



Felipe Machado

# Gestão de múltiplas fontes de energia baseada na hibridização de meta-heurísticas

Dissertação de Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Setembro / 2013



UNIVERSIDADE DE COIMBRA





FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
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 -

# Gestão de múltiplas fontes de energia baseada na hibridização de meta-heurísticas

Felipe Machado

**Orientador:**

Professor Doutor Carlos Alberto Henggeler de Carvalho Antunes

**Co-orientador:**

Professor Doutor João Pedro Fernandes Trovão

**Júri:**

**Presidente:** Professor Doutor José Manuel Fernandes Craveirinha

**Vogais:**

Professor Doutor Carlos Alberto Henggeler de Carvalho Antunes

Professora Doutora Lúcia Maria dos Reis Albuquerque Martins

Coimbra, Setembro de 2013





“Aqueles que se sentem satisfeitos sentam-se e nada fazem. Os insatisfeitos são os únicos benfeitores do mundo.”

Walter S. Landor



# Agradecimentos

O percurso efetuado nesta jornada académica foi longo e trabalhoso, com seus altos e baixos. Num momento como estes é de toda a verdade afirmar que não teria chegado a este ponto de carreira sem ajuda dos que aqui o reconhecimento enumero.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Alberto Henggeler de Carvalho Antunes, por me aceitar como aluno de braços abertos e por todo o apoio e orientação prestadas ao longo deste trabalho e, pela contribuição da revisão dos textos da dissertação e publicação.

Ao Prof. Dr. João Pedro Trovão, não apenas pela orientação do trabalho, estímulo e acompanhamento empenhado manifestados desde a primeira conversa, mas também pela amizade e orientações de vida, além das grandes oportunidades oferecidas.

Ao Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra e ao Instituto Superior Engenharia de Coimbra por terem disponibilizado equipamento e instalações para a realização do trabalho experimental. À Universidade de Coimbra, que acreditou no meu potencial e aceitou-me como aluno.

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 Projeto EMSURE - *Energy and Mobility for Sustainable Regions* (CENTRO-07-0224-FEDER-002004) que permitiram cobrir parte dos encargos económicos inerentes à realização deste trabalho.

Aos amigos que me acolheram nesta jornada, especialmente os quais tenho o prazer de hoje trabalhar, Hugo M. de Melo e Mário A. Silva. À Mara Luciene C. de Oliveira pelos conselhos, apoio e incentivo constante nesta batalha. E por último, mas de forma alguma menos importante, ao meu pai, Nelson H. Machado, à minha mãe, Célia A. M. Machado, e à minha namorada Diana O. Martins por serem atentos e interessados no meu sucesso e realização pessoal, por me apoiarem e ajudarem a manter a cabeça erguida ao longo dos altos e baixos da vida.

À todos, os meus sinceros agradecimentos,  
Felipe Machado



# Resumo

A crescente preocupação com as emissões de poluentes e oscilações no preço do barril de petróleo, colocam em causa o futuro dos veículos movidos a combustão. É neste sentido que a indústria investe no futuro dos veículos elétricos, tecnologia ainda limitada pela baixa capacidade das baterias. Nesta tese é abordado o tema de controlo e gestão de múltiplas fontes de energia na alimentação de veículos elétricos, com vista à sua implementação num *setup* experimental. As fontes aqui tratadas serão as baterias e SCs por unirem uma alta energia específica a uma alta potência específica, além de custos reduzidos e garantia de tecnologias maduras.

O controlador responsável pela divisão de potência entre as fontes baseia-se em técnicas modernas capazes de suportar as não-linearidades do sistema e reduzir significativamente o ruído gerado pelo sensores de efeito Hall. Além disso, para obter um sistema estável e de fácil readaptação foi escolhido o método de solução por um Regulador Linear Quadrático. Um *Extended Kalman Filter* que utiliza as medições dos sensores e um modelo do sistema, faz a fusão entre estes para criar um ambiente quase livre de ruídos. Ambas soluções são validadas separadamente em um simulador construído em ambiente Matlab/Simulink para testar a dinâmica de múltiplas fontes em um veículo elétrico.

Um algoritmo de gestão foi desenvolvido para enviar os sinais à camada de controlo, a qual baseia-se na junção de regras e abordagens meta-heurísticas. Essa gestão tem como base o estado de carga das fontes (State of Charge - SoC) e a potência que o sistema de tração requisita (ou devolve) às fontes. As regras que definem a zona de operação do algoritmo de otimização são dinamizadas e tendem a controlar o fluxo de energia. O algoritmo híbrido, que une as potencialidades de pesquisa local do *Particle Swarm Optimization* com o escape de mínimos locais do *Simulated Annealing*, gere o fluxo de potência entre as fontes e procura sempre um fluxo ótimo de energia em sincronia com todo o sistema.

O sistema foi implementado e validado através de testes realizados numa bancada de escala reduzida. Toda a parte de gestão, comunicação, *data logging*, simulação de carga e interface foi implementada no DSP de uma CompactRIO da National Instruments através do desenvolvimento de um sistema de tempo real em Labview. Os resultados obtidos são muito promissores, perspectivando-se uma perfeita interação entre as fontes e o sistema de tração, com grande possibilidade de aumento de vida útil das baterias e eficiência do sistema.

**Palavras-chave:** Veículos Elétricos, Conversores DC/DC, Regulador Quadrático Linear, Filtro de Kalman, Enxame de Partículas, Arrefecimento Simulado.

# Abstract

The increasing concern about air pollution emissions and oil prices oscillation jeopardizes the future of combustion engine vehicles. As a result, the industry invests in the future of electric vehicles, although this technology is still limited due to the batteries' low capacity. This thesis approaches the theme of control and management of multiple energy sources in an that powers an electric vehicle, in addition to its implementation in an experimental setup. The referred sources are batteries and SCs, due to the combination of high specific energy and high specific power, along with reduced costs and assurance of mature technologies.

The controller responsible for the potency division between the sources relies on modern techniques able to handle the system's nonlinearities and significantly reduce the noise generated by the Hall effect sensors. Furthermore, in order to obtain a stable and easily adaptable system, the solution provided by the Linear Quadratic Regulator was chosen. An Extended Kalman Filter uses a fusion of the sensor's measurements with the system's model to create an almost noise-free environment. Both solutions are validated separately in a simulator designed in Matlab/Simulink environment that tests the multiple sources dynamic in an electric vehicle.

A management algorithm was develop to send the signals to the control layer, which is based on the combination of rules and metaheuristics approaches. This management is based on the source's state of charge (SoC) and the power requested from the sources by the traction system. The rules that define the optimization algorithm's area of operation are dynamic and prone to control the energy's flow. The hybrid algorithm, which unites the local research potentialities of the Particle Swarm Optimization with the minimum local escape of the Simulated Anneling, manages the power flow between the sources, always looking for an optimum flow of energy in sync with the whole system.

The system was implemented and validated through a series of tests performed in a reduced scale test bench. Everything in relation to the management, communication, data logging, load simulation and interface was implemented in the DSP of a CompactRIO made by National Instruments through the development of a real-time Labview system. The real and simulated results obtained are very promising, contemplating in the future a perfect interaction between the sources and the traction system, with great potential of increase in battery-life and system efficiency.

**Keywords:** Electric Vehicles, DC/DC Power Converters, Linear Quadratic Regulator, Kalman Filter, Particle Swarm Optimization, Simulated Annealing.



# Conteúdo

<b>Resumo</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xiv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xv</b>
<b>Siglas e Acrónimos</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Meios de transporte e seus impactos na economia . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	3
1.3 Organização da dissertação . . . . .	4
<b>2 Estado da Arte</b>	<b>5</b>
2.1 Veículos elétricos . . . . .	5
2.2 Tipos de veículos elétricos . . . . .	6
2.3 Fontes de energia para VEs . . . . .	8
<b>3 Controlador</b>	<b>9</b>
3.1 Topologia estudada . . . . .	9
3.2 Construção do modelo teórico . . . . .	10
3.2.1 Modelação do pequeno sinal . . . . .	12
3.3 Controlador de tensão do barramento comum . . . . .	12
3.3.1 Formulação do problema de controlo . . . . .	13
3.3.2 Lei de Controlo . . . . .	14
3.4 <i>Extended Kalman Filter</i> . . . . .	14
3.5 Implementação em Matlab/Simulink . . . . .	16
3.6 Resultados das simulações . . . . .	18
3.6.1 Fases típicas de funcionamento de um veículo . . . . .	19
3.6.2 Ciclo de condução normalizado Artemis . . . . .	21

<b>4</b>	<b>Gestão de múltiplas fontes</b>	<b>23</b>
4.1	Descrição do problema . . . . .	24
4.2	Restrição dinâmica do espaço de pesquisa . . . . .	26
4.3	Algoritmos baseados em meta-heurísticas . . . . .	28
4.3.1	<i>Particle Swarm Optimization</i> . . . . .	29
4.3.2	<i>Simulated Annealing</i> . . . . .	31
4.3.3	Algoritmo híbrido PSO-SA . . . . .	32
4.4	Resultados das simulações . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Validação experimental</b>	<b>39</b>
5.1	Hardware utilizado . . . . .	39
5.1.1	Escala reduzida e limitações do sistema implementado . . . . .	39
5.1.2	Sensores . . . . .	40
5.1.3	IGBTs . . . . .	41
5.1.4	CompactRIO . . . . .	41
5.2	Programação em Labview . . . . .	42
5.3	Resultados experimentais . . . . .	43
<b>6</b>	<b>Conclusões e trabalhos futuros</b>	<b>47</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>49</b>

# Lista de Figuras

1.1	Valores do barril de petróleo . . . . .	2
1.2	Perspetiva de venda dos automóveis em função do seu tipo até 2050 . . . . .	2
2.1	Carros elétricos que foram sucesso de vendas no início do século XX . . . . .	5
2.2	Carros elétricos de diferentes gamas disponíveis atualmente . . . . .	6
2.3	Diferentes tipos de VEs em função da(s) fonte(s) de energia usada(s) . . . . .	7
2.4	Comparação dos diversos sistemas de baterias, incluindo SCs . . . . .	8
3.1	Quadrantes de funcionamento do conversor DC/DC reversível . . . . .	9
3.2	Arquitetura de gestão de energia num veículo com duas fontes . . . . .	10
3.3	Esquema elétrico do sistema de gestão de energia do VE . . . . .	11
3.4	Arquitetura proposta para o controlador . . . . .	13
3.5	Esquema global do modelo em Simulink . . . . .	16
3.6	Modelo utilizado para simular as fontes de energia . . . . .	16
3.7	Espectro normalizado dos ciclos de condução . . . . .	19
3.8	Simulação das fases típicas de funcionamento de um veículo . . . . .	19
3.9	Simulação com filtro no controlo e ruído nos sensores . . . . .	20
3.10	Estudo comparativo entre correntes das baterias . . . . .	21
3.11	Tensão do barramento, <i>duty cycles</i> e potências para o ciclo de condução . . . . .	22
3.12	Tensões das fontes para o ciclo de condução . . . . .	22
4.1	Diferentes camadas de controlo e gestão . . . . .	24
4.2	Sistema de Gestão de Energia . . . . .	26
4.3	Fluxograma com as restrições dinâmicas . . . . .	27
4.4	Partículas do PSO em duas fases distintas . . . . .	30
4.5	Exemplo de atualização da velocidade e posição de uma partícula . . . . .	30
4.6	<i>Plot</i> 3D da função Ackley . . . . .	32
4.7	Disposição de partículas do PSO numa função do tipo Ackley . . . . .	33
4.8	Reajuste das partículas do PSO após aplicação do SA . . . . .	33
4.9	Tensão do barramento e SoC das fontes para o ciclo de condução . . . . .	35
4.10	Potência da carga e das fontes para o ciclo de condução . . . . .	36

5.1	<i>Setup</i> experimental de escala reduzida utilizado nos testes . . . . .	40
5.2	Transdutores de tensão e corrente LEM utilizados nas medições . . . . .	40
5.3	Arquitetura do sistema CompactRIO . . . . .	41
5.4	Parte do código implementado na FPGA da CompactRIO . . . . .	42
5.5	Resultados experimentais: Tensão, SoC e potências . . . . .	44
5.6	Resultados experimentais: <i>duty cycles</i> . . . . .	44
5.7	Comparação entre $V_{Link}$ , $u_{SC}$ e $V_{load}$ . . . . .	45

# Lista de Tabelas

1.1	Especificações do VEIL . . . . .	3
3.1	Características do banco de baterias (módulos SAFT VH 12V) . . . . .	17
3.2	Características do banco de SCs (módulos Maxwell BMOD0330) . . . . .	17
3.3	Parâmetros nominais do sistema . . . . .	18
4.1	Parâmetros da camada de gestão de potência . . . . .	34



# Siglas e Acrónimos

AC - *Alternate Current* (Corrente Alternada)

Cd - de Níquel-Cádmio

DC - *Direct Current* (Corrente Contínua)

DSP - Digital Signal Processor (Processador Digital de Sinal)

EKF - *Extended Kalman Filter* (Filtro Estendido de Kalman)

FC - *Fuell Cell* (Célula de Combustível)

FPGA - *Field-programmable gate array* (Arranjo de Portas Programável em Campo)

IGBT - *Insulated-gate bipolar transistor* (Transistor Bipolar de Porta Isolada)

LQI - *Linear Quadratic Integrator* (Integrador Linear Quadrático)

LQR - *Linear Quadratic Regulator* (Regulador Quadrático Linear)

MOSFET - *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor* (Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor)

NiMH - *Nickel-Metal Hydride* (Níquel-Hidreto Metálico)

Pb - Chumbo

PCB - *Printed Circuit Board* - Placa de Circuito Impresso

PI - *Proportional-Integrator* (Proporcional-Integrador)

PSO - Particle Swarm Optimization (Otimização por enxame de partículas)

PWM - *Pulse-width modulation* (Modulação por Largura de Pulso)

SA - *Simulated Annealing* (Arrefecimento Simulado)

SC - Supercondensador

SoC - *State of Charge* (Estado de Carga)

VE - Veículo Elétrico

VEIL - Veículo Elétrico Isento de Licença de condução

VEV - Variador Eletrónico de Velocidade





# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Meios de transporte e seus impactos na economia

Uma das principais preocupações da agenda política e científica atual centra-se na disponibilidade de energia e respectivo custo, envolvendo fatores económicos, ambientais e geopolíticos. Por exemplo, a União Europeia estabeleceu objetivos de redução das emissões de gases de efeito de estufa em 20%, de aumentar a quota de energias renováveis em 20% e promover uma melhoria de 20% na eficiência energética global até 2020 [15]. Em Março de 2011, a União Europeia aprovou, ainda, o seu novo Livro Branco sobre política de transportes [14], na qual figuram quarenta iniciativas a implementar na próxima década, de forma a reduzir a dependência da Europa relativamente à importação de petróleo, e sobretudo diminuir as emissões de dióxido de carbono no setor dos transportes em 60% até 2050. Em Dezembro de 2011, a União Europeia divulgou o “Roteiro para a Energia 2050”, no sentido de se atingir as metas impostas pelo novo Livro Branco [14]. A economia mundial está fortemente ligada à mobilidade de pessoas e bens, setor foi responsável por 60,3% do consumo mundial de petróleo em 2005, 60,5% em 2006, 61,4% em 2008 e 61,74% em 2009, comparativamente com 45,4% em 1973 [20, 21]. Tais dados demonstram o grande potencial de intervenção dessa área.

O consumo de combustível e cada vez mais os conflitos existentes ou latentes, principalmente no Médio Oriente, levam a temer a escassez de petróleo e ao aumento do seu preço [54, 53], confirmada pelos preços de pico praticados durante o mês de Julho de 2008, em que o barril de petróleo atingiu os US\$ 147,3. A evolução do valor do barril de petróleo no período 1985 a 2011, nas diversas praças, é refletida no gráfico da Figura 1.1.

Outra questão fundamental, relacionada com o sector dos transportes, é a utilização massiva de veículos com motor de combustão interna. Essa tem como consequência um aumento significativo das emissões poluentes, nomeadamente de gases de efeito de estufa, que devem ser evitadas para a sustentabilidade do planeta e para uma melhor qualidade de vida. As emissões desse tipo de veículo são fontes importantes de poluição urbana, especialmente em cidades de média e grande dimensão.

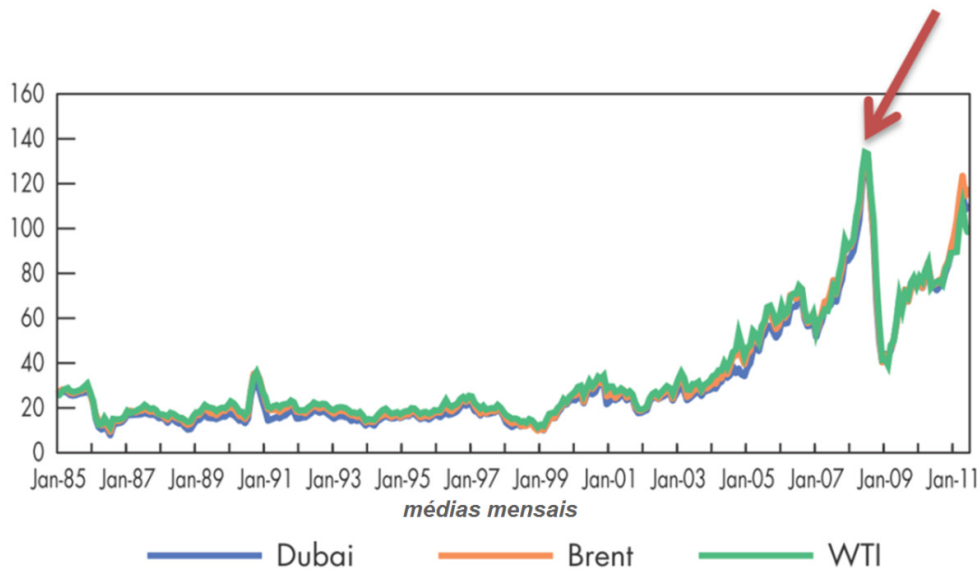


Figura 1.1: Valores do barril de petróleo em US\$ para diferentes praças [20]

Tendo em vista estes consumos e respectivas consequências, o esforço científico e a atenção da indústria automóvel na procura por soluções alternativas de mobilidade terrestre aumentaram nos últimos anos, surgindo vários desafios e oportunidades comerciais em torno dos veículos elétricos (VEs). Vendedores de eletricidade e outras partes interessadas têm investido no desenvolvimento do VE e tecnologias associadas (como sistemas de controlo e fontes de energia). Diversos governos procuram apostar na implementação de infra-estruturas de carga, estimulando a adoção do VE, como é o caso do governo português através do programa Mobi.E., perspectivando-se assim uma adesão global significativa às várias tecnologias de VE no futuro, tal como mostra a Figura 1.2 [23].

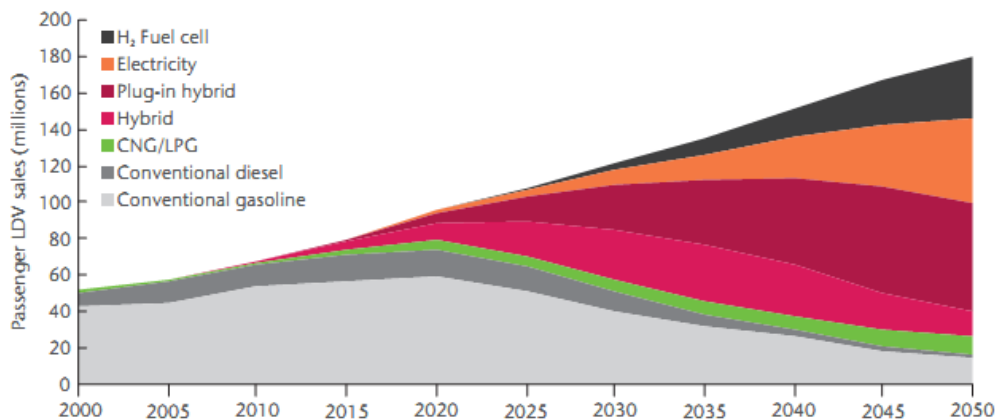


Figura 1.2: Perspetiva de venda dos automóveis em função do seu tipo até 2050 [23]

## 1.2 Objetivos

De acordo com este panorama mundial e a evolução de tecnologias que permitam uma redução significativa na utilização de combustíveis fósseis, a mudança de máquinas movidas a combustível para as movidas a energia elétrica é cada vez mais necessária. Tendo em conta ainda o seu uso mais eficiente e limpo, além da minimização dos impactos e poluições na sua produção, começam a surgir tecnologias viáveis para a produção em massa de VEs. Através da potencialização das capacidades destes veículos, como a autonomia, capacidade de armazenamento, performance e custo, estes podem ganhar rapidamente o mercado.


Este trabalho de mestrado visa desenvolver, simular e testar um sistema capaz de fazer o controlo e a gestão de duas fontes de energia, para o caso de VEs, nomeadamente, baterias e supercondensadores (SCs). Nesse projeto, o trabalho de estudo aqui relatado dividiu-se em 2 desafios.

O primeiro desafio se centrou na definição de um controlador para o comando do sistema. Este deve ser suficientemente robusto para manter um barramento comum estável ao qual será ligado o(s) Variador(es) Eletrónico(s) de Velocidade (VEV) que comandará(ão) o(s) motor(es). O controlador também deve suportar as diversas instabilidades ligadas à gestão de múltiplas fontes, contemplar possíveis ruídos advindo dos sensores, e obedecer às referências de potência dum posterior módulo de gestão de energia.

Um segundo desafio relaciona-se com o desenvolvimento de uma estratégia de gestão de energia para as fontes. Esta tem como base o estado de carga das fontes (State of Charge - SoC) e a potência que o sistema de tração requisita (ou devolve) às fontes.

Por último, o sistema deve ser implementado e validado através de testes realizados numa bancada de escala reduzida, evidenciando a capacidade de ser implementado no VE do Departamento de Engenharia Electrotécnica no Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (DEE-ISEC), nomeadamente, no VEIL (Veículo Elétrico Isento de Licença de condução) [1], utilizando como referência o projeto MESMO-EV [2].

Tabela 1.1: Especificações do VEIL

	<p>Entidade Proponente: Instituto Politécnico de Coimbra  Nome do Projeto: VEIL  Marca: Ligier  Modelo: 162 GL  Tipo: De passageiros  Motor: Assíncrono 3 / 4 kW / 400 V  Baterias: Ni-MH / 2,9 kWh  Autonomia / Velocidade Máxima: 45 km / 50 km/h  Ano / Massa: 2007 / 500 kg  Número de passageiros: 2</p>
---	---

O projeto VEIL (Tabela 1.1) nasceu para fomentar o ensino e a investigação na área dos veículos elétricos, fruto de uma adaptação de um veículo isento de licença de condução, originariamente com motor de combustão interna, para um veículo elétrico de pequenas dimensões, próprio para circulação em meios urbanos. Este tipo de veículo enquadra-se na rotina diária de uma grande parte dos europeus, quer em termos de ciclos de movimentação diária, quer em distância percorrida e tempos de utilização.

### 1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação está essencialmente dividida em cinco capítulos.

No capítulo 1 é feita a introdução da dissertação, com os motivos que guiaram o trabalho para os VEs e os objetivos pretendidos com este. Também é feita aqui uma pequena introdução sobre os projetos em que este se situa.

O capítulo 2 faz um breve introdução sobre VEs, suas diferentes classificações e as fontes disponíveis atualmente para uso nestes.

O capítulo 3 descreve a topologia elétrica utilizada para gerir as múltiplas fontes do VE, assim como modela, desenvolve e testa o controlador e filtro a serem utilizados para este propósito. A modelagem é feita através de uma representação de espaço de estados, o método utilizado para resolver os ganhos do controlador foi o Regulador Linear Quadrático (*Linear Quadratic Regulator* - LQR), filtro utilizado foi uma versão estendida do Filtro de Kalman e os testes foram efetuados em ambiente Matlab/Simulink.

O capítulo 4 faz breves comentários sobre os diferentes modos de se gerir a energia em um VE com múltiplas fontes, assim como introduz alguma informação sobre abordagens meta-heurísticas. Neste capítulo também é demonstrado como funciona a divisão por camadas para a gestão de energia e as regras que delimitam a camada inferior. Esta camada inferior é composta por um algoritmo híbrido que reúne benefícios do “Enxame de Partículas” (*Particle Swarm Filter* - PSO) com o “Arrefecimento Simulado” (*Simulated Annealing* - SA). Os resultados foram adquiridos através do mesmo simulador do capítulo 3, apenas com a adição desta gestão de energia.

O capítulo 5 expõe o hardware e software utilizados para implementação de uma bancada de testes reduzida, assim como mostra os resultados obtidos e comentários acerca do mesmo.

Por último, o capítulo 6 consiste na descrição das conclusões obtidas com o trabalho realizado, sendo também feita referência aos trabalhos futuros que visam melhorar e otimizar o trabalho desenvolvido.

# Capítulo 2

## Estado da Arte

### 2.1 Veículos elétricos

A história dos VEs tem seu início no meio do século XIX. Nesta altura a gasolina ainda era um subproduto do petróleo que de nada servia. Historiadores relatam que milhares de litros deste composto eram descartados na produção de querosene (usado principalmente para iluminar os lampiões). Nesta mesma época, Thomas Edison e Nikola Tesla competiam na “guerra das correntes”, numa tentativa de definir o tipo de corrente que iria dominar os EUA, a Corrente Contínua de Edison, alegada por ele como menos perigosa, ou a Corrente Alternada de Tesla, que tinha capacidade de ser transmitida a quilômetros de distância de sua subestação. Rapidamente a eletricidade alcançava às residências, o que tornou possível o aparecimento de tração elétrica nos veículos com recurso a baterias recarregáveis. Em um curto espaço de tempo os VEs passam a ser um bem cobiçado pela sociedade norte-americana. Eles eram silenciosos, não tinham marchas e não exalavam cheiros, verdadeiros carros de luxo. O Columbia Electric Runabout (Figura 2.1a) foi o veículo mais vendido em 1900 e o primeiro a atingir a meta de 1.000 unidades produzidas. Entre 1907 e 1937 a Anderson Electric Car Company vendeu 13.000 unidades do Detroit Electric (Figura 2.1b).



(a) 1904 Columbia Electric Runabout



(b) 1914 Detroit Electric

Figura 2.1: Carros elétricos que foram sucesso de vendas no início do século XX

A Standard Oil, empresa que comercializava o querosene nos EUA, teve o seu domínio na iluminação corroído pela invenção da lâmpada. Mas o grande empresário John Davison Rockefeller, fundador desta empresa, determinado a manter o *status* de homem mais rico dos EUA, apostou intensamente nas pesquisas relacionadas com a gasolina. Não demorou para este investimento dar retorno, e em 1910 os carros a gasolina começaram a dominar o mercado mundial, tendência que mantém-se atualmente. Com uma grande autonomia, fácil reabastecimento e um baixo custo de aquisição, os veículos a combustão eram imbatíveis. Apesar do VE ter estado sempre à frente em termos tecnológicos e de eficiência, já por essa altura, era penalizado pelas desvantagens que ainda hoje são os seus maiores problemas: autonomia, tempo de recarregamento e o custo de aquisição das baterias.

O desaparecimento do VE de uso particular ocorre por volta da década de 1930, ressurgindo passados 30-40 anos, com a crise do petróleo e conseqüente necessidade de encontrar alternativas ao uso da gasolina. A evolução até o presente momento, tem sido em grande parte fomentada por legislações, tratados, regulamentos e medidas internacionais para a redução das emissões de gases de efeito de estufa, e com as últimas políticas de desenvolvimento sustentável.

Impulsionado pelo desenvolvimento da eletrónica, da computação e das baterias, os VEs começaram a ganhar mercado nos últimos 10 anos e já se mostram verdadeiramente competitivos. Os fortes representantes no mundo dos super-carros como a Mercedes SLS AMG E-Drive (Figura 2.2a), o Tesla Model S (Figura 2.2b), na gama dos carros de luxo, e outros como o Nissan Leaf (Figura 2.2c) na gama de carros para o quotidiano, mostram que o mercado é capaz de aceitar os modelos elétricos e que o seu crescimento é certo.



(a) 2013 Mercedes SLS AMG E-Drive



(b) 2012 Tesla Model S



(c) 2010 Nissan Leaf

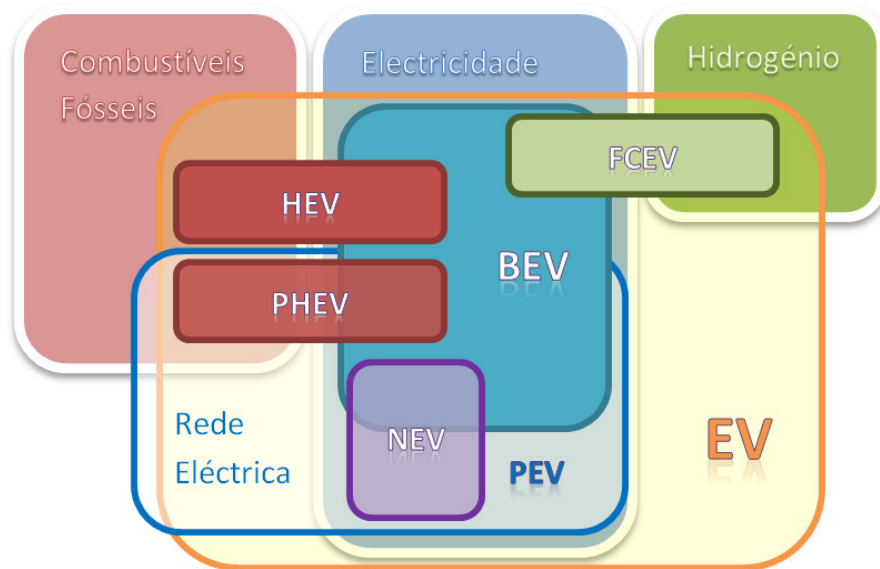
Figura 2.2: Carros elétricos de diferentes gamas disponíveis atualmente

## 2.2 Tipos de veículos elétricos

De acordo com a evolução tecnológica verificada nas últimas décadas e algumas perspectivas mais recentes, é possível dividir os VEs em função do seu tipo de alimentação, e tipo de tração (elétrica total ou parcial).



A Figura 2.3 apresenta uma possível organização dos diferentes tipos de veículos em função do tipo de energia utilizada na propulsão e/ou armazenamento de energia, e ainda se possuem ou não recarregamento pela rede. A designação de VE é ampla e engloba a totalidade dos “veículos rodoviários com propulsão eléctrica” (termo ainda não aprovado em Portugal)[24], isto é, cuja propulsão é baseada em motores eléctricos e, como tal, é necessário que tenha uma fonte ou um sistema de armazenamento de energia eléctrica.



- EV (*Electric Vehicle*) → Veículo eléctrico
- FCEV (*Fuel Cell Electric Vehicle*) → Veículo eléctrico a pilha de combustível
- BEV (*Battery Electric Vehicle*) → Veículo eléctrico a baterias
- PEV (*Plug-In Electric Vehicle*) → Veículo eléctrico de recarregamento pela rede
- NEV (*Neighborhood Electric Vehicle*) → Veículos eléctricos de proximidade
- HEV (*Hybrid Electric Vehicle*) → Veículo eléctrico híbrido
- PHEV (*Plug-In Hybrid Electric Vehicle*) → Veículo eléctrico híbrido de recarregamento pela rede

Figura 2.3: Diferentes tipos de VEs em função da(s) fonte(s) de energia usada(s) [51]

Dentro dos VEs sobressaem aqueles que utilizam as baterias para fornecer energia ao sistema de tração, e que podem ser recarregados pela rede eléctrica ou em andamento recorrendo a outros combustíveis, como é o caso dos veículos eléctricos híbridos e PHEV (gasolina ou gásóleo), ou dos VEs a pilhas de combustível (*Fuel Cells* - FC). No caso de VEs exclusivamente a baterias, existem diferentes gamas nas quais, pela sua reduzida autonomia, baixa velocidade e pequenas dimensões se destaca o VE de proximidade, conhecido por *Neighborhood Electric Vehicle* (NEV), essencialmente apropriado para fazer pequenos percursos urbanos de repetição diária. Gama essa em que se insere o projeto VEIL.

## 2.3 Fontes de energia para VEs

Atualmente existem diversas fontes de energia e essas são classificadas de acordo com as suas características de energia e potência específicas. Para o caso de VEs, levando em consideração as suas necessidades e princípios de funcionamento, as fontes elegíveis são: baterias, FCs, volantes de inércia, painéis fotovoltaicos, e supercondensadores (SCs). Para as baterias, diferentes químicas estão disponíveis no mercado (Figura 2.4), com diferenças significativas de preço, vida útil, preço e capacidade, sendo as mais comuns as de: íons de Lítio, chumbo (Pb), Níquel Cádmio e Hidretos Metálicos de Níquel (Ni-MH) [7, 9].

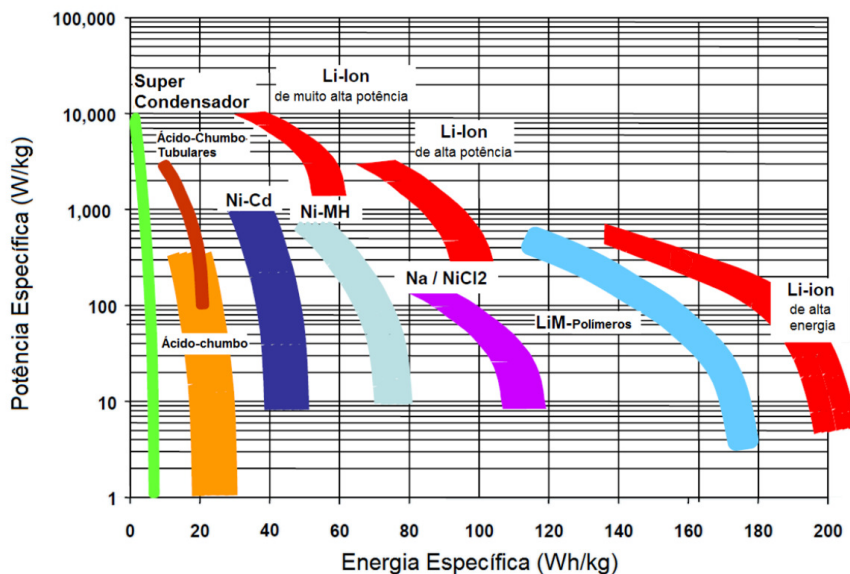


Figura 2.4: Comparação dos diversos sistemas de baterias, com valores ao nível da célula, incluindo SCs [17]

Um VE tendo apenas as baterias como fonte de energia, apesar de comum, não é o método mais estudado atualmente [50, 27, 4, 47, 49]. Com apenas uma fonte de energia, e considerando baixos custos associados a uma boa relação custo-benefício, ainda não é possível obter uma fonte com alto fator de energia e potência específica. Devido às questões mencionadas, os investigadores tem investido em associações de fontes. As hibridizações mais conhecidas são baterias/SCs, FC/SCs, FC/baterias e FC/baterias/SCs. As soluções envolvendo FC tem um grande impacto nos custos e ainda não estão completamente desenvolvidas. Nos dias de hoje, a opção de baixo custo para hibridização de fontes é a de baterias/SCs, o que a torna uma boa candidata para os pequenos VEs.

Ao longo de todo o texto, a referência ao VE considera apenas veículos com propulsão elétrica, alimentados por um sistema na qual a fonte principal é a bateria. Contudo, no estudo levado a cabo nesta dissertação, tendo como principal tema os VEs com múltiplas fontes de energia, recorreu-se à utilização de uma fonte secundária, nomeadamente, os SCs. De referir ainda que toda a energia obtida externamente ao veículo (recarregamentos) é primeiramente armazenada nas baterias, antes de ser distribuída os SCs.



# Capítulo 3

## Controlador

### 3.1 Topologia estudada

Da mesma forma que em aplicações AC os transformadores convertem níveis de tensão e correntes entre a entrada e a saída, os conversores DC/DC ou *choppers* permitem uma conversão semelhante, mas em DC. Nestes dispositivos, a conversão destas grandezas é efetuada através de semicondutores de potência, que são comutados a frequências elevadas (kHz), podendo ser designados como redutores (*buck*) ou elevadores (*boost*), consoante o seu modo de operação. É possível controlar a relação de conversão entre a entrada e a saída através da aplicação de uma onda quadrada modulada por largura de impulso, tipicamente designada por *Pulse Width Modulation* (PWM). Existem ainda circuitos *chopper* que operam em ambos os modos, redutor e elevador, designados por *buck-boost*, sendo este o tipo de circuito que foi utilizado como conversor DC/DC nesta dissertação. As suas capacidades de trabalho nos dois primeiros quadrantes classificam-no como um *chopper* de Classe C (Figura 3.1) [36].

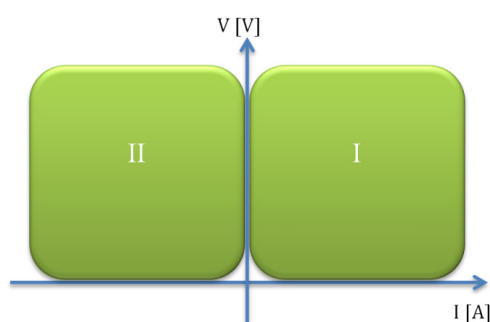


Figura 3.1: Quadrantes de funcionamento do conversor DC/DC reversível

Tendo como base a ideia de controlar independentemente as duas fontes (baterias e SCs) a serem utilizadas no VE, foi escolhida uma topologia com dois conversores conectados em paralelo, sendo um para cada fonte, como mostra a Figura 3.2. O braço do topo é alimentado pelas baterias e o outro é alimentado pelos SCs. Desta forma, estabeleceu-se um barramento central, designado por barramento comum, o qual deverá possuir uma tensão compatível com o VEV que irá alimentar o(s) motor(es) do VE em questão.

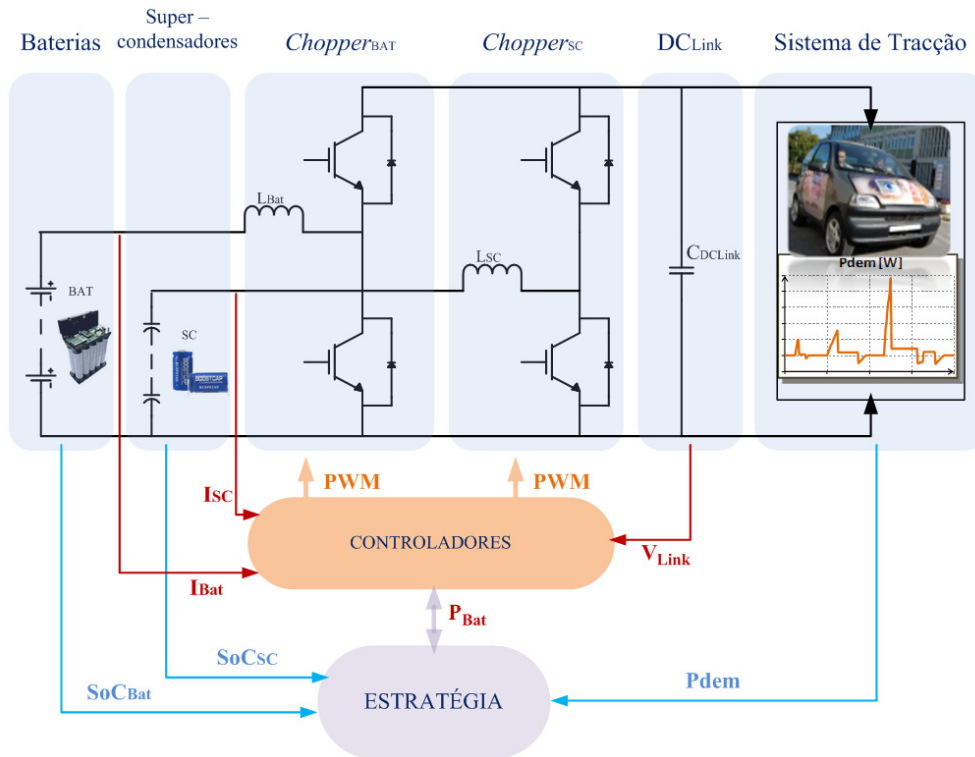


Figura 3.2: Arquitetura de gestão de energia num veículo com duas fontes [51]

Face às características e aos regimes de funcionamento da aplicação abordada nesta dissertação, optou-se pela utilização dos *Insulated Gate Bipolar Transistors* (IGBT) como interruptores de potência. Os IGBTs são dispositivos que combinam as vantagens dos *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor* (MOSFET) e dos *Bipolar Junction Transistors* (BJT). Assim, os IGBT possuem características como controlo por tensão, menor queda de tensão que os MOSFET, maiores velocidades de comutação que os BJT e necessitam de pouca energia para efectuar a comutação, podendo operar com potências e frequências elevadas [36].

## 3.2 Construção do modelo teórico

Cada conversor DC/DC é composto por dois IGBTs e uma bobina, além de um condensador no lado do barramento comum (Figura 3.3). Nestes conversores os elementos passivos têm funções determinantes no funcionamento do circuito, como é o caso da bobina que funciona como reservatório de energia para posteriormente ser libertada para uma das extremidades, caso funcione como *buck* ou *boost*, servindo ainda para controlar a oscilação da corrente fornecida pela fonte e minimizar os efeitos da elevada frequência de comutação [46]. A utilização do condensador serve para amenizar a oscilação de tensão causado pela comutação destes interruptores.

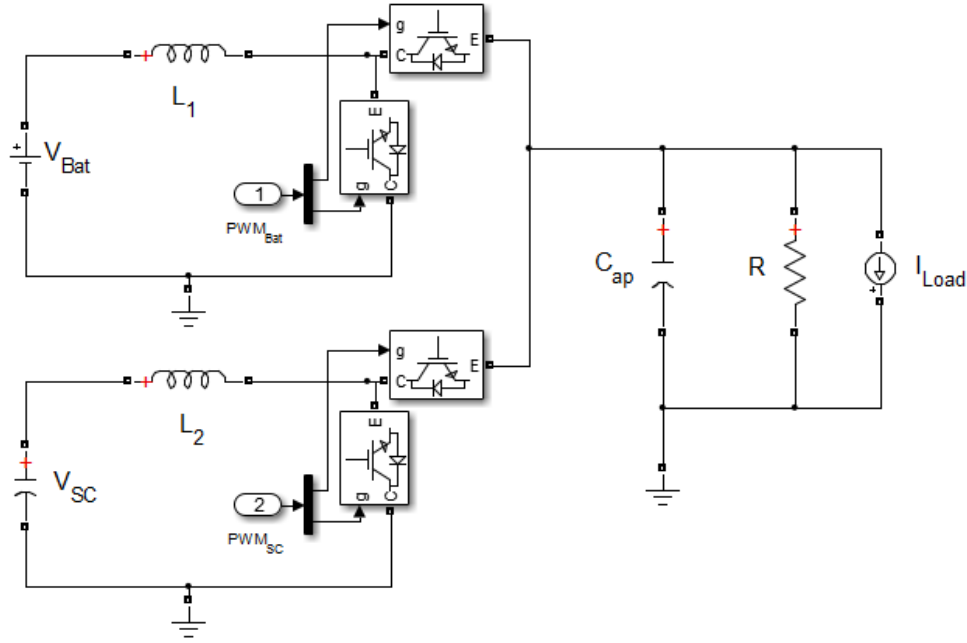


Figura 3.3: Esquema elétrico do sistema de gestão de energia do VE

O modelo da carga é composto por uma resistência e uma fonte de corrente variável que simula as acelerações/desacelerações do veículo. O conversor será responsável por subir as tensões de entrada e controlar o fluxo de energia em cada fonte. Seguindo a mesma abordagem que a de outros autores [8], o modelo de média (*average model*) foi usado para desenvolver a representação (3.1) em espaço de estados para este conversor.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\hat{u}_{Bat}/L_1 \\ 0 & 0 & -\hat{u}_{SC}/L_2 \\ \hat{u}_{Bat}/C_{ap} & \hat{u}_{SC}/C_{ap} & -1/RC_{ap} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1/L_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_2 & 0 \\ 0 & 0 & -1/C_{ap} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} I_{Bat} \\ I_{SC} \\ V_{Link} \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} V_{Bat} \\ V_{SC} \\ I_{load} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

As variáveis de estado estão contidas no vetor  $x$  (3.3), onde  $I_{Bat}$  e  $I_{SC}$  representam as correntes nas bobinas  $L_1$  e  $L_2$ , e  $V_{Link}$  é a tensão DC de saída no barramento.

As entradas exógenas do sistema estão no vetor  $u$  (3.3), onde  $V_{Bat}$  e  $V_{SC}$  são as tensões das fontes e  $I_{Load}$  é a corrente de carga variável. As medições feitas pelos sensores são os estados deste sistema, como indicado pela matriz  $C$  (3.3) e saída  $y$  (3.1).

O modelo (3.2) considera os seguintes parâmetros: a indutância associada às fontes ( $L_1$  e  $L_2$ ), a capacitância de saída ( $C_{ap}$ ), e a resistência ( $R$ ) que equivale a metade da potência máxima do sistema. O modelo possui *duty cycles* fixos,  $\hat{u}_{Bat}$  e  $\hat{u}_{SC}$ , que serão discutidos na próxima sub-seção.

### 3.2.1 Modelação do pequeno sinal

Os sinais  $PWM_{Bat}$  e  $PWM_{SC}$ , Figura 3.3, são os PWMs que serão gerados baseados num *duty cycle*, necessário para controlar o sistema. O modelo de média (3.1) tem apenas os estados  $V_{Bat}$ ,  $V_{SC}$  e  $I_{load}$  como entradas, sendo os *duty cycles* valores fixos. Para que o modelo se aproxima da realidade, estes valores fixos serão os valores médios de operação, comumente conhecido como ponto DC de operação (3.2), e uma matriz que permita o cálculo da variação de sinal em volta do ponto DC usando os *duty cycles* como entrada será construída [35]. Algumas suposições são feitas para a aproximação do ponto DC: tensão fixa no barramento DC ( $V_{Link}^*$ ) e tensões médias para as baterias ( $V_{Bat}^{\sim}$ ) e SCs ( $V_{SC}^{\sim}$ ).

$$\hat{u} = \begin{bmatrix} V_{Bat}^{\sim}/V_{Link}^* \\ V_{SC}^{\sim}/V_{Link}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{u}_{Bat} \\ \hat{u}_{SC} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Usando essas aproximações, e assumindo valor zero para  $I_{load}$ , o estado estacionário pode ser facilmente obtido (3.5). A fim de fazer uma boa separação resguardando a proporção das correntes, foi considerado que o desvio do valor médio estipulado das correntes no lado das baterias ou SCs depende unicamente do desvio de  $\hat{u}_{Bat}$  ou  $\hat{u}_{SC}$  (3.6). Do ponto de vista de controlo, essas suposições são suficientes para capturar a dinâmica entre as fontes.

$$X_{ss} = A^{-1}B \begin{bmatrix} V_{Bat}^{\sim} \\ V_{SC}^{\sim} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$B_{u_{Bat}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1/L_1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1/C_{ap} & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot X_{ss}, \quad B_{u_{SC}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/L_2 \\ 0 & -1/C_{ap} & 0 \end{bmatrix} \cdot X_{ss} \quad (3.6)$$

## 3.3 Controlador de tensão do barramento comum

As entradas do controlador são as referências de corrente nas baterias ( $I_{Bat}^*$ ) e a referência de tensão para o barramento ( $V_{Link}^*$ ). O objetivo é encontrar uma lei de controlo para  $u_{Bat}$  e  $u_{SC}$  que possa seguir as referências dadas pelo sistema de gestão de energia (EMS), com especial atenção à estabilidade da tensão no barramento comum. O controlador precisa ser de fácil sintonia para uma rápida adaptação em qualquer sistema de topologia semelhante, além de lidar com incertezas advindas do modelo.

### 3.3.1 Formulação do problema de controlo

Considerando que  $V_{Link}^*$  é fixo ao longo do tempo, o controlo para esta variável pode ser considerado como um problema de regulação.  $I_{Bat}^*$  varia ao longo do tempo, e teoricamente isto leva a um controlo do tipo *tracking* (seguimento). No entanto, construir um controlo baseado em seguimento significa ser necessário encontrar uma inversão estável para o sistema [40]. O problema em encontrar tal inversão é de extrema complexidade quando o modelo do sistema em consideração possui tantas não-linearidades. Por essas circunstâncias e considerando outros trabalhos nesta área [8, 37], é de salientar que apesar das variações no sinal de referência o controlo pode ser baseado num problema de regulação. A variável mais importante para este controlador é a regulação da tensão no barramento comum, que precisa ser mantida em volta da referência com não mais do que 3% de erro, e os transitórios não devem demorar mais do que 10ms [44].

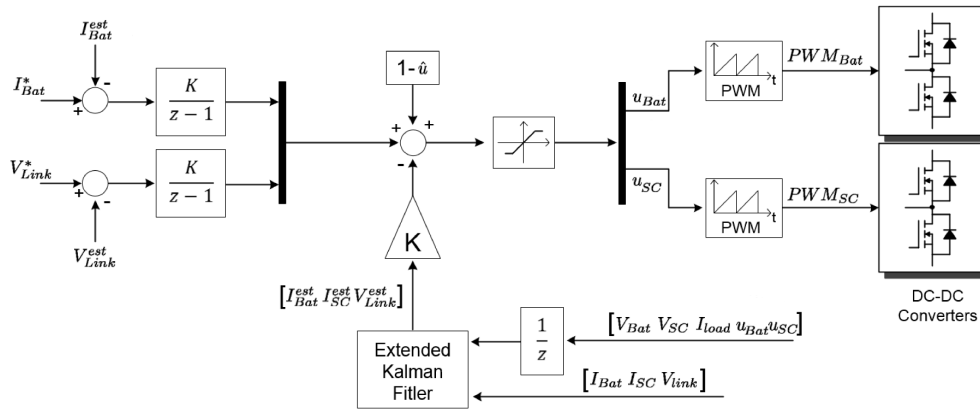


Figura 3.4: Arquitetura proposta para o controlador

O controlador proposto para este problema é apresentado na Figura 3.4. O controlador é baseado numa lei de realimentação de estado que minimiza a função custo do sistema dinâmico, de forma que os únicos parâmetros de configuração são factores de peso. Para encontrar os ganhos da realimentação, o método de solução utilizado é o do regulador linear quadrático, criado pelo matemático Rudolf Kalman em 1960 [26].

Um integrador para cada fonte foi adicionado para solucionar o problema de carga variável e eliminar incertezas associadas à linearização do modelo. Esses integradores seguem as referências e reduzem o erro de valor final. Considerando a possibilidade de inversão em todas as correntes (travagem regenerativa e carregamento dos SCs), os integradores são configurados isoladamente ao invés de considerar uma solução do tipo Regulador Quadrático Integrador (LQI). Para lidar com as incertezas nos sensores de corrente e filtrar os diversos tipos de ruídos naturais do sistema, um Filtro Estendido de Kalman (*Extended Kalman Filter* - EKF) [26] foi adicionado para estimar os estados, gerando entradas menos ruidosas para o controlador. Este tipo de sistema necessita de um controlador do tipo discreto.

### 3.3.2 Lei de Controlo

O sistema dinâmico linear mostrado em (3.1) é contínuo no tempo. Para projetar os ganhos do controlador, o sistema foi transformado em uma representação discreta no tempo como em (3.7). A matriz  $\Phi$  é a versão discreta da matriz  $A$  em (3.2), e  $\Gamma_u$  é a versão discreta dos vetores  $B_{u_{Bat}}$  e  $B_{u_{SC}}$  em (3.6). Também nessa representação os componentes do vetor  $u_k$  são os valores de *duty cycle* que desviam de  $\hat{u}$  (3.4). Dada uma lei de realimentação (3.8), é necessário encontrar a matriz  $K$  que leva o sistema para um vetor de estado zero. Esse problema pode ser resolvido pela solução do Regulador Linear Quadrático (*Linear Quadratic Regulator* - LQR), permitindo uma sintonia mais intuitiva do controlador pelo utilizador.

$$x_{k+1} = \Phi x_k + \Gamma_u u_k \quad (3.7)$$

$$u_k = -K x_k \quad (3.8)$$

O sistema é associado à uma função de custo  $J$  (3.9), e as matrizes  $Q_c$  e  $R_c$  são pesos associados aos estados e entradas, respectivamente. O ganho  $K$  é dado por (3.8), na qual é necessário ter a matriz  $P$  para se obter a solução. A matriz  $P$  é a solução para a Equação Algébrica de Riccati discreta [13].

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} (x_k^T Q_c x_k + u_k^T R_c u_k) \quad (3.9)$$

$$K = (R_c + \Gamma_u^T P \Gamma_u)^{-1} \Gamma_u^T P \Phi \quad (3.10)$$

É importante assegurar que apenas matrizes positivas definidas sejam utilizadas nas matrizes de peso, e com este propósito apenas matrizes diagonais foram utilizadas. De modo a iniciar o sistema de forma estável, os integradores precisam possuir as condições iniciais configuradas de acordo com a matriz  $K$  e condições iniciais dos estados. Para simplificar, de forma inicial o valor dos ganhos dos integradores é o mesmo utilizado nas condições iniciais. Alguns testes mostraram que esta é a melhor forma de manter a proporção e a velocidade de resposta condizente com os ganhos utilizados na matrizes de peso.

## 3.4 *Extended Kalman Filter*

Os sensores de corrente, especialmente os de efeito Hall por circuito aberto, possuem uma baixa relação sinal-ruído [32], situação que se agrava quando trabalham numa gama muito abaixo da corrente nominal. O maior problema encontrado neste tipo de projeto é a amplitude da variação entre corrente máxima e a corrente nominal, a ponto do sensor ter de ser sobre-dimensionado e funcionar a maior parte do tempo abaixo do seu ponto ótimo, acabando por resultar em problemas de medições devido ao ruído. Por exemplo, os

sensores de corrente necessários para os SCs do veículo em estudo nesta dissertação deverão ser dimensionados para suportar uma corrente de pico da ordem dos 300A, enquanto que a corrente média não ultrapassa os 50A.

Ainda que existam sensores para esta aplicação disponíveis no mercado, seu custo pode ultrapassar 2 a 5 vezes o valor de um sensor clássico sobre-dimensionado também capaz de executar essas medições. Para aumentar a qualidade das medições e evitar a presença de ruído nos sinais de controlo, um EKF foi implementado.

O EKF é a versão para sistemas não lineares do Filtro de Kalman, que usa medidas passadas dos sensores e resultados de uma predição baseada num modelo para produzir estimações precisas das variáveis associadas aos sensores de corrente. Normalmente, o uso dos estados estendidos leva uma realimentação de ganho unitário junto à perturbação estimada, a qual ajuda a eliminar perturbações que podem ocorrer nos sinais de entrada. O problema em utilizar essa metodologia é que este sistema possui muitas não linearidades associadas à utilização de duas fontes, fazendo com o que o EKF não consiga diferenciar perturbações na entrada de não linearidades do modelo [56]. Neste trabalho, os estados estendidos foram usados apenas para ajudar a estimar as não linearidades e não foram realimentados no controlo. Por outras palavras, a habilidade de prever perturbações nas entradas foi perdida. As equações (3.11) e (3.12) descrevem o algoritmo EKF utilizado.

#### Predição

$$\begin{aligned}\hat{X}_{k|k-1} &= \Phi_a X_{k-1|k-1} + \Gamma_a U_{k-1} \\ P_{k|k-1} &= \Phi_a P_{k-1|k-1} \Phi_a^T + Q_k\end{aligned}\tag{3.11}$$

#### Atualização

$$\begin{aligned}S_k &= C_a P_{k|k-1} C_a^T + R_k \\ K_k &= P_{k|k-1} C_a^T S_k^{-1} \\ \hat{X}_{k|k} &= \hat{X}_{k|k-1} + K_k \cdot (y_k - C_a \hat{X}_{k|k-1}) \\ P_{k|k} &= (I - K_k C_a) P_{k|k-1}\end{aligned}\tag{3.12}$$

O filtro é dividido em dois passos e usa como entradas as medições atrasadas dos sensores e os *duty cycles*. As matrizes  $Q_k$  e  $R_k$  são as covariâncias do modelo e as covariâncias das medidas dos sensores, respectivamente. As matrizes  $\Phi_a$  e  $\Gamma_a$  são as versões discretas e estendidas das matrizes  $A$  e  $B$  em (3.2), da mesma forma  $U$ ,  $X$  e  $C_a$  são as versões estendidas de  $u$ ,  $x$  e  $C_a$  em (3.3). O novo sistema estendido contém cinco estados e cinco entradas: os novos estados são referidos como perturbações e as novas entradas são dadas pela matriz  $\Gamma_u$  (3.7).

Com o controlador desenvolvido e o modelo construído, o sistema deve ser testado em ambiente de simulação, esperando encontrar resultados condizentes com a teoria estudada. Para tal, o simulador será implementado em ambiente Matlab/Simulink e fará uso do recurso a ferramenta SimPowerSystems para estimar não linearidades do sistema elétrico. Todas as variáveis serão escolhidas tendo o projeto VEIL como base de medida.



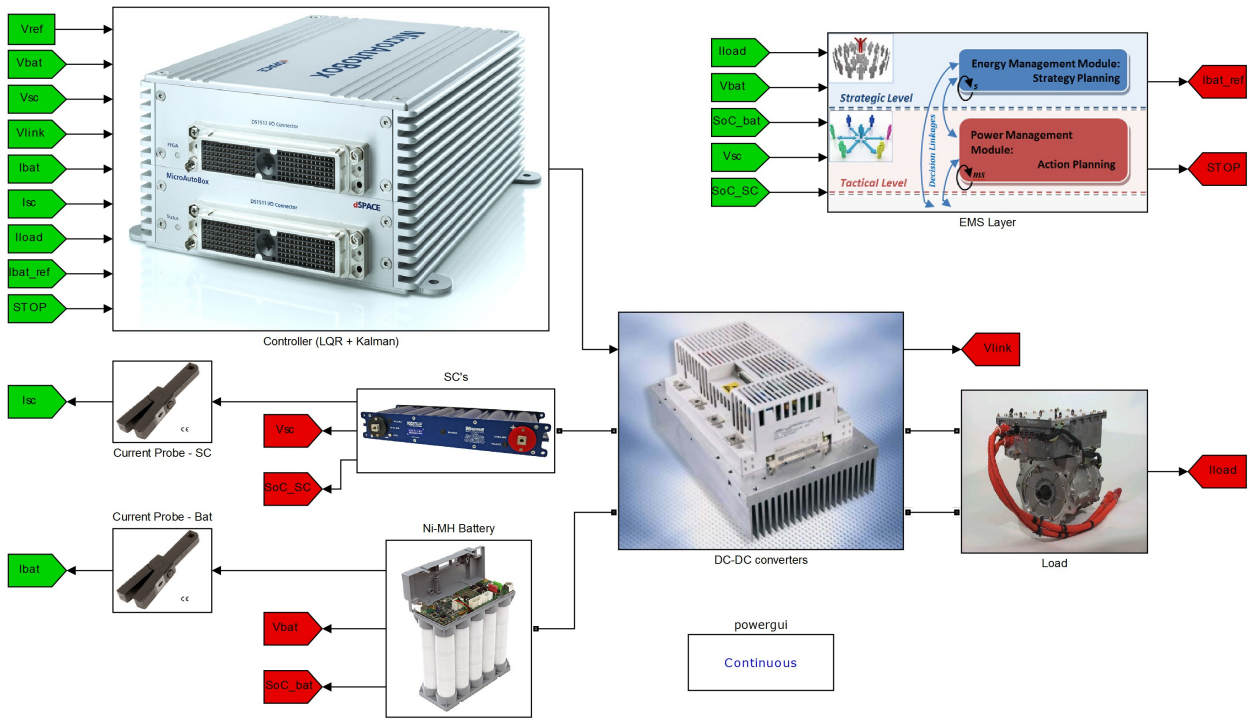


Figura 3.5: Esquema global do modelo em Simulink

### 3.5 Implementação em Matlab/Simulink

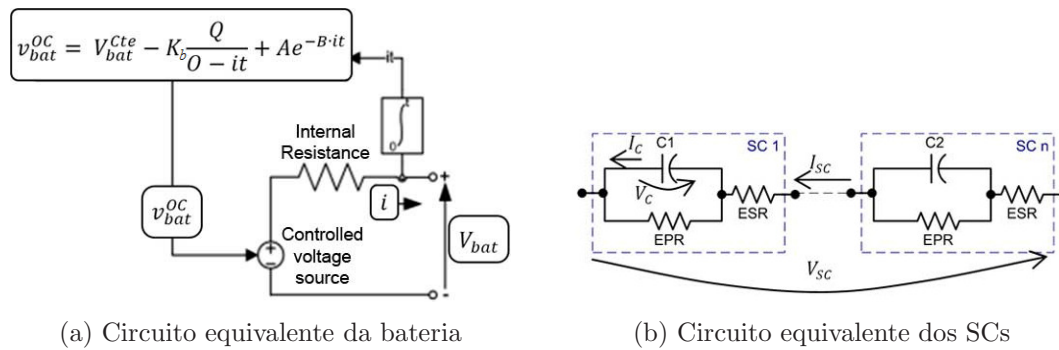


Figura 3.6: Modelo utilizado para simular as fontes de energia [50]

A Figura 3.5 ilustra um esquema global do modelo do VE de dupla fonte sendo simulado no ambiente Matlab/Simulink. Neste modelo existem oito blocos principais: dois blocos para os sistemas de armazenamento de energia (baterias e SCs), o bloco do conversor DC/DC, um bloco para a simulação de carga, dois blocos para os sensores de corrente, o bloco da camada de gestão de energia e o bloco do controlador. Estes blocos foram conectados com ligações para o sistema de potência (conexões marcadas por um quadrado) e ligações para os sinais de controlo (marcados por uma seta). Os sensores de corrente foram emulados com a adição de ruído branco nas medições, por forma a se contemplar o que poderá acontecer na realidade. O Simulink possui um bloco específico para criar ruído branco em tempo discreto equivalente ao de tempo contínuo, desde que respeitada uma correta configuração.



Neste capítulo, a camada de gestão de energia é apenas representativa e suficiente para o teste do controlador e do simulador. A referência de potência das baterias é carregada a partir de uma técnica de filtragem previamente executada tendo como base no ciclo de condução a ser utilizado nas simulações.

Tabela 3.1: Características do banco de baterias (módulos SAFT VH 12V) [42]

Variável	Símbolo	Valor	Unidade
Potência	$P_{Bat}$	[-5.8, 5.8]	kW
Tensão de circuito aberto	$V_{Bat}^{OC}$	Função do $SoC_{Bat}$	V
Tensão constante	$V_{Bat}^{Cte}$	104.24	V
Tensão polarizada	$K_b$	0.0275	V
Amplitude exponencial da tensão	$A$	9.034	V
Constante de tempo exponencial inversa	$B$	0.556	Ah <sup>-1</sup>
Capacidade nominal @2C	$Q_{Bat}^{Ref}$	25	Ah
Resistência interna	$R_i$	0.0356	$\Omega$
Baterias em série	$N_{Bat}$	8	-
Bancos em paralelo	$n_{Bat}$	2	-

Tabela 3.2: Características do banco de SCs (módulos Maxwell BMOD0330) [33]

Variável	Símbolo	Valor	Unidade
Capacitância	$Cap_{SC}$	132	F
Potência	$P_{SC}$	[-90, 90]	kW
Tensão de circuito aberto	$V_{SC}^{OC}$	Função do $SoC_{SC}$	V
Limites de SoC	$SoC_{SC}$	[0.4, 1]	-
Resistência em série equivalente	ESR	15.5	m $\Omega$
Resistência em paralelo equivalente	EPR	5.5	k $\Omega$
Tensão mínima de circuito aberto	$V_{SC}^{OCmin}$	0	V
Queda de tensão sem carga	$\delta_{SC}$	81	V
Capacidade nominal @1C	$Q_{SC}^{Ref}$	3.706	Ah
Corrente nominal	$I_{SC}^{Ref}$	1209.88	A
Módulos em série	$N_{SC}$	5	-
Bancos em paralelo	$n_{SC}$	2	-

O bloco de bateria existente na biblioteca SimPowerSystems implementa um modelo genérico configurável (Figura 3.6a) capaz de representar os modelos mais populares de baterias recarregáveis. Neste sistema proposto, foram utilizados dois bancos de baterias NiMH (Table 3.1) com 96 V de tensão nominal. Os SCs simulados seguem as especificações do módulo MAXWELL BMOD0330 com 16 V de tensão nominal por módulo, as características do banco resultante estão descritas na Tabela 3.2 e o modelo utilizado para simulações é mostrado na Figura 3.6b.

Embora existam modelos matematicamente mais precisos para a modelização de baterias e SCs, a forma simplificada utilizada neste trabalho é suficiente para analisar e simular o problema de hibridização de fontes [50].

Tabela 3.3: Parâmetros nominais do sistema

Variável	Símbolo	Valor	Unidades
Frequência de chaveamento	$f_s$	20	kHz
Taxa de amostragem do controlador	$h$	50	$\mu s$
Capacitância do barramento comum	$Cap$	1	mF
Indutância das bobinas	$L_1/L_2$	1.35	mH
Tensão de referência do barramento comum	$V_{Link}^*$	325	V
Potência do ruído branco	$P_n$	$2 \times 10^{-3}$	-

Os parâmetros nominais do sistema são mostrados na Tabela 3.3. Os parâmetros de performance para o controlador são dados em (3.13) e as matrizes de covariâncias do EKF são dadas em (3.14), onde  $diag(\cdot)$  significa matriz diagonal.

$$\begin{aligned} Q_c &= diag([0.04, 0.04, 1]) \\ R_c &= diag([10000, 10000]) \end{aligned} \tag{3.13}$$

$$\begin{aligned} Q_k &= diag([5, 5, 10, 1, 1]) \\ R_k &= diag([2000, 2000, 1]) \end{aligned} \tag{3.14}$$

### 3.6 Resultados das simulações

Para validar o controlador LQR e o EKF separadamente, três simulações com fases típicas de funcionamento de um veículo (parado, aceleração e travagem regenerativa) foram consideradas. O primeiro e o segundo mostram os resultados para o LQR sem e com ruído, respectivamente. No terceiro caso, o EKF é acrescentado com intuito de filtrar o ruído. Uma simulação final foi executada utilizando uma porção de um ciclo de condução normalizado como carga. As transformações de velocidades em potência elétrica foram feitas a partir de suposições já validadas em outros trabalhos [50].

O ciclo de condução escolhido foi o Artemis na versão urbana, isto porque é o que possui uma densidade espectral de mais elevada magnitude entre os ciclos comumente utilizados (ver Figura 3.7), tornando este um ótimo candidato para teste do controlador [8]. A porção selecionada (de 805s a 1025s do ciclo original) representa um tráfego congestionado e lento [3], um dos piores cenários para manter a estabilidade no barramento comum.

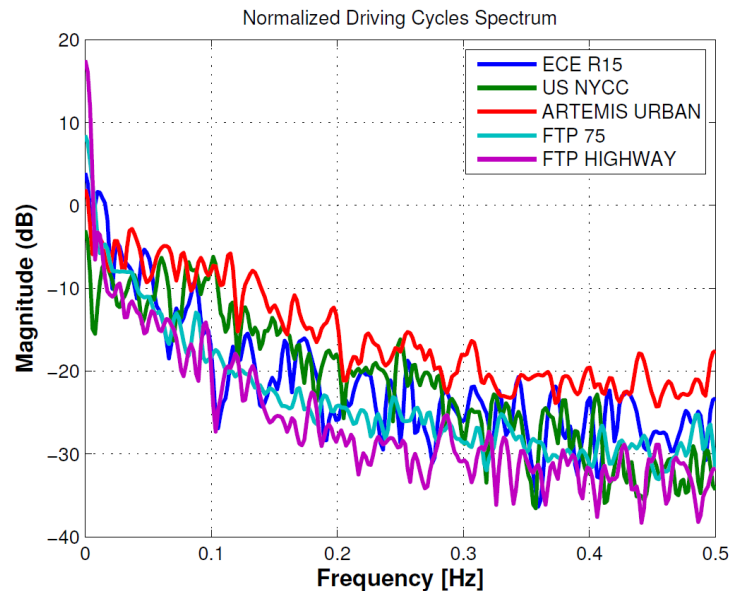


Figura 3.7: Espectro normalizado dos ciclos de condução

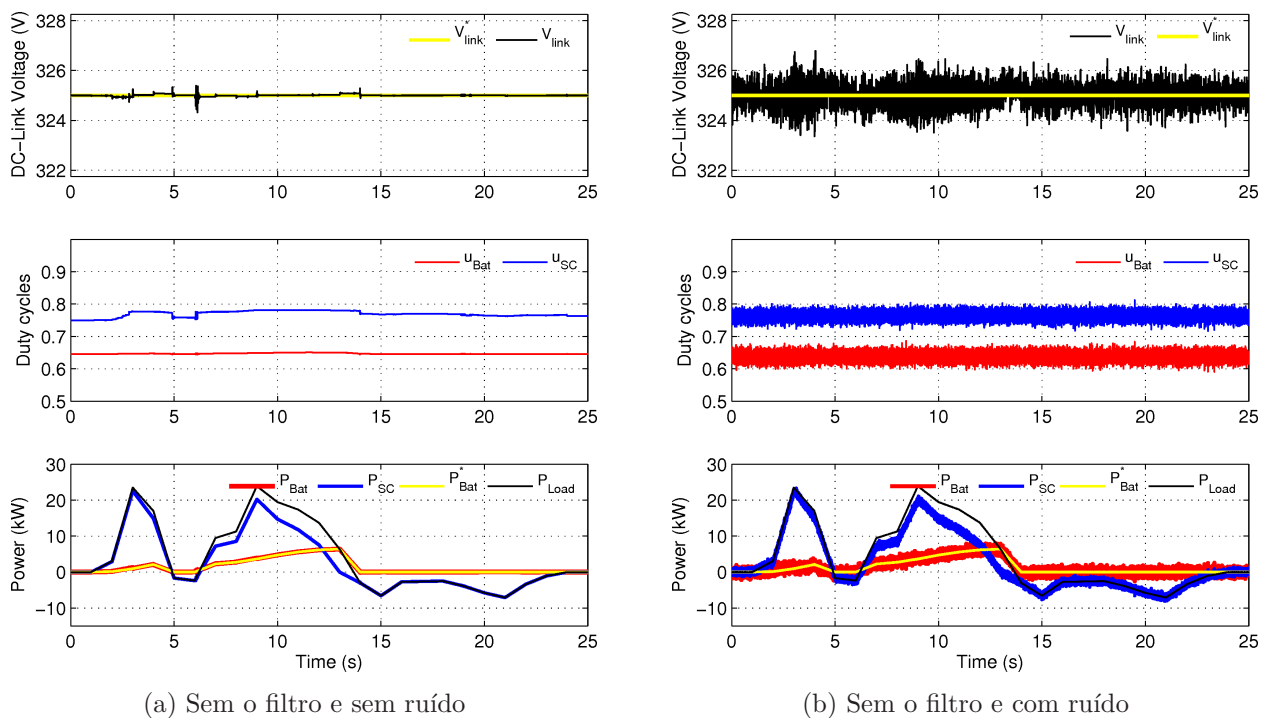


Figura 3.8: Simulação das fases típicas de funcionamento de um veículo

### 3.6.1 Fases típicas de funcionamento de um veículo

Simular o sistema sem o EKF e sem considerar ruído nos sensores resulta em uma alta estabilidade no barramento comum, sem grande esforço requerido às entradas, como se mostra através da Figura 3.8a. A tensão no barramento comum oscila não mais do que 0.2% do valor de referência, sem demonstrar transitórios significativos. Os *duty cycles* alteram-se de forma suave de acordo com as necessidades, e as potências requeridas às baterias seguem as referências estipuladas pela camada de gestão.

Embora as correntes envolvidas na simulação sejam de amplitude superior às utilizadas no modelo para configurar os ganhos do controlador, o sistema e seu controlador respeitam adequadamente demonstrando um excelente comportamento e validando o projeto do controlador. Estes resultados também comprovam que os integradores estão bem sintonizados entre si e a matriz  $K$ .

A simulação com ruído nos sensores de corrente e mantendo o EKF desligado (Figura 3.8b) mostrou que o controlador continua mantendo a estabilidade do sistema, regulando a tensão no barramento comum e sendo capaz de seguir as referências de corrente. No entanto, o esforço do controlador é muito alto e algumas pequenas mudanças no ganho foram necessárias para que o sistema mantivesse um bom desempenho. Se um ruído deste tipo aparecer nos sensores sem uma devida filtragem, o sistema pode sofrer problemas, tais como a perda de eficiência global associada com fluxos de correntes desnecessários, redução do tempo de vida das baterias devido ao stress, e dificuldades na estimação de variáveis que dependem diretamente das medidas ruidosas.

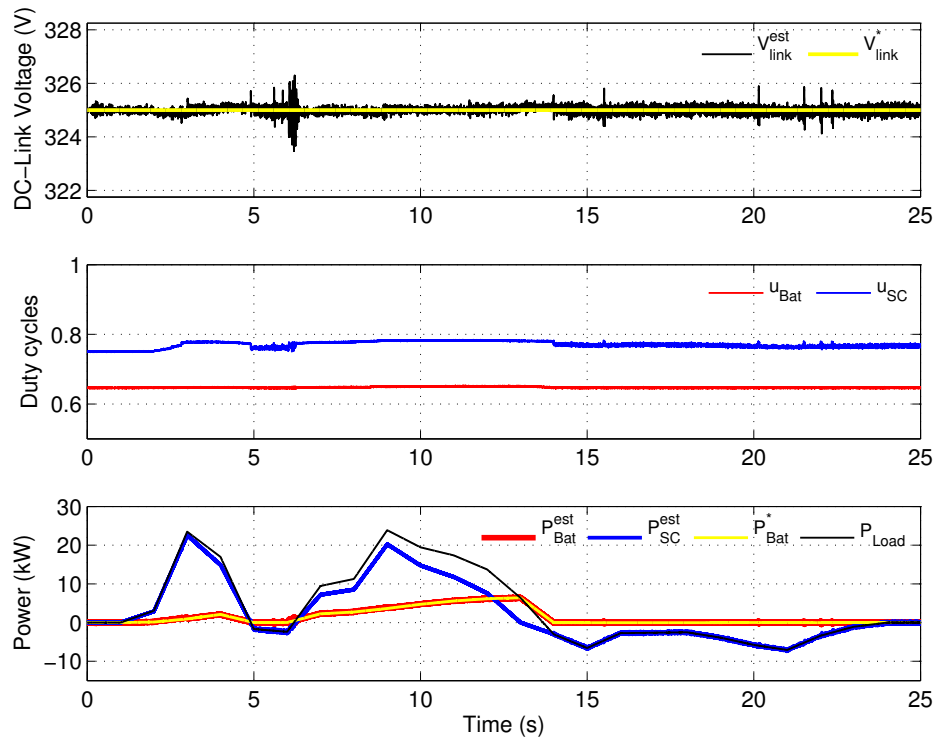


Figura 3.9: Simulação com filtro no controlo e ruído nos sensores

Após a introdução do EKF no sistema com ruído, melhores resultados puderam ser obtidos em relação à estabilidade de todas as variáveis envolvidas, como pode ser observado na Figura 3.9. O baixo esforço do controlador pode ser visto na evolução dos *duty cycles* e confirmado pela melhor estabilidade da tensão no barramento comum ( $V_{Link}$ ). A potência solicitada às fontes apresenta uma variação que permite verificar fases de funcionamento como acelerações e travagens, e exceto por alguns picos instantâneos (aos 6s), o EKF não evidencia dificuldades em manter a consistência nas medições estimadas.

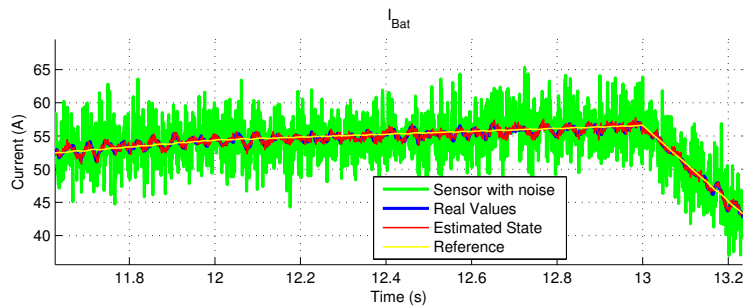


Figura 3.10: Estudo comparativo entre correntes das baterias

Ao comparar a corrente estimada das baterias com os valores reais e os valores ruidosos, Figura 3.10, é possível observar a corrente filtrada muito próxima dos valores reais, o que demonstra a grande vantagem do EKF. Embora estes resultados variem levemente conforme a potência do ruído, configuração do EKF e desvio entre a corrente média utilizada no modelo e correntes extremas na simulação, é possível afirmar que este filtro garante grandes vantagens para o sistema. Quando comparado a um simples filtro passa-baixa, a mais-valia do EKF é a sua adaptabilidade ao longo do tempo, por ser baseado na fusão de sensores com estados estimados a partir das entradas. Este é capaz de filtrar ruídos de baixa frequência ao mesmo tempo que mantém transitórios de alta frequência. Os resultados de simulação demonstram que além do controlador, todo o simulador desenvolvido em ambiente Matlab/Simulink atingiu os objetivos propostos a serem simulados, sendo assim possível inserir ciclos mais extensos para testar a exaustivamente o controlador.

### 3.6.2 Ciclo de condução normalizado Artemis

Após a validação do controlador e simulador proposto, uma simulação mais longa foi feita para procurar eventuais problemas que poderiam estar relacionados com a oscilação das tensões ao longo do tempo, especialmente a tensão nos SCs. A Figura 3.11 mostra os resultados obtidos neste teste, o qual foi efetuado utilizando um trecho (de 805s a 1025s) do ciclo Artemis Urban como referência de carga. Mesmo com as mudanças nas tensões e maiores amplitudes de corrente (Figura 3.12), o esforço do controlador e os estados estimados continuaram consistentes, mantendo as transições suaves nos *duty cycles*, e nenhum problema ou pico anormal de corrente ou tensão foi notado.

Através destes testes, é possível afirmar que o controlador possui um bom comportamento para as mais adversas situações resultantes da circulação de um VE em ambiente urbano, oferecendo um bom compromisso entre velocidade de resposta e imunidade a ruídos. Desta forma, o próximo passo pode ser dado, a fim de desenvolver a camada de gestão de energia que irá definir as referências para este controlador, tendo a garantia de que essas serão seguidas com erros muito baixos.

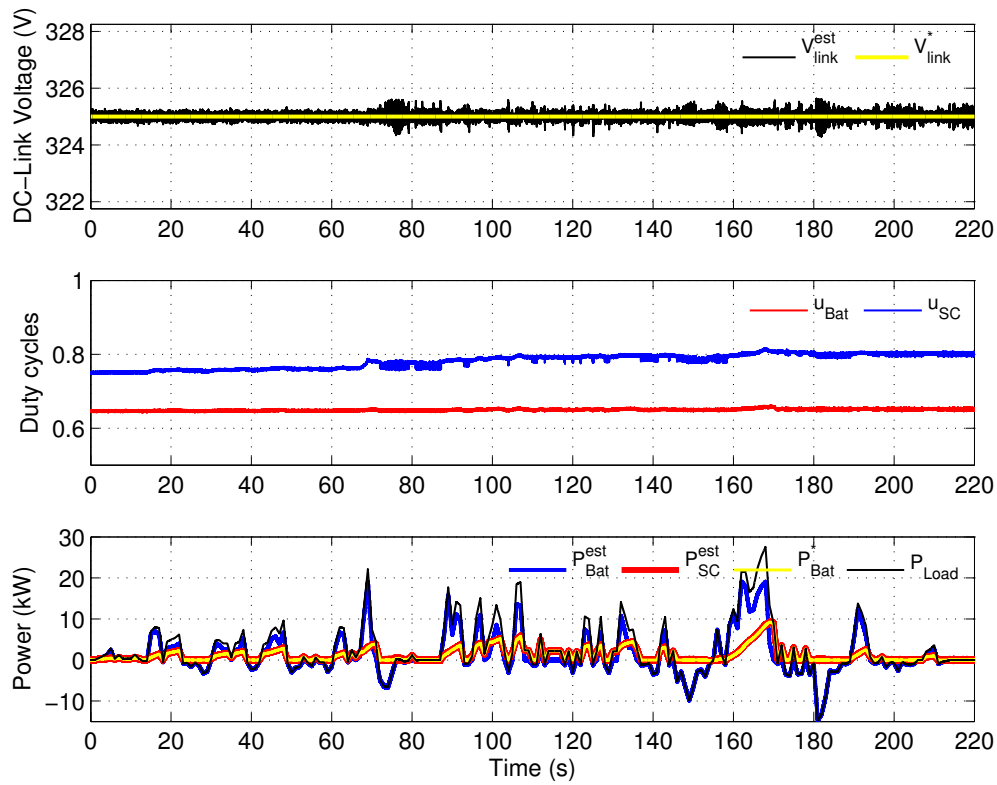


Figura 3.11: Tensão do barramento, *duty cycles* e potências para o ciclo de condução

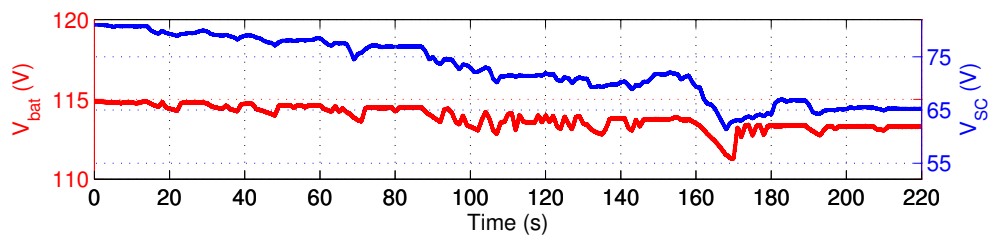


Figura 3.12: Tensões das fontes para o ciclo de condução

# Capítulo 4

## Gestão de múltiplas fontes

A implementação de um sistema de alimentação com recurso a múltiplas fontes de energia, implica o desenvolvimento de um sistema de gestão que optimize o fluxo de potência entre as fontes e o(s) motor(es). Essa gestão deverá ser feita com intuito de maximizar a autonomia do veículo e a vida útil das fontes embarcadas, garantindo uma ampla utilização da capacidade instalada no veículo, 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.

De uma forma mais global, o problema da gestão de múltiplas fontes de energia em VEs é referido atualmente na literatura através de duas abordagens distintas [6, 43, 10]:

- Estratégias de controlo baseadas em regras dependentes do modo de operação do VE;
- Estratégias baseadas em técnicas de otimização.

Os métodos de gestão por estratégias de otimização subdividem-se em métodos de otimização global e otimização em tempo real. Tipicamente, os primeiros são essencialmente usados em trabalhos de simulação (envolvendo grande esforço de computação), cuja principal utilidade centra-se na avaliação do desempenho de algoritmos de gestão de energia. Estes métodos produzem soluções ótimas globais quando são conhecidos os ciclos de condução (sistema não causal) e, especialmente, os seus requisitos em termos de energia e de potência. A garantia de se obter uma solução ótima global somente se verifica nesse pressuposto. No entanto, os métodos de otimização em tempo real, aos quais se referem alguns trabalhos, permitem o reajuste automático dos objetivos principais durante a sua utilização. Assim, na adaptabilidade de problemas de otimização à gestão de energia de múltiplas fontes em VEs, as restrições são basicamente impostas pelos limites físicos dos dispositivos de armazenamento (baterias e SCs) e pela monitorização contínua dos níveis de SoC [18].

Portanto, na procura por metodologias de gestão que produzam soluções ótimas globais ou, na sua impossibilidade, que se aproximem do ótimo, verifica-se alguma tendência para a fusão de métodos determinísticos com métodos estocásticos ou, de uma forma mais prática, métodos baseados em regras associados à aplicação de algoritmos de otimização mais evoluídos.

## 4.1 Descrição do problema

A formulação do problema de gestão de energia em VEs com múltiplas fontes baseia-se fundamentalmente em três objetivos indispensáveis para um correto funcionamento, maximizando sobretudo a utilização da fonte que melhor se adapta às necessidades energéticas do sistema de tração, em resposta aos requisitos do condutor e do percurso. Os objetivos para este são: o Planeamento de Longo-Prazo (gestão de energia), responsável pela definição de uma estratégia de gestão global para produzir um conjunto de diretrizes a considerar nas decisões dos níveis inferiores de gestão; o Planeamento de Curto-Prazo (gestão de potência), cuja principal função é definir um plano de ação que levará o nível seguinte a produzir os sinais de referência para controlar e realizar as tarefas de execução; e, finalmente, a Execução Imediata (controlo de operações), o qual já foi amplamente discutido no capítulo anterior.

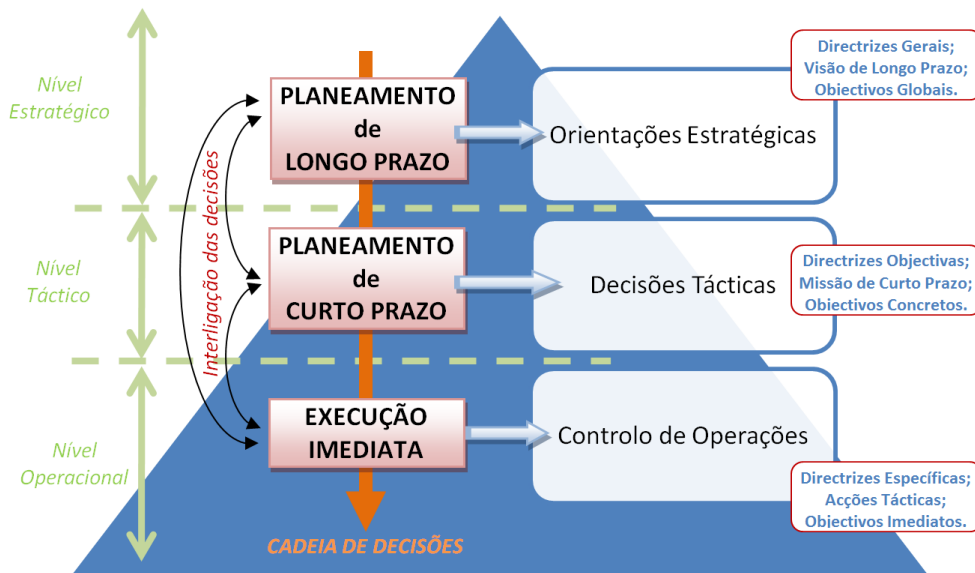


Figura 4.1: Diferentes camadas de controlo e gestão [51]

Um esquema mais detalhado desta hierarquia pode ser visto na Figura 4.2. Assim, usando uma abordagem *top-down*, o primeiro objetivo foi definir uma estratégia global e por conseguinte as diretrizes e restrições que limitam o espaço de decisão do segundo nível de gestão, para só então chegar à função de custo a ser otimizada no Planeamento de Curto-Prazo.

Como acontece atualmente nos VEs com uma única fonte, a sua evolução para sistemas com múltiplas fontes terá nas baterias a sua principal fonte de energia e, portanto, o objetivo fundamental do sistema global de gestão deve assentar na maximização do estado de carga das baterias no final de cada percurso, tendo em mente a suavização dos picos da corrente fornecida. Isto levará a uma utilização repetitiva de uma segunda fonte (e.g. SCs) para responder aos picos de potência durante as fases de tração e armazenar a máxima quantidade de energia durante as fases de desaceleração e de travagem do veículo, fase essa que pode desempenhar um papel importante no aumento do alcance do VE [48, 52, 41].



Estas questões levam a que, a cada instante, o nível do estado de carga dos SCs esteja num valor que possibilite, por um lado, o auxílio das baterias no modo de tração, e por outro, o armazenamento da maior parte da energia produzida pelo motor durante a travagem do veículo, dentro dos limites especificados na conceção do mesmo.

Ainda mais importante que estes fatores secundários é o correto balanceamento entre as fontes e o atuador. Para este balanceamento equacionado não é necessário considerar as perdas na conversão, pois os sinais gerados na camada de gestão servem apenas para alimentar uma referência de potência no controlador, e desde que bem reguladas não interferem em outras tarefas de maiores prioridades, como por exemplo a estabilidade do barramento comum. Mesmo assim, sem uma informação correta deste, ficaria impossível prever se cada fonte obedece aos seus limites. Sendo assim, deve-se ter em conta a operação mais básica do gestor de energia, definida em (4.1) para qualquer instante  $t$ ,

$$P_{dem}(t) = \sum_{j \in \{bat, SC\}} P_j(t), \quad \forall t \quad (4.1)$$

na qual  $P_{dem}(t)$  representa a potência solicitada ou enviada (sinal negativo) pelo sistema de tração às fontes de energia do veículo e  $P_j(t)$  a potência de cada fonte  $j$ , com  $j \in \{bat, SC\}$ .

A equação (4.1) possui os seus limites definidos de acordo com a capacidade das fontes de energia, tal restrição pode ser construída da forma vista em (4.2).

$$|P_j(t)| \leq P_j^{max}(t), \quad j \in \{bat, SC\}, \quad \forall t \quad (4.2)$$

A formulação dos limites considera a potência máxima que as fontes podem receber igual a potência máxima do que elas podem fornecer. Para os SCs isto pode ser verdade, mas a dinâmica das baterias não permite tal afirmação. No entanto, é possível fazer esta simplificação pois a potência fornecida ou recebida por cada fonte será função de uma constante  $C_j(t)$ , que expressará a proporção da potência máxima a ser utilizada em cada instante de tempo, conforme apresentado em (4.3),

$$P_j(t) = C_j(t) \cdot P_j^{max}(t), \quad C_j(t) \in [-1, 1], \quad j \in \{bat, SC\}, \quad \forall t \quad (4.3)$$

sendo que valores positivos de  $C_j(t)$  indicam que a fonte  $j$  fornece energia para o sistema, isto é, descarrega, e valores negativos indicam que a fonte  $j$  absorve energia, ou seja, carrega.

Sendo assim, para minimizar a diferença entre a potência solicitada pelo sistema de tração,  $P_{dem}$ , e a potência de cada fonte,  $P_j$ , a cada intervalo de tempo  $k$ , o primeiro objetivo é computar (4.4).

$$arg \min_{C_j[k], j \in \{bat, SC\}} \left| P_{dem}[k] - \sum_{j \in \{bat, SC\}} C_j[k] \cdot P_j^{max}[k] \right|, \quad \forall k \in \{1, \dots, N\} \quad (4.4)$$

Dessa forma, dois problemas diferentes foram especificados, sendo um deles definir os limites aceitáveis para  $C_j$  e com isso encontrar a melhor solução para (4.4) respeitando estes limites.

A definição dos limites de  $C_j$  é trabalho da hierarquia superior do sistema de gestão, ou seja, o planeamento estratégico que irá ditar a gestão de energia. Este problema foi resolvido recorrendo a uma abordagem de regras, baseadas em conhecimentos empíricos do modelo de veículo a ser utilizado. A camada inferior da gestão, o planeamento da ação responsável pela gestão de potência, fará a otimização de uma função que englobe e obedeça estes limites baseando-se no problema a resolver (4.4). Para executar o planeamento nesta camada, uma abordagem meta-heurística ajustada a esta tarefa foi utilizada, tal como apresentado na Figura 4.2.

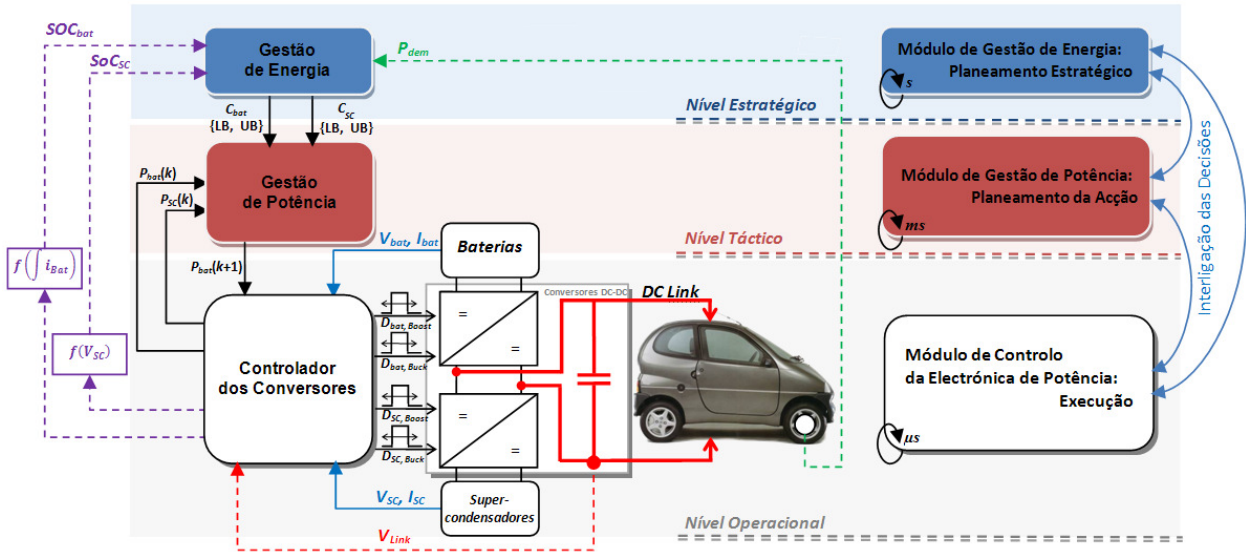


Figura 4.2: Sistema de Gestão de Energia

## 4.2 Restrição dinâmica do espaço de pesquisa

A principal vantagem de se utilizarem abordagens de gestão de energia baseadas em regras é a sua facilidade e simplicidade de implementação, exigindo baixíssimas capacidades de processamento. As regras são essencialmente obtidas com base na intuição, experiência humana, e até mesmo em alguns modelos matemáticos ou heurísticas, e podem ser suportadas por um conhecimento antecipado do ciclo de condução.

A consideração da existência de um dimensionamento prévio das fontes a utilizar num VE com uma estrutura de alimentação hibridizada, possibilita um conhecimento eficaz e pormenorizado das mesmas. Esse fato ajuda a definir um conjunto de regras básicas às quais a camada inferior de gestão deverá obedecer. O conjunto de regras irá determinar os limites mínimos  $LB_j$  e máximos  $UB_j$  para cada  $C_j$  em cada fonte  $j$ , ou seja,  $C_j \in [LB_j, UB_j]$ , tal como em trabalhos anteriormente apresentados [51]. Estes limites serão atualizados periodicamente a uma taxa de 500ms, e a este processo será dado o nome de “restrição dinâmica do espaço de pesquisa”. Essas restrições são baseadas no SoC de cada fonte e no nível de potência que o sistema solicita ou envia para as fontes.

O veículo pode ter suas situações de movimento divididas em: parado, acelerando (alta ou baixa aceleração), velocidade constante e desaceleração (incluindo a travagem regenerativa). A partir desta decomposição, cada movimento pode se tornar parte de um subgrupo de determinada prioridade. De forma intuitiva as prioridades e cada situação associada ficaram dispostas da seguinte forma:

- **Prioridade Alta:** baixos valores de  $SoC_j$ ; alto valor de  $SoC_{SC}$ ;
- **Prioridade Baixa:** aceleração; travagem regenerativa; velocidade constante; e veículo parado

Essas regras foram implementadas com recurso a estruturas básicas de lógica, nomeadamente, *If* e *Then*, e tem como entrada os parâmetros:  $SoC_j$ ,  $P_j$  e  $P_{dem}$ . Um fluxograma que resume as regras adoptadas e suas respectivas decisões pode ser visto na Figura 4.3.

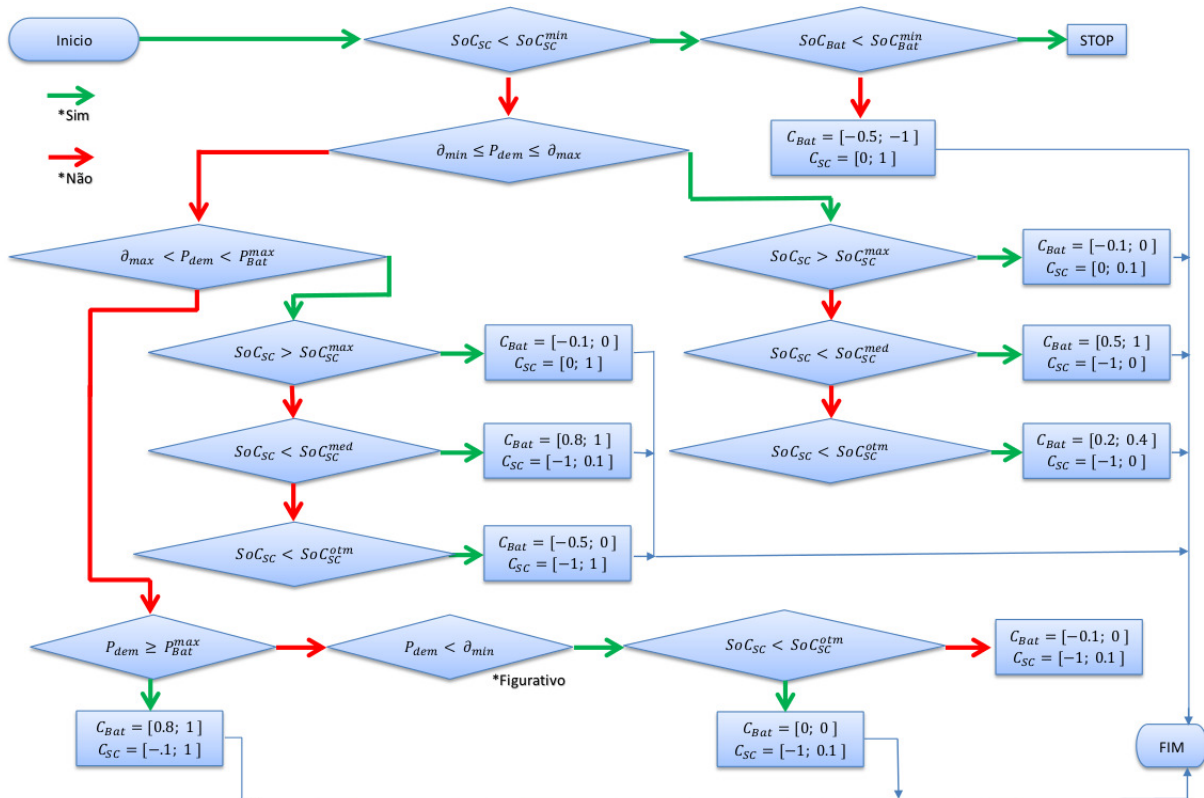


Figura 4.3: Fluxograma representativo das restrições dinâmicas do espaço de pesquisa

No fluxograma da Figura 4.3, as variáveis  $\sigma_{max}$  e  $\sigma_{min}$  representam a margem em volta do zero, ou seja, essas devem ser um valor próximo de zero (positivo e negativo) para representar o zero absoluto, que em medições reais é impossível de ser obtido. As variáveis  $SoC_{SC}^{max}$ ,  $SoC_{SC}^{otm}$  e  $SoC_{SC}^{min}$ , representam os 3 estágios do SoC dos SCs. Em  $SoC_{SC}^{max}$  deve ser utilizado um valor limite aos SCs, algo como 97%. Para o  $SoC_{SC}^{otm}$ , deve ser utilizado um valor ótimo a ser mantido, a sugestão são valores entre 85% a 95%.

O  $SoC_{SC}^{min}$ , como sugerido, deve ser utilizado um valor mínimo de SoC, o qual deve fazer com o que o sistema entre em estado crítico e passe total prioridade para carregar os SCs, uma faixa de valores sugeridos seria entre 60% a 70%, tendo em vista que os SCs trabalham mais eficientes acima dos 50% de SoC. Usando como exemplo a regra que simboliza uma alta aceleração, ou seja,  $P_{dem}$  maior que  $P_{Bat}^{max}$ , o limite mínimo aceitável para potência a qual as baterias deve contribuir é de 80% do  $P_{Bat}^{max}$ . Para este mesmo caso os SCs podem ir de 10% de  $-P_{SC}^{max}$  a 100% de  $P_{SC}^{max}$ , ou seja, está fatia será estipulada pelo sistema de gestão de energia, tendo em conta os valores limites das baterias.

### 4.3 Algoritmos baseados em meta-heurísticas

O principal objetivo do módulo de gestão de potência é garantir a alimentação contínua ao sistema de força motriz, com conhecimento total de toda a energia disponível nas fontes do VE. Portanto, o módulo tem de definir a divisão da potência a ser fornecida ou absorvida pelas diversas fontes, mediante as diretrizes do módulo de gestão de energia. As decisões tomadas pelo módulo de gestão de potência serão transmitidas ao módulo de execução (o controlador) através do sinal de referência para corrente nas baterias, fazendo com que o fornecimento dos picos de potência e oscilações do barramento comum sejam transferidos para os SCs, não permitindo sobrecargas das fontes nos processos de carga e descarga, e prevenindo as flutuações de alta frequência na potência fornecida pelas baterias.

Os resultados esperados são, fundamentalmente, um ganho de eficiência nas baterias, um maior ciclo de vida e um aumento da autonomia do veículo. Como abordado anteriormente, a circulação de um veículo em espaço aberto tem um comportamento estocástico, sendo necessário que o módulo de gestão de potência seja projetado tendo em conta tal aspecto. Nesse sentido, efetuou-se a sua implementação recorrendo a técnicas de otimização baseadas em meta-heurísticas, a fim de que em cada instante de decisão fosse definido a parcela de potência a solicitar ou a armazenar em cada fonte. Ao contrário dos algoritmos de otimização (programação matemática) as abordagens baseadas em meta-heurísticas não garantem a obtenção da solução ótima em todas as instâncias. As meta-heurísticas combinam estratégias de pesquisa de alto nível articuladas com heurísticas de baixo nível adaptadas ao problema em causa, balanceando mecanismos de diversificação e de intensificação no espaço de pesquisa, de modo a obter soluções sub-ótimas de boa qualidade ou mesmo soluções ótimas com um esforço computacional aceitável. [16]

Retomando o exemplo do VE com duas fontes (baterias e SCs) e considerando a expressão (4.4) que define o problema de gestão de potência, deve-se ter em conta que a sua resolução deve obedecer uma meta temporal não crítica de 100ms. Essa meta temporal foi definida baseando-se no tempo de resposta do controlador e nas necessidades do sistema. Da expressão referida (4.4), resulta a função objetivo que minimiza o módulo da diferença entre a potência requerida ao sistema de alimentação ( $P_{dem}$ ) e a potência fornecida pelas

duas fontes, no instante  $k$ , como é apresentada na equação (4.5):

$$\min_{C_{bat}, C_{SC}} |P_{dem}[k] - [C_{bat}[k] \cdot P_{bat}^{max}[k] + C_{SC}[k] \cdot P_{SC}^{max}[k]]|, \quad \forall k \in \{1, \dots, N\} \quad (4.5)$$

sendo  $P_{bat}^{max}$  a potência máxima das baterias e  $P_{SC}^{max}$  a potência máxima dos SCs.  $C_{bat}$  e  $C_{SC}$  são os fatores que definem as respectivas parcelas de potência a encaminhar, no instante  $k$ . Os limites impostos na camada superior, demonstrados no tópico anterior, são restrições destes fatores que determinam as parcelas de potência.

Para resolver o problema de otimização proposto, foi utilizada uma fusão entre duas abordagens meta-heurísticas, nomeadamente, *Simulated Annealing* (SA) e o *Particle Swarm Optimization* (PSO), tendo em conta a natureza do problema em questão e a existência de trabalho prévio publicado na área.

### 4.3.1 *Particle Swarm Optimization*

A técnica de *Particle Swarm Optimization* (PSO), ou seja, otimização por enxame de partículas, é uma abordagem meta-heurística inspirada no comportamento social de determinadas espécies de pássaros. Nesta abordagem, o movimento e a inteligência de enxames são modelizados como uma técnica de otimização estocástica inicialmente proposta por Eberhart et al. (1995) [11]. Este algoritmo combina o aprendizado pessoal e o adquirido pelo bando, no pressuposto de seguirem o caminho mais curto à procura de alimento ou o seu ninho. À imagem dos algoritmos baseados em sistemas biológicos, o PSO é fundamentado em sistemas sociais, no comportamento coletivo de indivíduos interagindo entre si e com o meio ambiente. A população (enxame) é formada por indivíduos, denominados “partículas” no PSO. Assim, a evolução da população no espaço de pesquisa é implementada através da melhoria da posição de cada partícula, a cada iteração, no sentido de alcançar melhores soluções. O algoritmo do PSO engloba conceitos simples e pode ser implementado em poucas linhas de programação, requerendo apenas operadores simples.

De forma resumida, no algoritmo PSO, uma partícula candidata à solução do problema corresponde a um ponto no espaço de pesquisa, sendo representada por um vetor de dimensão igual à dimensão do espaço de pesquisa e é, em geral, inicializada com uma posição e uma velocidade aleatórias (Figura 4.4a). O algoritmo guarda a melhor posição anteriormente registada pelo enxame, isto é, pelo conjunto de partículas e a melhor posição anterior de cada partícula. A cada iteração do algoritmo, os indivíduos da população são avaliados e as melhores posições de cada partícula e do enxame são atualizadas, levando em conta a influência da melhor posição anteriormente atingida pelo enxame (influência social) e ainda a melhor posição anteriormente alcançada pelo próprio indivíduo (decisão individual). Desta forma, os indivíduos do enxame movem-se pelo espaço de pesquisa, na perspectiva de atingir o máximo ou mínimo global de uma função objetivo, com base em decisões individuais e na influência social [11].

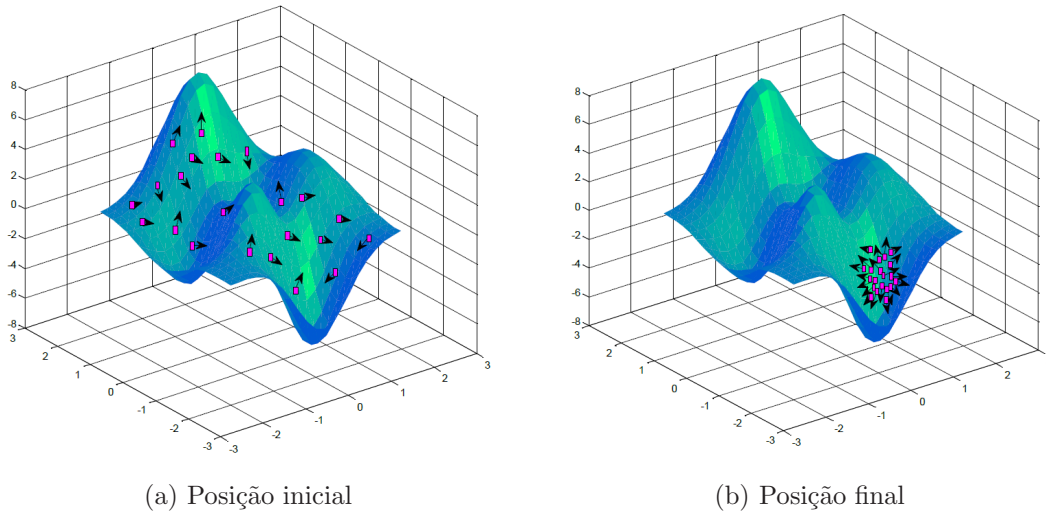


Figura 4.4: Partículas do PSO em duas fases distintas

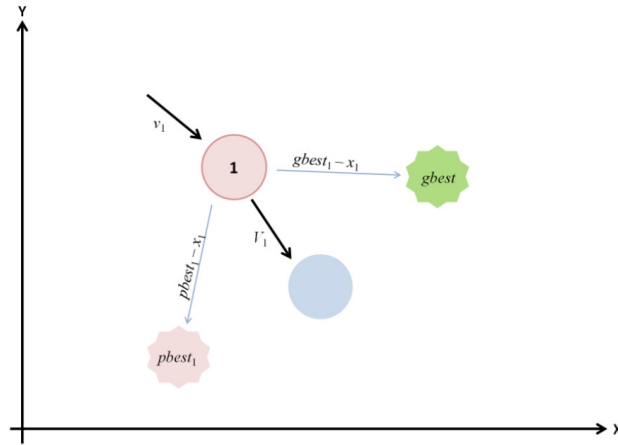


Figura 4.5: Exemplo de atualização da velocidade e posição de uma partícula

Nesta dissertação, a cada iteração a velocidade de cada partícula é atualizada conforme a equação (4.6). A nova posição é determinada pela soma da sua posição atual e a nova velocidade, de acordo com a equação (4.7) [45, 12].

$$v_i[k + 1] = w \cdot v_i[k] + c_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_i - x_i[k]) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gbest_i - x_i[k]) \quad (4.6)$$

$$x_i[k + 1] = x_i[k] + v_i[k + 1] \quad (4.7)$$

sendo  $v_i^k$  a velocidade atual (iteração  $k$ ) da partícula  $i$ ;  $w$  o peso inercial (melhora a taxa de convergência do algoritmo através do equilíbrio da exploração global e local);  $c_1$  e  $c_2$ , os coeficientes de aceleração (determinam a magnitude das forças em direção a  $pbest$  e  $gbest$ , respectivamente);  $r_1$  e  $r_2$ , números aleatórios distribuídos de forma uniforme entre  $[0,1]$  (permitem manter a diversidade da população);  $pbest_i$  a melhor posição anteriormente alcançada pela partícula  $i$ ; e  $gbest$  a melhor posição encontrada por todas as partículas do enxame.



Existem ainda outras formas de calcular a velocidade e posição do PSO, uma delas pode resolver alguns casos nos quais o enxame fica presos em mínimos locais. Este método alternativo, consiste em substituir a partícula *gbest* pelo melhor indivíduo correspondente de um grupo de partículas a sua volta. Outros autores ainda fazem uso de algoritmos adaptativos e *links* de comunicação entre a partícula e seus vizinhos [34].

### 4.3.2 *Simulated Annealing*

A técnica *Simulated Annealing* (SA) tem origem na analogia existente entre a termodinâmica e a resolução de problemas de otimização combinatória. Esta abordagem foi inicialmente proposta por Kirkpatrick et al. (1983) [28] para resolver problemas combinatórios. O SA é uma das mais antigas técnicas meta-heurísticas e um dos primeiros algoritmos com mecanismos para “escapar” dos mínimos locais. A ideia fundamental é possibilitar que soluções piores que a atual sejam equacionadas em próximas pesquisas, permitindo assim “escapar” de mínimos locais. A probabilidade de se escolher uma solução pior diminui ao longo da pesquisa, devido ao fato de se reduzir a “temperatura” durante o processo. Devido aos bons resultados e à sua simplicidade de implementação, o SA tem sido crescentemente utilizado em problemas de otimização complexos.

O algoritmo SA combina no seu processo de pesquisa duas estratégias, uma é a pesquisa aleatória de soluções e a outra é a sua melhoria iterativa. Na primeira fase, existe um peso relativamente baixo dado ao melhoramento do resultado, mas esta fase permite uma maior exploração do espaço de soluções. À medida em que a temperatura cai, esse comportamento é alterado, e no final do processo o algoritmo converge para um ótimo local o qual espera-se que seja o ótimo global ou algo muito próximo a ele. A escolha de uma solução pior ou melhor do que a anterior depende de duas variáveis: a diferença de desempenho ( $\Delta E$ ) entre a nova e a atual solução, e a temperatura atual ( $T$ ). Quanto maior for a diferença de desempenho entre a nova e a atual solução, maior será a probabilidade de a nova solução ser selecionada; quanto maior for a temperatura, maior a possibilidade de uma solução pior ser escolhida. Por analogia ao arrefecimento de metais, a estratégia do SA permite deslocamentos para soluções piores nas temperaturas mais altas, sendo estas permitidas pela probabilidade apresentada na equação (4.8).

$$p(\Delta E) = e^{(-\Delta E/T)} \quad (4.8)$$

O algoritmo SA apresenta como principal vantagem a possibilidade de se encontrar um novo ponto extremo de uma dada função objetivo, mínimo ou máximo, após a descoberta de um extremo local da referida função. Para além dessa característica, esta técnica de otimização apresenta outras vantagens, nomeadamente:

- a possibilidade de processar funções objetivo com múltiplos graus de não linearidade e descontinuidades;

- a possibilidade de processar funções com diversas condições de fronteira e outras restrições nos valores possíveis do seu domínio;
- simplicidade e facilidade de implementação do algoritmo, quando comparado com outros algoritmos de otimização não linear e/ou combinatória.

### 4.3.3 Algoritmo híbrido PSO-SA

A grande motivação por trás das técnicas de hibridização de diferentes algoritmos é explorar as capacidades complementares entre diferentes estratégias de otimização, ou seja, os algoritmos híbridos contêm uma componente de sinergia [5]. No entanto, essa técnica, deve ser aplicada com cautela e conhecimento, pois uma má gestão de recursos pode piorar a solução, ao contrário de trazer melhorias. Para o caso de estudo desta dissertação foi feito um algoritmo capaz de unir a rápida convergência de valores do PSO com a capacidade de escapar de mínimos locais do SA, inspirado-se em algoritmos já desenvolvidos [19, 55, 25].

Esta necessidade surge do fato da camada de gestão de potência ser um sistema de tempo real não crítico que deve, na maior parte dos seus casos, cumprir uma meta temporal de 100ms. Para a maioria das situações pertinentes ao problema da equação (4.5), o algoritmo PSO consegue encontrar mínimos aceitáveis e atende sempre à sua meta temporal. Entretanto, como as condições de pesquisa do PSO são tomadas tendo em conta os limites dados pela camada superior, em algumas ocasiões o sistema será inicializado ao redor de mínimos locais e levará tempo até encontrar uma saída ou nunca a encontrará.

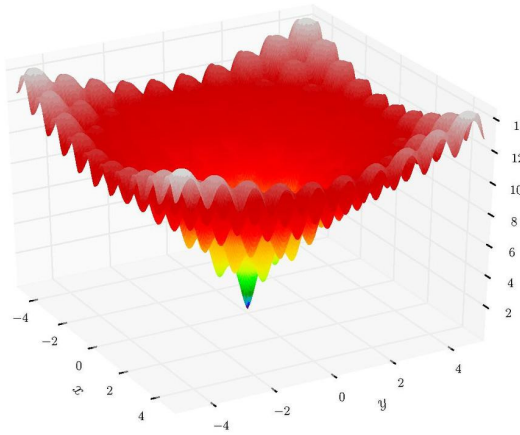


Figura 4.6: *Plot 3D da função Ackley*

Na Figura 4.7 é mostrado o algoritmo PSO a funcionar para uma função do tipo Ackley (Figura 4.6). Para demonstrar o que ocorre quando o PSO recebe más informações sobre o ponto de início da sua pesquisa, o enxame foi iniciado distante do mínimo global (Figura 4.7a). O resultado é como esperado de qualquer comportamento social cujo líder não possui boas informações, após algumas iterações o enxame fica preso num mínimo local (Figura 4.7b).



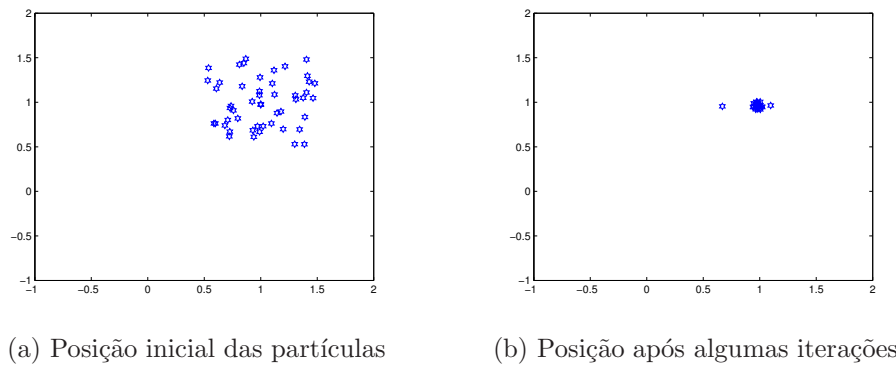


Figura 4.7: Disposição de partículas do PSO numa função do tipo Ackley

Partindo do algoritmo PSO como base, foi implementada uma etapa na qual o SA poderia intervir caso fosse detectado que a solução poderia não ser a ótima. O SA quando iniciado possui alta temperatura, limites expandidos e não necessita de pesquisar muitas soluções, ou seja, não precisa encontrar o ótimo, apenas um espaço alternativo de busca, para que o PSO posicione o seu enxame na zona correta de pesquisa. Com este novo algoritmo, após o ocorrido mostrado na Figura 4.7b, o SA é capaz de reposicionar o enxame numa melhor zona de pesquisa, Figura 4.8a, para após algumas iterações o algoritmo convergir para um local mais próximo do mínimo global, como pode ser visto na Figura 4.8b.

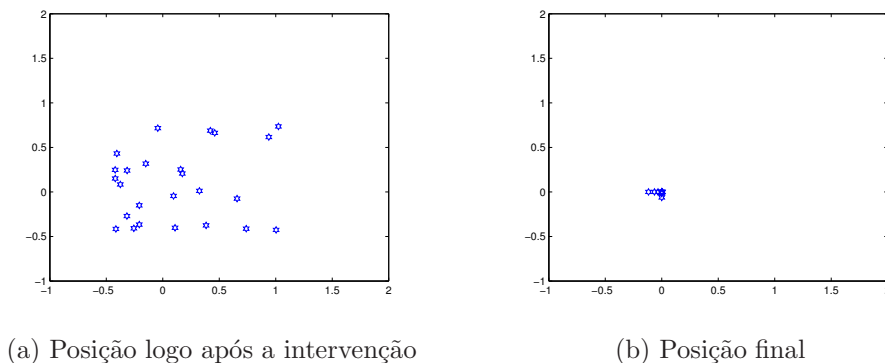


Figura 4.8: Reajuste das partículas do PSO após aplicação do SA

Para a gestão de potência em causa, esta abordagem é de redobrada necessidade por não ser interessante que o algoritmo procure longe das zonas de pesquisa, apenas nos casos em que a zona de pesquisa é errónea. Utilizando uma abordagem na qual, por exemplo, o PSO se iniciasse sempre com um amplo espaço de pesquisa e um amplo enxame, este correria o risco de não cumprir as metas temporais, deixando o tempo de cálculo muito suscetível a probabilidades do início de pesquisa, e é possível que ocasionalmente gerasse valores incorretos. Os casos de zonas erradas de pesquisa ocorrerão quando a potência instantânea for muito diferente daquela usada nas regras da camada de gestão de energia, ou seja, normalmente ocorrem nos instantes nos quais a regra já deveria ter mudado a zona de pesquisa mas ainda não o fez, porque não chegou o seu tempo de processamento.

Como não é interessante que o ciclo de processamento desta tarefa de gestão de energia seja igual ou até mesmo inferior ao da camada de gestão de potência, a criação desta abordagem de meta-heurísticas híbrida faz todo o sentido.

O novo algoritmo híbrido também recebeu modificações muito específicas no problema tratado. Foram adicionadas penalidades ao resultado da função de custo quando esta infringe os limites de  $C_j$ , essas penalidades aumentam exponencialmente conforme a distância entre o valor usado e o valor limite. Também foi adicionado penalidade para a alteração de valores na variável  $C_{bat}$ , ou seja, é desejável que o resultado da otimização tente sempre manter estável a corrente nas baterias. Para aumentar a capacidade de processar o código numa meta temporal tão curta, notou-se um aumento do tempo de resposta quando passou-se a adotar cálculos matriciais que abrangessem todo o enxame de uma só vez. Como as simulações foram feitas em ambiente Matlab, isso terá de ser verificado quando programado no processador de tempo real a ser utilizado, já que dados precisos de tempos de simulação em tempo real não podem ser obtidos simulando em ambiente Matlab/Windows, e cada linguagem de programação compila o seu código de forma diferente.

Para controlar quando o SA deve ser ativado, o algoritmo proposto detecta valores de custo que podem não ser ótimos. Para o caso do problema de gestão, é sabido que os valores devem ser próximos de zero com alguma alteração não muito maior do que 1, no pior dos casos. Qualquer valor de custo próximo de 1 deve ser conferido pelo SA. Um pseudocódigo para este algoritmo híbrido descrito é apresentado no Algoritmo 1 (fim deste capítulo).

## 4.4 Resultados das simulações

Tabela 4.1: Parâmetros da camada de gestão de potência

Variável	Valor
<i>Particle Swarm Optimization</i>	
Tamanho do enxame	50
Máximo iterações	30
Raio mínimo das partículas para paragem	$10^{-3}$
Peso estocástico	0.6
<i>Simulated Annealing</i>	
Funções usadas para critério de paragem	4
Ciclos internos	10
Fator de redução da temperatura	.5
Iterações antes de reduzir a temperatura	5
Máximo de avaliações	4000
Critério de tolerância para paragem	$10^{-1}$
Temperatura inicial	20

Os testes foram efetuados utilizando o simulador do capítulo anterior, apenas substituindo o sistema de gestão de energia por desagregação de frequências (carregado por um ficheiro), por esta nova arquitetura de gestão baseada em camadas, capaz de executar as suas tarefas de forma síncrona com o restante do sistema. Todos os valores foram conservados, com o mesmo tipo de ruído nos sensores e utilizando o EKF, os valores utilizados na abordagem meta-heurística estão dispostos na Tabela 4.1. No entanto, um outro ciclo de condução utilizado como referência de carga (FTP). Essa mudança deu-se ao fato deste ciclo ser extensivamente utilizado por indústrias automóveis e investigadores como referência para calcular o alcance dos VEs e, portanto, muito relacionado com o sistema de gestão de energia *ref.* Como o interesse nesta dissertação é apenas validar o bom comportamento da camada de gestão de energia e não calcular possíveis distâncias que o veículo pode atingir, novamente foi escolhido apenas um trecho (530s, de 1950s a 2480s) do FTP para simular o comportamento do sistema em respeito à potência solicitada às fontes. Os resultados mostrados são referentes ao melhor caso obtido entre as simulações executadas, mesmo assim, constou-se pouca diferença entre os casos, o ponto aonde alguma diferença estocástica pode ser vista é entre a transição de potências que infringe por um instante as regras da camada de gestão de energia.

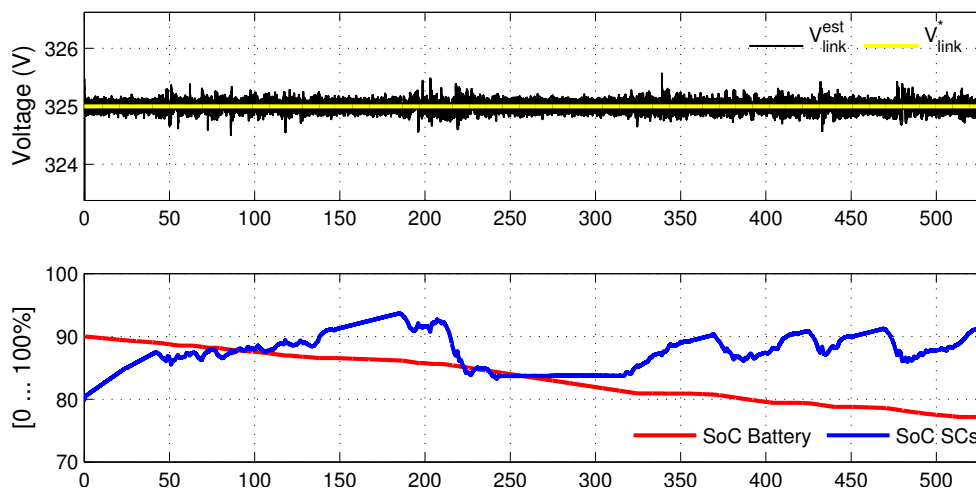


Figura 4.9: Tensão do barramento e SoC das fontes para o ciclo de condução

Na Figura 4.9 é possível observar que a tensão do barramento comum ( $V_{Link}$ ) se mantém estável e novamente não demonstra oscilações maiores que 0,2%. Através desta observação é possível certificar o bom funcionamento do controlador também para este ciclo.

No sentido de analisar a gestão de energia, os SCs foram iniciados com o SoC a 80%, um valor considerado abaixo do ótimo pela gestão; assim, no primeiro instante o controlador recebe o sinal da camada de gestão para fornecer energia aos SCs (Figura 4.10). Como as baterias ( $P_{bat}$ ) e a carga ( $P_{dem}$ ) se encontravam em estado de repouso, a potência exigida das baterias é de aproximadamente 3kW, longe do seu limite (5kW). Após 25s, quando o SoC entra na zona de 85% a 95% a potência exigida das baterias baixa para aproximados 2kW, exatamente como esperado.

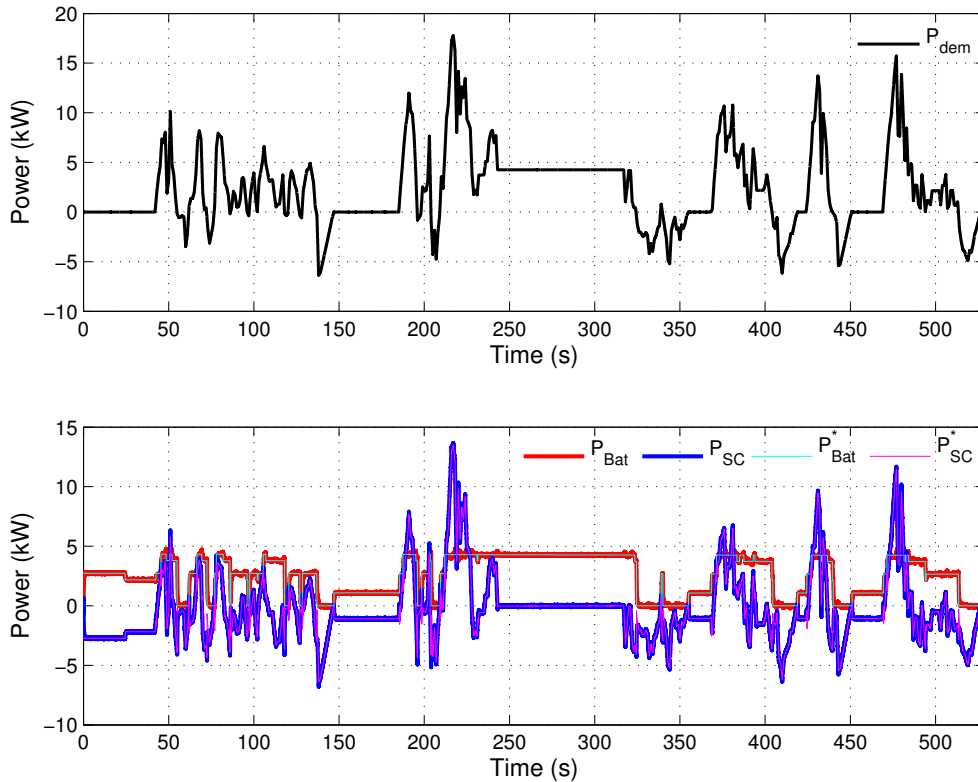


Figura 4.10: Potência da carga e das fontes para o ciclo de condução

Quando a potência solicitada deixa de ser zero, próximo aos 40s de simulação, as referências da bateria, dali em diante, se mantêm estáveis e próximas da potência máxima para as acelerações, e vão a zero nos instantes de travagem regenerativa. É de se notar que as baterias não sofrem grandes alterações de carga, e mesmo nos momentos que vão do máximo a zero, estes são feitos de formas suavizadas, com duração de até 1s. Com isso, os SCs filtram de forma ativa o  $P_{dem}$  e ainda são capazes de aguentar potências instantâneas quase 3 vezes maiores que a potência instalada das baterias, como visto aos 220s desta simulação quando o  $P_{dem}$  atinge a 18kW e as baterias ficaram limitadas nos 5kW deixando os SCs atenderem ao restante. Voltando à Figura 4.9 é possível observar que nestes momentos a gestão é capaz de recuperar o SoC dos SCs a um estado ótimo, fazendo um bom aproveitamento da travagem regenerativa e da potência instalada das baterias.

Outro trecho interessante de se analisar é entre os 250s e 320s, quando o  $P_{dem}$  é pouco menor do que a potência máxima que as baterias podem fornecer, o sistema responde novamente como o esperado, deixando os SCs em repouso e debitando das baterias toda a potência ( $P_{bat}$ ) necessária. Uma má gestão neste instante significaria os SCs fornecerem energia junto com às baterias e passarem todo este tempo a descarregar, provavelmente ficando vulneráveis as próximas acelerações e, sendo assim, não aproveitando corretamente a capacidade de potência das baterias.

---

**Algorithm 1** - Algoritmo Híbrido (PSO + SA)

---

```

1: Inicializa o enxame numa posição inicial;
2: Calcula e classifica os resultados Locais da função objetivo para o enxame;
3: Identifica o lider Local
4:  $lider\_local \leftarrow lider\_global$ ;
5: repeat
6:   Aplica velocidade e movimento às partículas; ▷ Equações (4.6) e (4.7)
7:   Calcula e classifica os resultados Locais da função objetivo para o enxame;
8:   Identifica o lider Local;
9:   if  $resultado\_local \geq resultado\_global$  then
10:      $lider\_global \leftarrow lider\_local$ ;
11:      $resultado\_global \leftarrow resultado\_local$ ;
12:   else
13:      $min\_local \leftarrow min\_local + 1$ ;
14:   end if
15:   if  $2 \geq min\_$  then
16:      $melhor\_solucao \leftarrow lider\_global$ ;
17:      $melhor\_resultado \leftarrow resultado\_global$ ;
18:     repeat
19:       Gera uma solucao_vizinha à solucao;
20:       Calcula o resultado_novo da função;
21:        $\Delta E \leftarrow resultado\_novo - resultado$ ;
22:       Gera aleatoriamente um  $p$  entre  $[0, 1[$ 
23:       if  $\Delta E \geq 0$  ou  $p < e^{(-\Delta E/T)}$  then
24:          $solucao \leftarrow solucao\_vizinha$ ;
25:          $resultado \leftarrow resultado\_novo$ ;
26:         if  $resultado \geq melhor\_resultado$  then
27:            $melhor\_solucao \leftarrow solucao$ ;
28:            $melhor\_resultado \leftarrow resultado$ ;
29:         end if
30:       end if
31:       Reduz o  $T$ ;
32:        $iteracao \leftarrow iteracao + 1$ ;
33:     until  $iteracao \geq maximo\_iteracoes$ 
34:     Inicializa um novo enxame baseado em melhor_solucao;
35:   end if
36:    $iteracao \leftarrow iteracao + 1$ ;
37: until  $iteracao \geq maximo\_iteracoes$ 

```

---



# Capítulo 5

## Validação experimental

Neste capítulo apresenta-se a construção do *setup* experimental, com vista à validação da topologia do controlador e das camadas de gestão de energia abordados nesta dissertação, bem como os resultados experimentais obtidos. Para este efeito, foi necessário selecionar vários componentes de hardware, como os IGBTs com seus respectivos drives, os sensores para leitura e realimentação dos sinais a controlar e, por fim, fazer as devidas ligações em todo o *setup*. Foi ainda necessário compreender e integrar o processador digital de sinal (DSP) da National Instruments, que irá receber o código referente ao sistema de gestão desenvolvido.

Este *setup* pretende avaliar o perfeito sincronismo e dimensionamento das diversas camadas, assim como avaliar os tempos de resposta de cada tarefa. Tudo será implementado numa ferramenta de tempo real que permite a rápida prototipagem do modelo e controlador e módulo de gestão propostos. Passando do simulador à ferramenta de implementação, podem ser encontrados diversos pontos fracos na idealização do sistema, fazendo também com que se torne mais fácil escolher o processador ideal para implementação final para uma suposta produção em massa de todo o sistema.

### 5.1 Hardware utilizado

#### 5.1.1 Escala reduzida e limitações do sistema implementado

Devido a questões de segurança e monetárias, o sistema será implementado numa bancada de escala reduzida, limitado a potências de 800W. As fontes do sistema serão compostas por 2 baterias de NiMH (SAFT VH 12V, Tabela 3.1) em série, resultado em 24V e dois bancos de SCs totalizando 11F a um máximo de 48,6V [39].

Para emular a carga, serão utilizados dois bancos compostos cada um por 4 de baterias 12V de Pb (2 bancos de 24V) ligadas em série, em um terceiro braço de IGBTs, ou seja, a mesma teoria de conversor DC/DC utilizado para controlar as fontes, será utilizada para controlar a carga do outro lado do barramento comum.



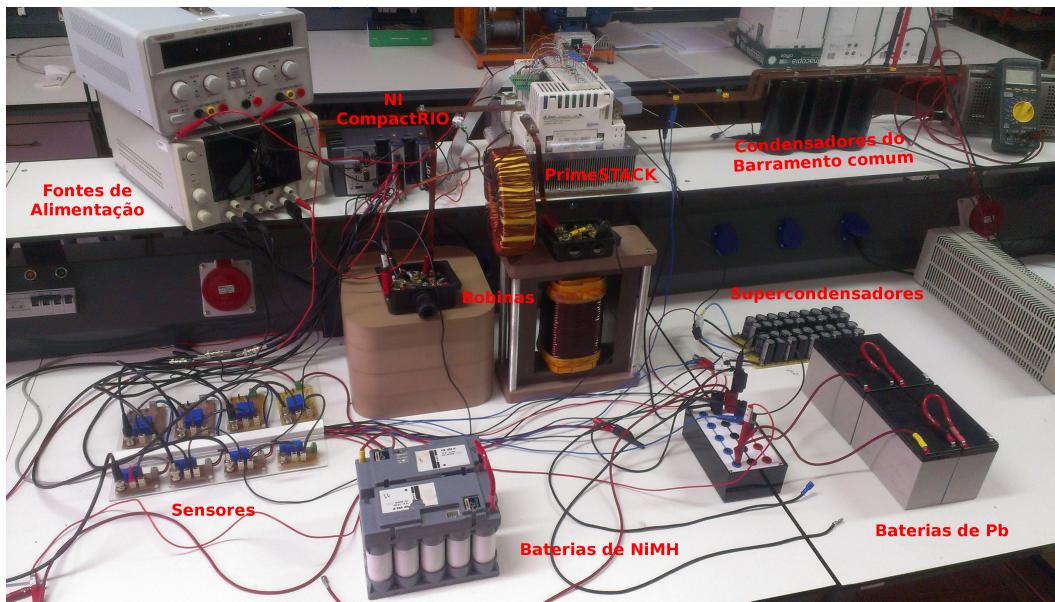


Figura 5.1: *Setup* experimental de escala reduzida utilizado nos testes

Um controlador simplificado do tipo PI foi utilizado para receber as referências de corrente que este banco deve receber ou enviar para o sistema. As referências são carregadas no controlador através de um ficheiro que irá conter um gráfico de carga baseado em um ciclo de condução normatizado.

As indutâncias das bobinas utilizadas possuem aproximadamente o mesmo valor utilizado em todas as outras simulações (Tabela 3.3). O mesmo vale para os valores de condensadores do barramento comum, frequência de chaveamento e taxa de amostragem do controlador.

### 5.1.2 Sensores

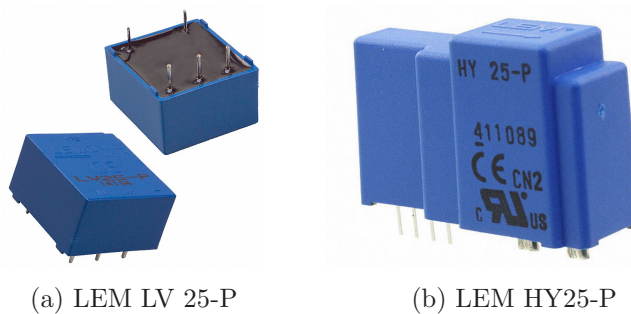


Figura 5.2: Transdutores de tensão e corrente LEM utilizados nas medições

A utilização de sensores para efetuar a leitura e realimentação dos diferentes sinais é um aspecto fundamental na compreensão do circuito, bem como no correto funcionamento dos controladores do mesmo. Assim, ao invés de utilizar os sensores comuns em ambiente de laboratório (pinças amperimétricas e pontas diferenciais de tensão), optou-se por utilizar um conjunto de sensores montados em PCBs desenvolvidos previamente no laboratório.



A placa de sensores é baseada em transdutores da LEM (Figura 5.2), nomeadamente o LV 25-P para leituras de tensão e o HY25-P para leituras de corrente, tendo estes como características mais relevantes a linearidade de resposta, imunidade ao ruído externo e dimensões reduzidas [30, 29].

### 5.1.3 IGBTs

Após a análise efetuada em torno dos interruptores de potência a utilizar, e tendo em vista o material disponível no laboratório, optou-se por utilizar uma solução da Infineon que possui 3 “braços” de IGBTs em paralelo com respectivos drivers incorporados e uma conexão comum (barramento comum), nomeadamente o modelo PrimeSTACK. Este modelo pode operar com tensões de 1200V e correntes de 400A podendo estes serem comutados até uma frequência de 20kHz [22].

### 5.1.4 CompactRIO

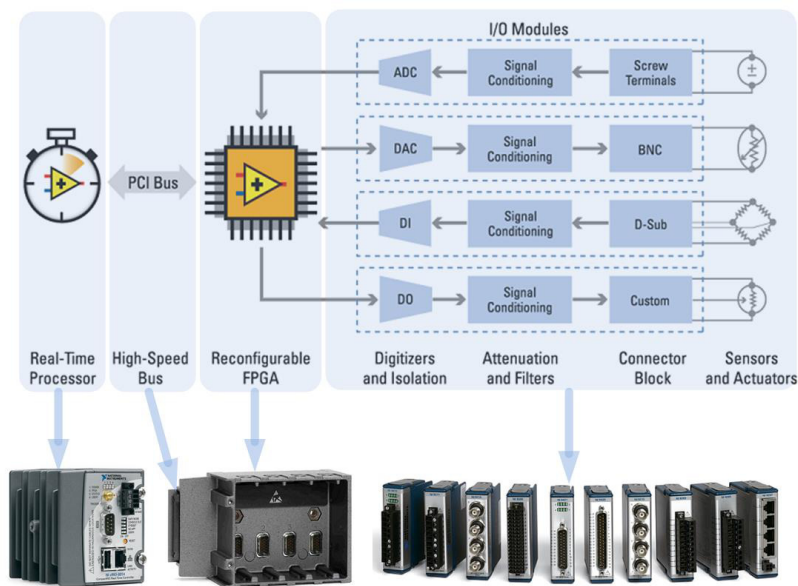


Figura 5.3: Arquitetura do sistema CompactRIO

Existem atualmente algumas opções relativamente à escolha de unidades de processamento indicadas para a implementação de protótipos em sistemas reais como o que esta tese aborda. Algumas das soluções mais relevantes são as tecnologias da dSPACE e da National Instruments que conferem capacidade de memória, processamento, interface e robustez suficientes para controlar por completo e em tempo real inúmeros sistemas. O sistema utilizado foi o da National Instruments e designa-se por *Compact Reconfigurable Input Output* (CompactRIO). A CompactRIO é um sistema reconfigurável embebido de controlo e aquisição.

A arquitetura robusta deste equipamento é formada por um chassi com uma *Field-Programmable Gate Array* (FPGA) reconfigurável que estabelece a interface com os módulos de entrada e saída (E/S) e um controlador de tempo real também reconfigurável, responsável pela comunicação e processamento, tal como se apresenta na Figura 5.3. Além disso, o CompactRIO é programado com o uso das ferramentas de programação gráfica da National Instruments (LabVIEW), e pode ser associado a várias aplicações que necessitem de sistemas de controlo e monitorização embebida [38].

## 5.2 Programação em Labview

Para obter o tempo de resposta do controlador simulado a implementação deste se deu através da FPGA. No entanto, como esta é dimensionada apenas para uso de controladores simples do tipo PI, não possui grande espaço para implementar controladores matriciais e a linguagem de programação é extremamente limitada, não foi possível implementar o EKF. Mesmo assim, o sistema em escala reduzida será mais imune a ruídos que o sistema simulado em escala real, isso porque os sensores utilizados estarão trabalhando com correntes próximas aos seus valores nominais. Apenas a implementação do ganho  $K$  e integradores foi um exercício complexo de economia de espaço, tendo em vista que na FPGA todos os bits utilizados na representação de números complexos contam. Além do controlador a FPGA ficou responsável pelas leituras no ADC, proteções do sistema, gerar os PWMs de saída referentes aos *duty cycles* e filtrar o sinal utilizado no painel frontal e no *data logging* (Figura 5.4).

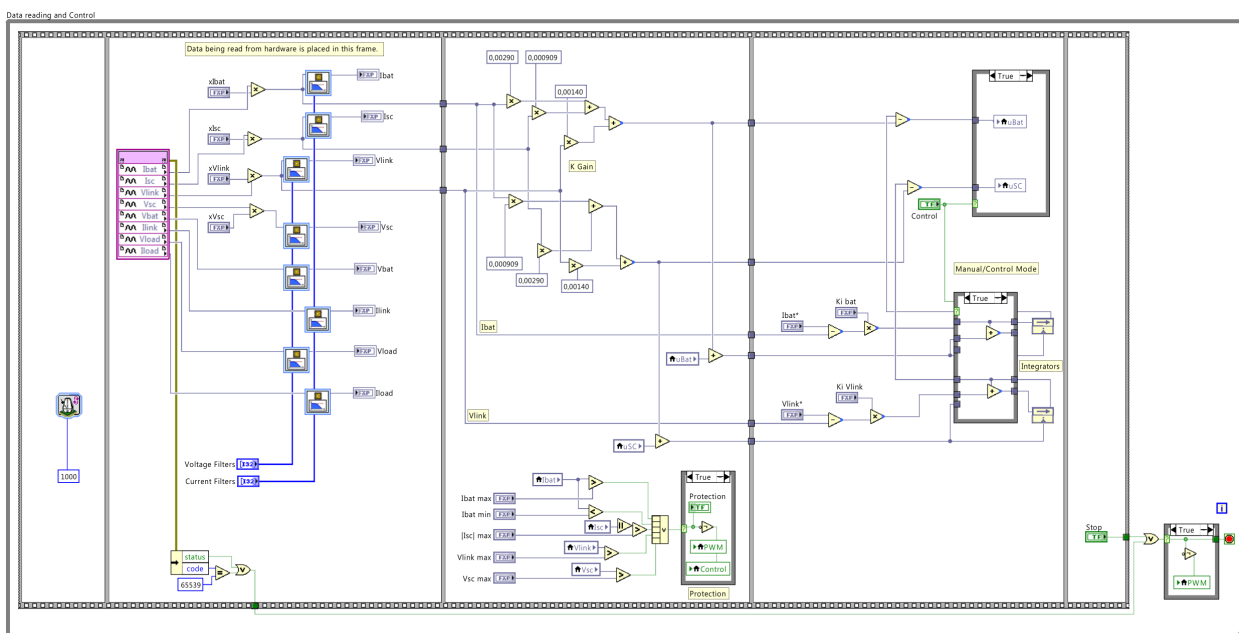


Figura 5.4: Parte do código implementado na FPGA da CompactRIO

No lado do processador de tempo real da CompactRIO, comumente chamado de *Host*, foram implementados: a gravação dos resultados, o carregamento de ficheiros para simulação de carga, as camadas de gestão de energia e potência, o controlador que simula a carga, o tratamento de erros e toda a interface de comunicação com o usuário e a FPGA. Toda essa implementação foi subdividida em tarefas dentro de um sistema de tempo real, a cada tarefa foi designado uma prioridade e os devidos tempos de execução. Todo o sistema foi testado por etapas a fim de certificar o funcionamento de cada tarefa e suas respectivas proteções antes de proceder para o funcionamento do sistema completo.

### 5.3 Resultados experimentais

O ciclo de condução utilizado como referência de carga nas simulações foi novamente o FTP, o trecho de 120s escolhido (1985s a 2105s) faz parte do mesmo trecho usado na simulação da gestão de energia. Duas novas variáveis foram introduzidas:  $V_{Load}$  e  $u_{Load}$ , referentes a tensão e *duty cycle* na bateria que funciona de emulação de carga para o sistema. Os resultados mostrados são referentes ao melhor caso obtido entre as poucas simulações executadas.

O SoC dos SCs nas simulações foi iniciado a pouco mais de 90% nota-se que este valor é fictício, tendo em vista que na realidade o SoC era de 76%, isso porque a capacidade dos SCs foi limitada em pouco mais de 80% para evitar problemas que poderiam ocorrer devido a alguma falha no sistema de gestão, como por exemplo, carregar acima do limite aceitável.

Fazendo uma análise simplista da Figura 5.5, é possível visualizar a gestão de energia nos SCs tentando sempre manter o SoC próximo do nível definido como ideal (97%), enquanto mantém as baterias com potências muito mais constantes do que as potências da carga ou dos SCs. Mesmo com uma capacidade instalada de baterias de apenas 250W, sendo este o limite máximo para  $P_{Bat}^{max}$ , o sistema consegue suportar picos de quase 800W sem comprometer a vida útil das baterias.

Analisando a estabilidade de tensão do barramento comum, nota-se alguns picos indesejáveis. Mesmo estes não sendo muito demorados e nem de amplitude muito alta (picos máximos de 2V), representam algo novo por não terem sido observados nas simulações. Uma análise minuciosa da resposta do esforço do controlador e das tensões das fontes, Figura 5.6, mostra que os *duty cycles* das baterias de carga e dos SCs possuem uma variação muito grande de valores em alguns instantes. Nesta mesma figura, também pode ser visto uma forte oscilação na tensão das baterias para emulação de carga. Tudo isso leva a crer que as baterias de Pb possuem sérios problemas de instabilidade e já não são aptas a serem utilizadas. Testes isolados no laboratório confirmaram essa suspeita.

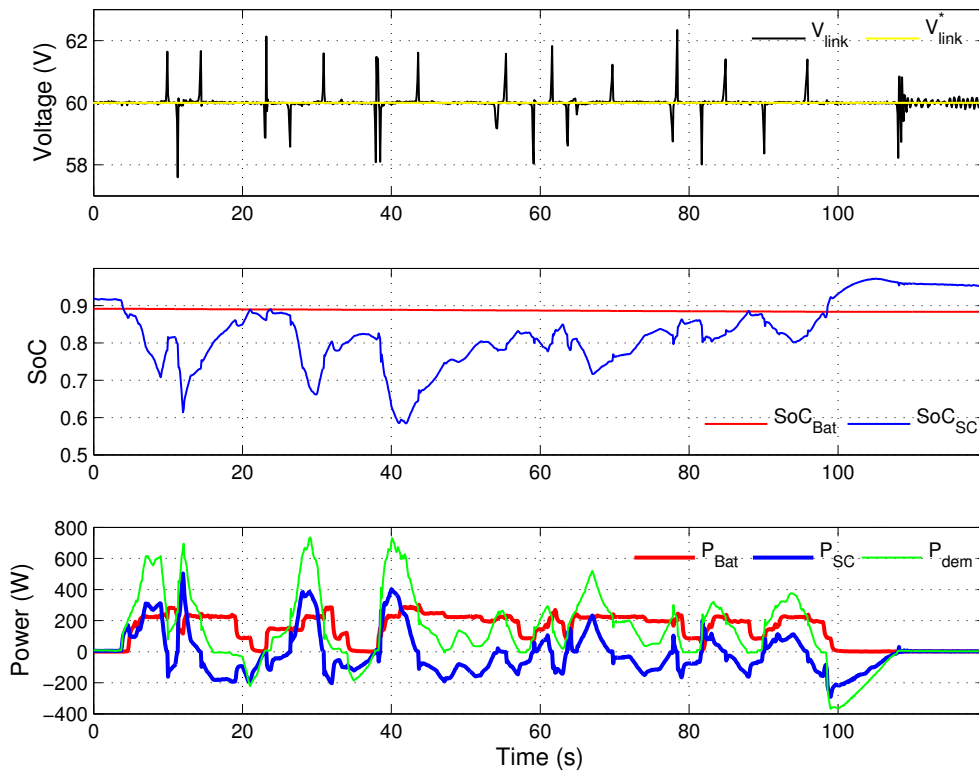


Figura 5.5: Resultados do experimento em escala reduzida: Tensão do barramento, SoC e potência das fontes

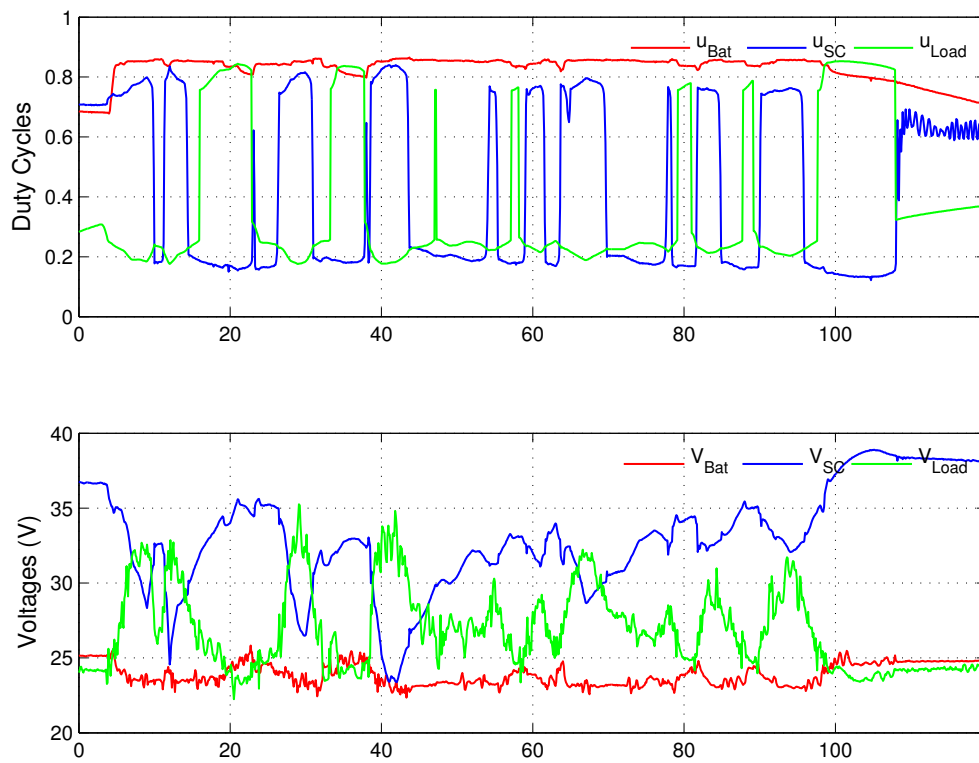


Figura 5.6: Resultados do experimento em escala reduzida: *duty cycles* e tensões das fontes

Comparando as variações do  $u_{SC}$  com os transitórios na tensão do barramento comum (Figura 5.7), é possível concluir que essas variações são as principais responsáveis pelo problema de estabilidade. Quando comparado o  $u_{SC}$  na mesma figura com as oscilações de tensão nas baterias de carga, fica claro que estas são as responsáveis pelo problema de estabilidade. Todas as vezes em que o sistema de emulação de carga precisava passar de uma emulação de aceleração para travagem regenerativa, a instabilidade do seu funcionamento fazia com que fosse imposta uma resistência ao sistema que só poderia ser vencida com tais oscilações nos *duty cycles*.

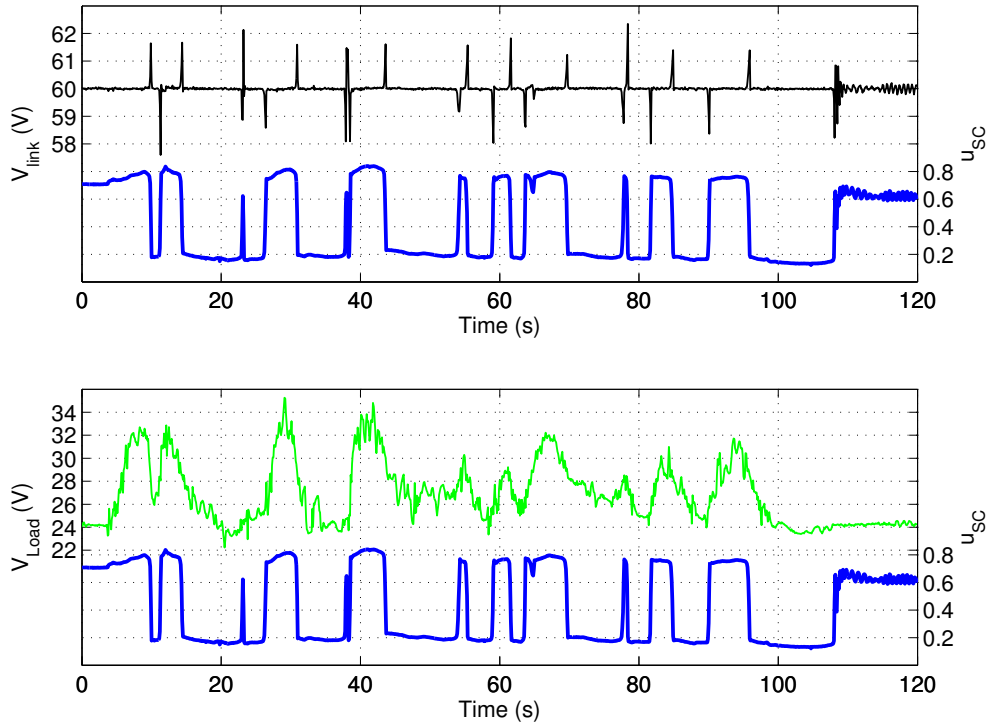


Figura 5.7: Comparação da variação no duty cycle dos SCs com as tensões do barramento e da bateria de Pb

Mesmo considerando os problemas criados por limitação do hardware, o sistema reagiu da melhor forma possível e manteve tudo funcionando. Desta forma, pode-se concluir um ótimo desempenho do sistema desenvolvido, com grandes potencias de implementação em escala real.



# Capítulo 6

## Conclusões e trabalhos futuros

Este trabalho de mestrado desenvolveu um controlador do tipo LQR para o comando do sistema de gestão de energia de um VE com duas fontes de energia (baterias e SCs). Para teste deste controlador, foi desenvolvido um simulador em ambiente Simulink que contemplasse as diversas não-linearidades de um sistema conversor DC/DC, como por exemplo, o ruído dos sensores e as resistências dos cabos e bobinas. O controlador mostrou ser robusto ao manter uma tensão estável no barramento comum sem grande esforço dos controladores. Além disto, este também suportou as diversas instabilidades ligadas à gestão de múltiplas fontes, contemplou possíveis ruídos advindos dos sensores através de um EKF, e obedeceu as referências de potência enviadas pelo módulo de gestão. A validade do trabalho desenvolvido na parte do controlador foi confirmada pela aceitação de um artigo na prestigiada conferência internacional IECON 2013 [31].

Também foi aprimorada a ideia de gestão de energia para veículos com múltiplas fontes, feita através da divisão por camadas e conhecimento do SoC, potências máximas de cada fonte e a potência demandada pelo sistema de tração. Novas regras foram desenvolvidas para contemplar situações mais específicas, e um novo algoritmo de otimização por meta-heurística híbrida foi desenvolvido, além de novas restrições na função custo. Os testes da fusão entre o PSO e o SA se mostraram promissores e resultados animadores puderam ser vistos nas simulações, além da ausência de falhas de cálculos em todas as simulações realizadas.

O sistema foi implementado e validado através de testes realizados numa bancada de escala reduzida. O controlador foi implementado, sem o EKF por limitações de *hardware*, na FPGA da CompactRIO disponível em laboratório. Toda a parte de gestão, comunicação, *data logging*, simulação de carga e interface foi implementada no DSP da mesma CompactRIO através do desenvolvimento de um sistema de tempo real. O sistema foi capaz de atender todas as metas temporais requisitadas a cada tarefa sem erros de sincronia. Desta forma, foi possível verificar a funcionalidade do sistema de gestão de energia mesmo à frente dos mais diversos problemas de um sistema real.

Com o trabalho desenvolvido foi possível encontrar uma solução inovadora para a gestão de energia com múltiplas fontes aplicado ao caso dos VEs, potencializando a sua eficiência e vida útil de suas fontes, além de reduzir o custo associado às fontes e sensores. Desta forma é possível criar novas perspectivas para os VEs, especialmente para os do tipo NEV como é o caso do VEIL, esperando que seu custo seja reduzido e a sua potência possa ser melhor aproveitada sem riscos de danos à vida útil das baterias.

Para trabalhos futuros são temas sugeridos: uma função de custo que considere o mapa de eficiência do sistema; implementação do EKF através do uso de ferramentas mais avançadas, tais como a dSPACE; elevação do nível de potência experimental; desenvolvimento de uma Representação Energética Macroscópica (*Energetic Macroscopic Representation - EMR*); desenvolvimento de código em C++ para implementação em microcontroladores; e melhoria da tolerância à falhas.



# Bibliografia

- [1] No sitio <http://www.dee.isec.pt/veil/>. (Acedido em 04.09.13).
- [2] No sitio <http://www.dee.isec.pt/veil/mesmoev.htm>. (Acedido em 04.09.13).
- [3] ANDRÉ, M. The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. *The Science of the total environment 334-335* (Dec. 2004), 73–84.
- [4] AZIB, T., BETHOUX, O., REMY, G., MARCHAND, C., AND BERTHELOT, E. An Innovative Control Strategy of a Single Converter for Hybrid Fuel Cell/Supercapacitor Power Source. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 57, 12 (Dec. 2010), 4024–4031.
- [5] BLUM, C., PUCHINGER, J., RAIDL, G. R., AND ROLI, A. Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization: A survey. *Applied Soft Computing* 11, 6 (Sept. 2011), 4135–4151.
- [6] CHAN, C. C., BOUSCAYROL, A., AND CHEN, K. Electric, hybrid and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 2, pp.589–598, February 2010.
- [7] CHAN, C. C., WONG, Y., BOUSCAYROL, A., AND CHEN, K. Powering sustainable mobility: Roadmaps of electric, hybrid and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, April 2009.
- [8] DE CASTRO, R., ARAUJO, R. E., TROVAO, J. P. F., PEREIRINHA, P. G., MELO, P., AND FREITAS, D. Robust DC-Link Control in EVs With Multiple Energy Storage Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 61, 8 (Oct. 2012), 3553–3565.
- [9] DE MELO H.N, J.P, T., AND P.G, P. Batteries usability for electric vehicle powertrain. *Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE)*, pp.1–7, 7–9 July 2011.
- [10] DESAI, C., AND WILLIAMSON, S. Comparative study of hybrid electric vehicle control strategies for improved drivetrain efficiency analysis. *IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC)*, pp.1–6, 22–23 October 2009.

- [11] EBERHART, R., AND KENNEDY, J. A new optimizer using particle swarm theory. In *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine And Human Science* (1995), pp. pp.39–43.
- [12] EBERHART, R. C., SIMPSON, P. K., AND DOBBINS, R. W. Computational intelligence pc tools. *MA: Academic Press Professional*, (1996), Boston.
- [13] E.L. TONKOV. Riccati equation. *Encyclopedia of Mathematics*. [http://www.encyclopediaofmath.org/index.php/Riccati\\_equation](http://www.encyclopediaofmath.org/index.php/Riccati_equation).
- [14] EUROPEAN COMMISSION. White paper on transport: Roadmap to a single european transport area - towards a competitive and resource efficient transport system. [Online]. Disponível em: <http://ec.europa.eu/transport/themes/>. (Acedido em 28.08.13).
- [15] EUROPEAN COUNCIL. Presidency conclusions. 8-9 March 2007. [Online]. Disponível em: [http://ec.europa.eu/archives/european-council/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/archives/european-council/index_en.htm). (Acedido em 28.08.13).
- [16] GASPAR-CUNHA, A., TAKAHASHI, R., AND ANTUNES, C. H. *Manual de Computação Evolutiva e Metaheurística*, 1ª ed. Imprensa da Universidade de Coimbra e Editora da Universidade Federal de Minas Gerais, Junho 2012.
- [17] GUIBERT, A. (SAFT GROUPE SA). Batteries and supercapacitor cells for the fully electric vehicle. Smart Systems Integration Conference, Brussels, 17 June 2009.
- [18] GUZZELLA, L., AND SCIARRETTA, A. Vehicle propulsion systems-introduction to modeling and optimization. Springer, Heidelberg (2005).
- [19] IDOUMGHAR, L., MELKEMI, M., SCHOTT, R., AND AOUAD, M. I. Hybrid PSO-SA Type Algorithms for Multimodal Function Optimization and Reducing Energy Consumption in Embedded Systems. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing 2011* (2011), 1–12.
- [20] IEA. Key world energy statistics. 2011 edition.
- [21] IEA. World energy outlook 2010. OCDE, 2010.
- [22] INFINEON. Primestack: Documentation and operating instructions.
- [23] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Technology roadmap - electric and plug-in hybrid electric vehicles. June, 2011.
- [24] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Iso 6469-1:2009: Electric road vehicles - safety specifications - part 1: On-board electrical energy storage. pp. 9, September 2009.

- [25] JAMILI, A., SHAFIA, M. A., AND TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R. A hybrid algorithm based on particle swarm optimization and simulated annealing for a periodic job shop scheduling problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 54, 1-4 (Sept. 2010), 309–322.
- [26] KALMAN, R. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering* 82, D (1960), 45–45.
- [27] KHALIGH, A., AND LI, Z. Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 59, 6 (July 2010), 2806–2814.
- [28] KIRKPATRICK, S., GELATT, C. D., AND VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220 (1983), 671–680.
- [29] LEM. Current Transducer HY 25-P - Technical Datasheet.
- [30] LEM. Voltage Transducer LV 25-P - Technical Datasheet.
- [31] MACHADO, F., TROVÃO, J. P., AND ANTUNES, C. H. DC-Link Stability Control for Dual-Source Electric Vehicles using an Extended Kalman Filter. In *39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)* (November 2013).
- [32] MARIETHOZ, S., ALMER, S., BAJA, M., BECCUTI, A. G., PATINO, D., WERNRUD, A., BUISSON, J., CORMERAIS, H., GEYER, T., FUJIOKA, H., JONSSON, U. T., MORARI, M., PAPAFOOTI, G., RANTZER, A., AND RIEDINGER, P. Comparison of Hybrid Control Techniques for Buck and Boost DC-DC Converters. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 18, 5 (Sept. 2010), 1126–1145.
- [33] MAXWELL. Boostcap ultracapacitor modules. Doc. 1009362, Maxwell Technologies, USA. [Online]. Disponível em: <http://www.maxwell.com> (Acedido em 28.08.2013).
- [34] MENDES, R. *Population Topologies and Their Influence in Particle Swarm Performance*. PhD thesis, Universidade do Minho, 2004.
- [35] MITCHELL, D. *DC-DC Switching Regulator Analysis*. McGraw Hill Higher Education, 1988.
- [36] MOHAN, N., M., U. T., AND ROBBINS, W. P. Power electronics: Converters, applications and design. (1989) John Wiley & Sons Inc.
- [37] MOREIRA, C. O., SILVA, F. A., PINTO, S. F., AND SANTOS, M. B. Digital LQR control with Kalman Estimator for DC-DC Buck converter. In *2011 IEEE EUROCON - International Conference on Computer as a Tool* (Apr. 2011), no. 1, IEEE, pp. 1–4.

- [38] NATIONAL INSTRUMENTS. CompactRIO Developers Guide - Recommended LabVIEW Architectures and Development Practices for Machine Control Applications. December 2009.
- [39] NESSCAP. Ultracapacitor Datasheet: 100F/2.7V.
- [40] OLM, J. M., ROS-OTON, X., AND SHTESSEL, Y. B. Stable inversion of abel equations: Application to tracking control in dc-dc nonminimum phase boost converters. *Automatica* 47, 1 (Jan. 2011), 221–226.
- [41] PEREIRINHA, P. G., AND TROVÃO, J. P. Comparative study of multiple energy sources utilization in a small electric vehicle. *Proceedings of the 3rd European Ele-Drive Transportation Conference EET-2008*, Geneva, March 11–13, 2008.
- [42] SAFT. Smart vh module. Saft Rechargeable Battery Systems, Doc N°11088-2-0508, France. [Online]. Disponível em: <http://www.saftbatteries.com> (Acedido em 28.08.2013).
- [43] 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.
- [44] SEW EURODRIVE. Operating instructions - movidrive mdx60b - 61b. jan 2010.
- [45] SHI, Y., AND EBERHART, R. A modified particle swarm optimizer. *The 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp.69–73, 4–9 May 1998.
- [46] SILVA, M., TROVAO, J., AND PEREIRINHA, P. Implementation of a multiple input dc-dc converter for electric vehicle power system. *Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE)*, pp.1–8, 7–9 July 2011.
- [47] THOUNTHONG, P., CHUNKAG, V., SETHAKUL, P., DAVAT, B., AND HINAJE, M. Comparative Study of Fuel-Cell Vehicle Hybridization with Battery or Supercapacitor Storage Device. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 58, 8 (Oct. 2009), 3892–3904.
- [48] THOUNTHONG, P., RAËL, S., AND 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.
- [49] THOUNTHONG, P., SETHAKUL, P., RAEL, S., AND DAVAT, B. Control of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid source for vehicle applications. In *Industrial Technology, 2009. ICIT 2009. IEEE International Conference on* (2009), pp. 1–6.

- [50] TROVÃO, J. P. F., SANTOS, V. D. N., PEREIRINHA, P. G., JORGE, H. M., AND ANTUNES, C. H. A Simulated Annealing Approach for Optimal Power Source Management in a Small EV. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* (2013).
- [51] TROVÃO, J. P. *Otimização e gestão de múltiplas fontes de energia em veículos elétricos*. PhD thesis, Engenharia Electrotécnica (Sistemas de Energia). Universidade de Coimbra, 2013.
- [52] TROVÃO, J. P., PEREIRINHA, P., AND JORGE, H. Design methodology of energy storage systems for a small electric vehicle. *World Electric Vehicle Journal*, Volume 3 (2009), ISSN 2032–6653.
- [53] WELLS, P. R. A. The peak in world oil supply. September 2008. (Available at “The Last Trillion Barrels”, EV World, Open Access Article Originally Published: September 27, 2008). [Online]. Disponível em: [www.evworld.com/article.cfm?storyid=1535](http://www.evworld.com/article.cfm?storyid=1535). (Acedido em 28.08.13).
- [54] WILLIAMS, J. L. Oil price history and analysis. [Online]. Disponível em: [www.wtrg.com/prices.htm](http://www.wtrg.com/prices.htm). (Acedido em 28.08.13).
- [55] YANG, G., CHEN, D., AND ZHOU, G. A new hybrid algorithm of particle swarm optimization. *Lecture Notes in Computer Science 4115* (2006), 50–60.
- [56] ZAKIPOUR, A., AND SALIMI, M. Two-loop sensorless control of flyback converter using Unscented Kalman Filter. *IV International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems* (2012), 446–451.