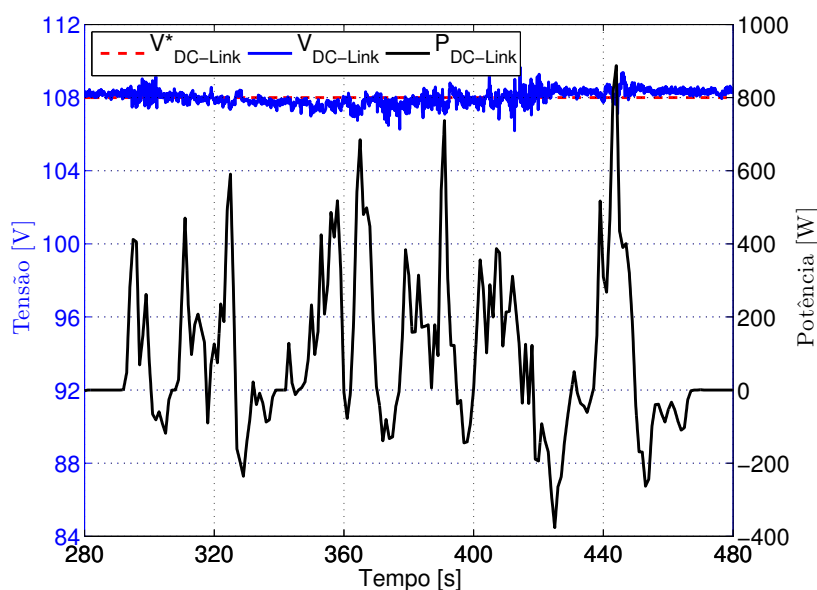


Figura 6.15: Tensão no barramento ao longo do ciclo de carga

A Figura 6.16 apresenta as curvas de potência de cada uma das fontes assim como a curva

6.3. GESTÃO DE ENERGIA INTELIGENTE PARA TOPOLOGIA ACTIVA HÍBRIDA

de potência da carga. Observa-se na fase inicial que o contributo dos super-condensadores é maior que o contributo das baterias, este comportamento é provocado pelo controlador de lógica difusa com o objectivo de descarregar os super-condensadores.

Assim que os super-condensadores atingem um nível de tensão mais baixo, o controlador de lógica difusa faz uma gestão de energia semelhante à que foi feita para o teste da Figura 6.12b.

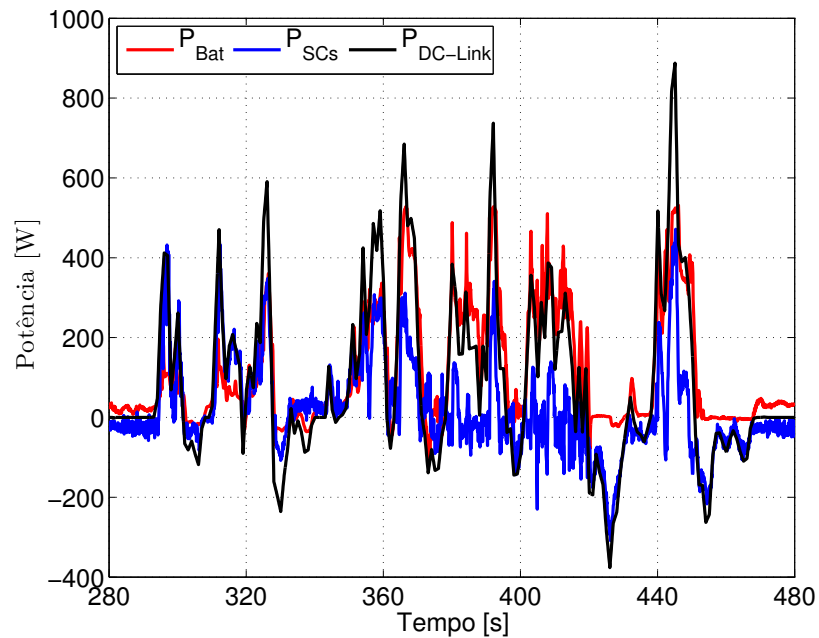


Figura 6.16: Potência nas fontes ao longo do ciclo de carga

Também nas curvas de corrente das fontes, Figura 6.17, é bem visível o comportamento descrito já relativamente às potências. Nos instantes iniciais a corrente fornecida pelas baterias é praticamente nula, ou seja, o contributo das mesmas é nulo e assim são os super-condensadores que suportam a tensão no barramento DC e toda a potência pedida pela carga.

Observa-se também, por comparação com a Figura 6.13b, que após os 360s os níveis de corrente atingidos pelas fontes nas duas situações são muito semelhantes.

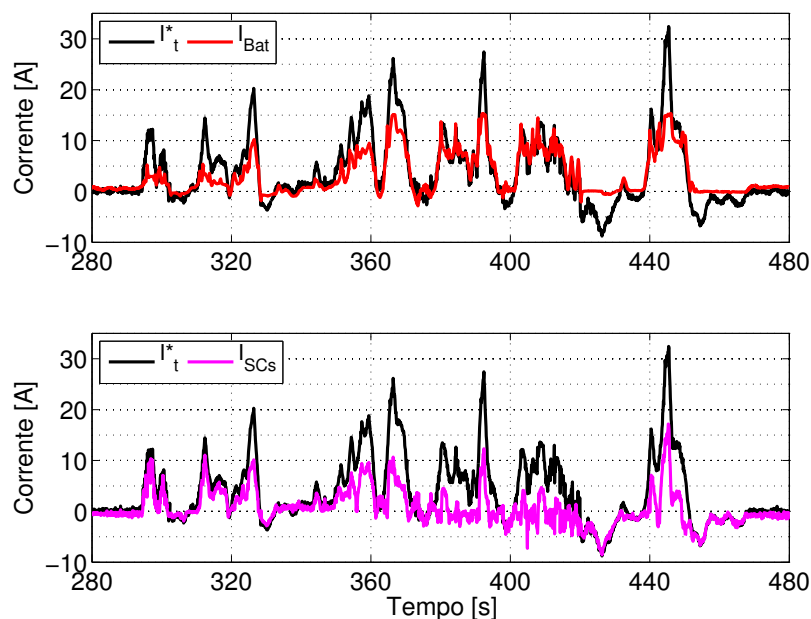


Figura 6.17: Corrente nas fontes ao longo do ciclo de carga

A Figura 6.18 mostra, no início do ciclo, a queda abrupta na tensão dos super-condensadores. Esta queda, provocada pelo controlador de lógica difusa, permitiu baixar o estado de carga dos super-condensadores e assim colocá-los a operar numa gama de funcionamento onde estes possam colaborar eficazmente com a fonte de energia, tanto no fornecimento de energia como na recuperação de energia proveniente de uma qualquer travagem regenerativa imprevisível.

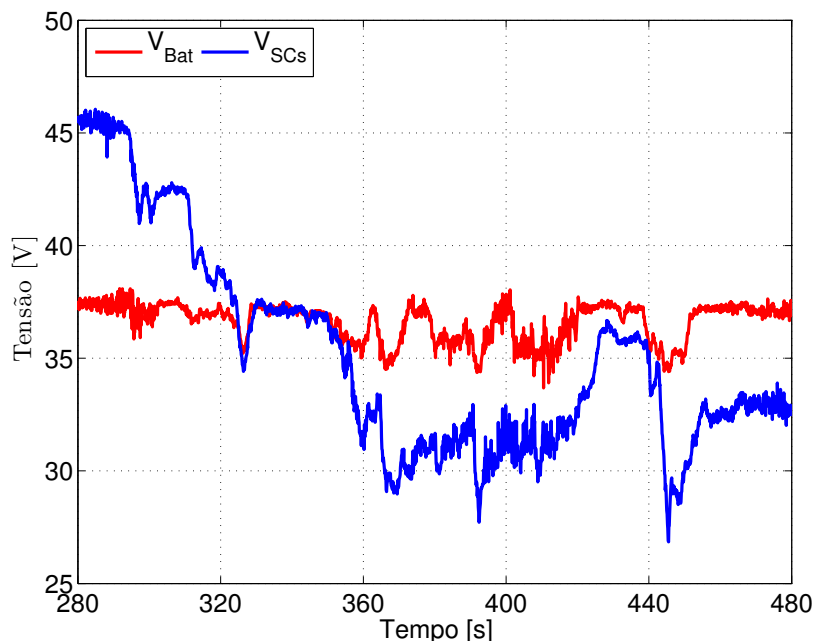


Figura 6.18: Tensão nas fontes ao longo do ciclo de carga

É também visível, através da comparação das Figuras 6.14b e 6.18, semelhanças nos níveis de tensão dos super-condensadores após os 360s, o que indica que o controlador de lógica difusa demora cerca de 40s a recuperar o sistema a partir de qualquer estado de carga dos super-condensadores.

6.3. GESTÃO DE ENERGIA INTELIGENTE PARA TOPOLOGIA ACTIVA HÍBRIDA

Os resultados experimentais apresentados nesta secção mostram um enorme progresso no que diz respeito à gestão de energia para a topologia activa híbrida, comparativamente com a estratégia de gestão baseada na desagregação da frequência.

Os resultados obtidos permitiram concluir que, com uma gestão de energia eficiente e com capacidade de decisão em tempo real, os níveis de potência podem ser aumentados sem que seja posta em causa a estabilidade do barramento DC e sem que sejam induzidos comportamentos prejudiciais para as fontes de energia em causa.

Em termos comparativos, houve, do teste feito com gestão através da desagregação da frequência para o teste feito com gestão através do controlador de lógica difusa, um incremento de potência global no sistema de aproximadamente 200W.

Os testes apresentados permitiram ainda comprovar uma boa gestão de energia, através do controlador de lógica difusa, para valores iniciais do estado de carga nos super-condensadores de aproximadamente 50% e 100%. Verificou-se, por comparação de resultados, que o sistema tenta inicialmente corrigir o estado de carga dos super-condensadores se os mesmos não se encontrarem na gama pretendida. Este aspecto mostra claramente que após um determinado período, que podemos chamar de ajustamento inicial do estado de carga dos super-condensadores, as curvas de tensão e de corrente são bastante semelhantes para o mesmo ciclo de condução mas com um estado de carga inicial nos super-condensadores bastante diferente.

Capítulo 7

Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros

7.1 Conclusão

A problemática da gestão de energia associada à escolha de topologias para sistemas híbridos constitui um enorme desafio. Este facto está relacionado, em grande parte, com o tipo de fontes de energia utilizados para a hibridização. Não existindo, actualmente, fontes de energia que comportem uma grande densidade de energia e uma grande densidade de potência em simultâneo, a solução passa pela associação de fontes energéticas que possam satisfazer as duas necessidades anteriormente referidas.

Encontrada a solução, surge a necessidade de atribuir, com algum rigor, a responsabilidade do fornecimento de energia à fonte com elevada densidade energética e a responsabilidade do fornecimento de potência à fonte com elevada densidade de potência. Só desta forma se tirará proveito das características de cada uma das fontes, sem o prejuízo de qualquer uma delas.

Esta problemática, da gestão de energia entre as fontes, ganha especial relevância com a adaptação ao caso de estudo tido em conta neste trabalho, o veículo eléctrico. Do ponto de vista do veículo eléctrico, a gestão de energia eficiente vai trazer benefícios em três espaços temporais diferentes.

O primeiro benefício, e o que ocupa o espaço temporal mais reduzido, está directamente ligado à forma de como é exigido a cada fonte que contribua para o suporte da potência global do sistema em cada instante. Assim, deve ser exigido a cada fonte que contribua com uma grande densidade de energia ou com uma grande densidade de potência, e nunca com as duas em simultâneo. Como consequências do primeiro benefício teremos a garantia de que nenhuma das fontes será danificada por utilização imprópria e ainda distribuição adequada dos contributos de cada fonte para o sistema.

O segundo benefício, ocupando um espaço temporal intermédio, será o aumento da autonomia ao nível energético do veículo eléctrico. Este benefício está directamente ligado às consequências do benefício anterior.

Por último, o terceiro benefício, que está também relacionado com as consequências directas do primeiro, centra-se na possibilidade do aumento do ciclo de vida das fontes devido à sua utilização de forma adequada. O terceiro benefício é o que está contido no espaço temporal mais longo.

A presente dissertação foca maioritariamente os aspectos positivos relativos ao primeiro benefício.

O trabalho aqui apresentado permitiu mostrar a influência da escolha de diferentes topologias na gestão de energia em sistemas híbridos, tanto através de simulações como em ambiente experimental, com recurso a um protótipo totalmente desenvolvido durante o decorrer do projecto. Os resultados experimentais relativos a cada topologia mostraram-se coerentes com as respectivas simulações, assim como os resultados obtidos para a comparação dos dois métodos de gestão aplicados à topologia activa híbrida.

As topologias bem como os resultados, foram apresentadas de forma clara, sendo possível a identificação dos aspectos positivos e negativos de cada uma, tendo ainda sido estudadas e apresentadas soluções para os aspectos negativos de cada topologia, e do nível do controlo e da sua gestão.

Com o estudo da topologia passiva, apenas com baterias, conclui-se que havia um elevado nível de oscilação na curva de potência fornecida, pois as baterias estavam a garantir quer a parcela de elevada densidade energética quer a parcela das transições abruptas de potência. De forma a suprimir as desvantagens da topologia passiva, só com baterias, estudou-se a topologia passiva híbrida, sendo a hibridização feita através da ligação paralela passiva entre baterias e super-condensadores. Esta nova topologia trouxe melhorias significativas no que diz respeito ao comportamento das duas fontes. A introdução dos super-condensadores, fonte com elevada densidade de potência, permitiu que de uma forma natural as baterias, fonte com elevada densidade de energia, não tivessem que suportar as transições de alta frequência exigidas pela carga. Esta topologia permitiu ainda o aumento da potência global do sistema, porém, através das curvas de potência de cada uma das fontes era visível que o contributo dos super-condensadores estava contido apenas às transições e numa escala temporal muito pequena, levando à conclusão de que os mesmos poderiam ter um maior contributo para o sistema.

A forma de forçar a que os super-condensadores tivessem uma participação mais activa no sistema foi isolá-los num segundo conversor e atribuir-lhes uma referência de potência independente da que era atribuída às baterias. Assim, foi estudada a topologia activa híbrida para tentar resolver os aspectos negativos da topologia passiva híbrida. Esta topologia trouxe vantagens relativamente à anterior na medida em que, foi feito um aumento de potência global do sistema e o contributo dos super-condensadores passou a ser maior. Contudo, o método utilizado para obter a referência de potência isolada para os super-condensadores, a desagregação em frequência do sinal de potência, mostrou-se pouco eficaz. O método utilizado, que por consequência impunha a gestão de energia entre as fontes assentava no pressuposto do conhecimento prévio do ciclo de carga, algo que nem sempre se verifica. Este

método tinha falhas também ao nível da gestão do estado de carga dos super-condensadores, deixando que por vezes o estado de carga dos mesmos fosse demasiado baixo.

Para solucionar este problema foi implementada uma estratégia de gestão baseada num controlador de lógica difusa. Esta gestão, aplicada à topologia activa híbrida, permitiu a regulação do contributo de cada uma das fontes bem como a gestão do estado de carga dos super-condensadores.

A validade do trabalho desenvolvido foi comprovada pela publicação de três artigos científicos durante a realização dos trabalhos conducentes a esta dissertação: “*Application of a Decoupling Method Based on Online Filtering Technique for Multi-Source Electric Vehicles*”, *15th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'13 ECCE Europe* (a decorrer em Setembro de 2013); “*An Integrated Fuzzy Logic Energy Management for a Dual-Source Electric Vehicle*”, *39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON* (a decorrer em Novembro de 2013) e “*Hybrid Topologies Comparison for Electric Vehicles with Multiple Energy Storage Systems*”, *27th International Electric Vehicle Symposium & Exhibition, EVS27* (a decorrer em Novembro de 2013).

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Relativamente aos trabalhos futuros, é expectável que se possa aumentar gradualmente o nível de potência utilizado para os testes experimentais. A abordagem a novas topologias será seguramente um dos próximos passos.

Poderão ainda ser utilizadas novas fontes de energia disponíveis no mercado, tais como, painéis foto-voltaicos e células de combustível. A temática da gestão de energia é também uma área que permite uma evolução futura muito grande, novas abordagens poderão ser tidas em conta.

Os trabalhos futuros passarão pela implementação dos trabalhos abordados na plataforma VEIL.

Bibliografia

- [1] No sitio da internet <http://www.electricvehiclesnews.com/History/historyearlyIII.htm>,
acedido em 01.09.2013.
- [2] C. C. Chan, Y.S. Wong, A. Bouscayrol and K. Chen, “Powering Sustainable Mobility: Roadmaps of Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles”, Proceedings of the IEEE, April 2009.
- [3] de Melo H.N, Trovao J.P, Pereirinha P.G, ”Batteries usability for Electric Vehicle power-train,”Energetics (IYCE), Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on , pp.1-7, 7-9 July 2011.
- [4] Etxeberria, A., Vechiu, I., Camblong, H. and Vinassa, J.M., ”Hybrid Energy Storage Systems for renewable Energy Sources Integration in mi- crogrids: A review”, IPEC, 2010 Conference Pro- ceedings, ISSN 1947-1262, 532-537, 2010.
- [5] Guibert, A. (Saft Groupe SA): “Batteries and Supercapacitor Cells for the Fully Electric Vehicle”, Smart Systems Integration Conference, Brussels, 17 June 2009.
- [6] Alon Kuperman and Ilan Aharon, Batteryultraca- pacitor hybrids for pulsed current loads: A review, Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews, ISSN 1364-0321, 981-992, 2011.
- [7] Khaligh, A and Li, Z, ”Battery, Ultracapaci- tor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Sys- tems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2806-2814, 2010.
- [8] Siang Fui Tie and Chee Wei Tan, ”A review of energy sources and energy management system in electric vehicles”, Journal of Renewable and Sus- tainable Energy Reviews, ISSN 1364-0321, 82- 102, 2013.
- [9] Mário A. Silva, Hugo Neves de Melo, João P. Trovão, Paulo G. Pereirinha, Humberto M. Jorge: ”Hybrid Topologies Comparison for Electric Vehicles with Multiple Energy Storage Systems”, Electric Vehicle Symposium, EVS27, 2013.
- [10] Thounthong, P.; Raël, S.; Davat, B.: “Energy Management of Fuel Cell/Battery/Supercapacitor Hybrid Power Source for Vehicle Applications”, Journal of Power Sources, vol. 193, no. 1, Pages 376-385, August 2009.

- [11] West, M. J.; Bingham, C. M.; Schofield, N.: “Predictive Control for Energy Management in All/More Electric Vehicles with Multiple Energy Storage Units”, IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC’03), June 2003.
- [12] H. Khayyam, A. Kouzani, and S. Nahavandi, “Intelligent energy management in hybrid electric vehicles,” Imprint, 2010.
- [13] Salmasi, F. R. “Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles: Evolution, Classification, Comparison and Future Trends”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 56, no. 5, September 2007.
- [14] J. P. F. Trovao, P. G. Pereirinha, H. M. Jorge, and C. H. Antunes, “A multi-level energy management system for multi-source electric vehicles – An integrated rule-based meta-heuristic approach,” Applied Energy, vol. 105, pp. 304–318, May 2013.
- [15] J. P. F. Trovao, V. D. N. Santos, P. G. Pereirinha, H. M. Jorge, and C. H. Antunes, “A Simulated Annealing Approach for Optimal Power Source Management in a Small EV,” IEEE Transactions on Sustainable Energy, pp. 1–10, 2013.
- [16] Ogata, K., (2003). Engenharia de Controle Moderno. 4th ed. : Pearson Prentice Hall.
- [17] Franklin, G., F., Powell, J., D., Workman M., (1998). Digital Control of Dynamic Systems. 3rd ed. : Ellis-Kagle Press.
- [18] Astrom, K., J., Wittenmark, B., (1997). Computer-Controlled Systems: Theory and Design. 3rd ed. : Prentice Hall.
- [19] T. Azib, O. Bethoux, G. Remy, C. Marchand, and E. Berthelot, “An innovative control strategy of a single converter for hybrid fuel cell/supercapacitor power source,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 12, pp. 4024–4031, Dec. 2010.
- [20] R. de Castro, J. P. Trovao, P. Pacheco, P. Melo, P. G. Pereirinha, and R. E. Araujo, “DC link control for multiple energy sources in electric vehicles,” 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, no. d, pp. 1–6, Sep. 2011.
- [21] Mário A. Silva, Hugo Neves de Melo, João P. Trovão , Paulo G. Pereirinha and Humberto M. Jorge, ”An Integrated Fuzzy Logic Energy Management for a Dual-Source Electric Vehicle”, 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), November 2013.
- [22] Allègre, A. L.; Bouscayrol, A.; Trigui, R.: “Influence of Control Strategies on Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage Systems for Traction Applications”, 5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC 2009), Dearborn, Michigan, USA, September 7-10, 2009.

- [23] Thounthong, P.; Raël, S.; Davat, B.: “Control Strategy of Fuel Cell/Supercapacitors Hybrid Power Sources for Electric Vehicle”, *Journal of Power Sources*, vol. 158, no. 1, Pages 806- 814, July 2006.
- [24] Mário A. Silva, João P. Trovão , Paulo G. Pereirinha and Humberto M. Jorge, ”Application of a Decoupling Method Based on Online Filtering Technique for Multi-Source Electric Vehicles”, the 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), September 2013.
- [25] G. Shi, Y. Jing, A. Xu, and J. Ma, “Study and Simulation of Based- fuzzy-logic Parallel Hybrid Electric Vehicles Control Strategy,” *Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*, vol. 1, pp. 280–284, Oct. 2006.
- [26] O. Erdinc and M. Uzunoglu, “Recent trends in PEM fuel cell-powered hybrid systems: Investigation of application areas, design architectures and energy management approaches,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9, pp. 2874–2884, Dec. 2010.
- [27] J. Trovão, P. G. Pereirinha, and H. M. Jorge, “Simulation model a and road tests comparative results of a small urban electric vehicle,” *Industrial Electronics Conference of IEEE, 2009. IECON '09.*, pp. 836– 841, 2009.
- [28] P. G. Pereirinha, J. P. Trovão, L. Marques, M. Silva, J. Silvestre, and a F. Santos, “Advances in the Electric Vehicle Project-VEIL Used as a Modular Platform for Research and Education,” *International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, EVS24*, 2009.
- [29] M. André , “The artemis european driving cycles for measuring car pollutant emissions,” *Science of the total Environment*, 2004.