

Nelson Viegas Ferraz

Conceção de Sistema de Baixo Custo para Avaliação
do Comportamento e Monitorização dos Estados de
Carga e de Saúde de Baterias LiFePO4

Tese de Mestrado

Mestrado em Eng. Eletrotécnica-Energia e Automação Industrial

Professor Doutor Paulo Costa

Professor Doutor Vasco Santos



À minha esposa e aos meus queridos filhos,
Sónia Mendes, Inês e Francisco Ferraz.

“A maior glória não é ficar de pé,
mas levantar-se cada vez que se cai.”

Confúcio

RESUMO

As baterias de Lítio–Fosfato de Ferro (LiFePO_4) têm vindo a assumir-se como uma das mais promissoras tecnologias de armazenamento de energia, particularmente para aplicações de pequena escala relacionadas com a mobilidade elétrica e com os sistemas de aproveitamento de energias renováveis. As características que estas baterias apresentam são favoráveis a tais aplicações, nomeadamente o facto de esta tecnologia ser segura, durável, apresentar reduzido impacto ambiental, possuir um rendimento elevado e uma taxa de autodescarga reduzida.

O presente trabalho apresenta uma descrição da tecnologia LiFePO_4 e descreve as respetivas vantagens e inconvenientes face a outras tecnologias de armazenamento. Adicionalmente é apresentado um conjunto de ensaios efetuados com baterias LiFePO_4 , os quais permitiram caracterizar o comportamento de baterias deste tipo, nomeadamente no que se refere à tensão (em carga e em vazio) e ao rendimento do processo de carga e descarga. Para o efeito foi desenvolvida uma plataforma de ensaios dotada de um banco de cargas, um carregador e um sistema de controlo, monitorização e registo de dados.

A referida plataforma e os dados recolhidos nos ensaios serviram de suporte ao desenvolvimento e teste de um algoritmo capaz de estimar e transmitir, a um sistema de gestão de energia, o estado de um sistema de armazenamento baseado em baterias LiFePO_4 , nomeadamente no que se refere ao estado de carga (SoC) e de saúde (SoH). O algoritmo desenvolvido baseia-se no método da contagem de *Coulomb*, tendo sido integrado um mecanismo de ajuste automático e dinâmico.

O algoritmo foi testado usando a plataforma desenvolvida, a qual foi parametrizada para simular um consumidor doméstico alimentado por um sistema isolado da rede elétrica constituído por um gerador fotovoltaico e por um sistema de armazenamento baseado em baterias LiFePO_4 . Os testes efetuados mostram que o algoritmo permitiu estimar o SoC e o SoH de uma bateria com um erro máximo de 1,5 e 3%, respetivamente.

ABSTRACT

Lithium-Iron Phosphate (LiFePO_4) batteries have been considered one of the most promising technologies for energy storage, particularly concerning the small-scale applications related to electric mobility and renewable energy systems. The features of these batteries favor such applications, namely the safety and durability of this technology, the high efficiency and low self-discharge rate and the low environmental impact resulting from the use of that technology.

This dissertation presents a description of the LiFePO_4 technology and describes its advantages and disadvantages in comparison to other storage technologies. Moreover, it presents a set of experiments carried out with LiFePO_4 batteries, which allowed to characterize the behavior of the tested batteries, namely regarding the voltage (open-circuit and load voltage) and the efficiency of the charging and discharging processes. For this purpose, a test platform equipped with a load bank, a charger circuit, and a system devoted to control the charging/discharging processes as well as to monitor and store relevant data, was developed.

The platform and the data collected in the experiments were then used to support the implementation and test of an algorithm able to estimate, in real time, the state of a storage system based on LiFePO_4 batteries, specifically concerning the state of charge (SoC) and the state of Health (SoH). That algorithm is based on the Coulomb counting method. In order to mitigate the difficulties that characterize this method, an automatic and dynamic adjustment mechanism was included. Additionally, the implemented solution has the ability to communicate the SoC and the SoH to a power management system (Power Box).

The algorithm was tested using the developed platform, which has been parameterized to mimic a domestic grid-isolated consumer with a photovoltaic (PV) generator as the supply source. In order to satisfy the consumption that occurs at periods without PV generation, an energy storage system composed by LiFePO_4 batteries was assumed. The performed tests have shown that the algorithm estimated the SoC and the SoH of the battery bank with a maximum error of 1,5 and 3%, respectively.

PALAVRAS CHAVE

Sistemas de Armazenamento de Energia (ESS)

Baterias LiFePO₄

Estado de carga (SoC)

Estado de saúde (SoH)

Contagem de *Coulomb*

Energia renovável

Sistemas autônomos

KEY WORDS

Energy Storage Systems (ESS)

LiFePO₄ batteries

State of Charge (SoC)

State of Health (SoH)

Coulomb counting

Renewable energy

Autonomous systems

AGRADECIMENTOS

Dirijo os meus sinceros agradecimentos ao Professor Doutor Paulo Costa, pelo seu admirável empenho enquanto orientador, e pelo espírito crítico que especialmente contribuiu para a melhoria deste trabalho. Ao Professor Doutor Vasco Santos, o meu agradecimento por todas as sugestões facultadas, nomeadamente quanto à pesquisa bibliográfica e abordagem ao tema principal do trabalho.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Eletrotécnica fico grato, em especial aos Engenheiros João Ôlas e Paulo Correia, pela vossa disponibilidade.

Pelo companheirismo e espírito de entreatajuda, um cordial abraço a todos os colegas da 1ª edição do MEE, em especial ao pessoal da “velha guarda”.

Aos meus lindos filhos e esposa, um carinho especial pela motivação e conforto que sempre me deram. Sem o vosso incondicional apoio, este trabalho não teria sido possível. Obrigado!

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
ÍNDICE DE QUADROS	xxi
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Interesse e fundamentação do trabalho	3
1.3 Objetivos e resultados esperados.....	5
2. Sistemas de armazenamento de energia	7
2.1 Tecnologias de armazenamento de energia.....	8
2.1.1 Armazenamento de energia por bombagem hidráulica (PHES).....	8
2.1.2 Armazenamento de energia em ar comprimido (CAES)	9
2.1.3 Armazenamento de energia em baterias (BES).....	10
2.1.4 Armazenamento de energia em baterias de fluxo (FBES).....	12
2.1.5 Armazenamento de energia num volante de inércia (FES).....	13
2.1.6 Armazenamento de energia em supercondensadores (SCES).....	15
2.1.7 Armazenamento de energia por supercondutividade magnética (SMES)	16
2.1.8 Armazenamento de energia no Hidrogénio (HES).....	17
2.2 Características dos sistemas de armazenamento de energia.....	18
2.3 Comparação das tecnologias de armazenamento	19
3. Tecnologia de armazenamento adotada	23
3.1 Estudo das baterias LiFePO ₄	26
3.1.1 Esquema elétrico equivalente.....	28
3.2 Comportamento e características das baterias LiFePO ₄	29
3.2.1 Perfil de carga.....	29
3.2.2 Perfil de descarga.....	31
3.2.3 Influência da temperatura.....	31
3.2.4 Característica de funcionamento dinâmico	32

ÍNDICE GERAL

3.2.5	Tensão em circuito aberto (OCV) e histerese	33
3.2.6	Descarga a altas frequências com diferentes formas de onda.....	34
3.2.7	Durabilidade e taxa de autodescarga	35
3.3	Métodos de carregamento das baterias LiFePO ₄	37
3.4	Sistema de Gestão de Baterias (BMS).....	38
3.5	Métodos de estimativa do SoC.....	39
3.6	Estado de Saúde (SoH) de uma bateria.....	41
4.	Plataforma desenvolvida.....	43
4.1	Controlador e <i>Datalogger</i>	44
4.2	Dispositivos de medição	45
4.3	Carregador de corrente constante	47
4.4	Sistema de descarga	49
4.5	Algoritmo desenvolvido para realização dos ensaios	50
4.6	Algoritmo de estimativa do SoC e do SoH.....	52
4.6.1	Mecanismo de autoajuste dinâmico do algoritmo	57
4.7	Gama de operação da plataforma	59
4.7.1	Adequação do sistema a outras tecnologias de baterias.....	59
5.	Ensaio realizado à bateria em teste.....	61
5.1	Organização e motivo dos ensaios.....	61
5.2	Características das baterias em teste.....	62
5.3	Ensaio estático (corrente constante).....	65
5.3.1	Perfil de carga.....	66
5.3.2	Perfil de descarga.....	68
5.3.3	Evolução da tensão em vazio	69
5.3.4	Contagem da carga.....	70
5.3.5	Cálculo do rendimento global (em regime estático).....	71
5.4	Ensaio dinâmico (corrente variável)	73
5.4.1	Perfil dinâmico de carga/descarga.....	73
5.4.2	Contagem da carga e rendimento em regime dinâmico.....	75
5.5	Discussão de resultados.....	76
6.	Ensaio realizado ao algoritmo de estimativa do SoC e do SoH	77
6.1	Sistema de teste.....	77

6.2	Perfil adotado para realização dos ensaios.....	81
6.3	Descrição dos ensaios realizados.....	82
6.4	Simulação do envelhecimento da bateria.....	87
6.5	Discussão de resultados	89
7.	Conclusões	91
7.1	Proposta para melhorias e trabalho futuro	94
	Referências	97
	Anexo 1.....	101
	Anexo 2.....	111
	Anexo 3.....	121
	Anexo 4.....	125
	Anexo 5.....	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Principais elementos que constituem uma <i>smart grid</i>	5
Figura 2-1: Classificação dos sistemas de armazenamento de energia.....	8
Figura 2-2: Principais componentes de um PHES.....	9
Figura 2-3: Princípio de funcionamento de um CAES	10
Figura 2-4: Princípio de funcionamento de uma célula eletroquímica	11
Figura 2-5: Esquema genérico do funcionamento de uma bateria de fluxo.....	12
Figura 2-6: Principais componentes de um FES	14
Figura 2-7: Princípio de funcionamento de um ECDL.....	15
Figura 2-8: Esquema conceptual de um SMES de pequena escala	16
Figura 2-9: Princípio de funcionamento de uma célula de combustível.....	17
Figura 2-10: Tecnologias de armazenamento em função do campo de aplicação	20
Figura 2-11: Tecnologias de armazenamento em função da eficiência e durabilidade	20
Figura 2-12: Tecnologias de armazenamento em função da densidade de energia.....	21
Figura 2-13: Tecnologias de armazenamento em função do custo de investimento	21
Figura 2-14: Tecnologias de armazenamento em função do custo estimado por ciclo	22
Figura 3-1: Comparação das tecnologias de baterias de Lítio.....	26
Figura 3-2: Princípio de funcionamento de uma bateria LiFePO ₄	27
Figura 3-3: Mineral de LiFePO ₄ visto ao microscópio eletrónico.....	27
Figura 3-4: Disposição atômica do LiFePO ₄	27
Figura 3-5: Esquema elétrico equivalente de uma bateria LiFePO ₄	28
Figura 3-6: Evolução da tensão e corrente de carga em função do tempo.....	30
Figura 3-7: Tensão em função da capacidade para diferentes correntes de carga.....	30
Figura 3-8: Tensão em função da capacidade para diferentes correntes de descarga.....	31
Figura 3-9: Curvas de descarga em função da temperatura	32
Figura 3-10: Tempo de descarga, capacidade e resistência em função da temperatura	32
Figura 3-11: Perfil de descarga dinâmico	33
Figura 3-12: OCV em função da temperatura e da corrente de carga/descarga.....	33
Figura 3-13: Histerese associada a uma célula LiFePO ₄	34
Figura 3-14: Capacidade fornecida em função da frequência (onda trapezoidal).....	35
Figura 3-15: Capacidade fornecida em função da frequência (onda em dente de serra).....	35
Figura 3-16: Capacidade fornecida em função da frequência (onda triangular).....	35
Figura 3-17: Perda da capacidade de armazenamento em função do nº de ciclos	36
Figura 3-18: Perda de capacidade em função do tempo de armazenamento e do SoC	36
Figura 3-19: Comparação dos métodos de carga CC e CV.....	38
Figura 3-20: Principais constituintes de um BES.....	38
Figura 4-1: Esquema funcional dos módulos constituintes da plataforma.	43
Figura 4-2: Fotografia da plataforma, após montagem dos componentes.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4-3: Principais características do Arduino Uno R2	45
Figura 4-4: Detalhe da montagem do Arduino e do <i>datalogger</i>	45
Figura 4-5: Esquema do circuito divisor de tensão.....	46
Figura 4-6: Principais características do transdutor de corrente.....	46
Figura 4-7: Característica de saída dos MOSFET utilizados	47
Figura 4-8: Esquema do circuito de controlo da corrente de carga.	48
Figura 4-9: Resposta de um filtro RC de 1ª ordem, em função de um sinal PWM.....	48
Figura 4-10: Pormenor do banco de cargas.....	49
Figura 4-11: Esquema do <i>driver</i> de potência, constituído por foto-acoplador e relé.	49
Figura 4-12: Fluxograma geral do programa desenvolvido para a realização de ensaios.	51
Figura 4-13: SoC estimado (contagem de <i>Coulomb</i>) em função do SoC real.....	52
Figura 4-14: Algoritmo desenvolvido para estimar o SoC e o SoH de uma bateria.....	54
Figura 4-15: Algoritmo de estimativa do SoC e SoH (aplicação real).	55
Figura 4-16: Tensão de saída do controlador em função do SoC/ SoH.....	56
Figura 4-17: Rotinas responsáveis pelo cálculo e atualização do FCC e do SoH.	57
Figura 5-1: Característica de carga e descarga de uma célula de 10 Ah.....	63
Figura 5-2: Descarga de uma célula de 10 Ah com diferentes <i>C-rate</i> e temperaturas.	63
Figura 5-3: Característica de descarga de uma célula LFP40AHA.....	65
Figura 5-4: Sequência de ações realizadas nos ensaios estáticos.	65
Figura 5-5: Perfil de carga – Tensão em função da capacidade.	67
Figura 5-6: Perfil de carga – Tensão em função do tempo.	67
Figura 5-7: Perfil de descarga – Tensão em função da capacidade.....	68
Figura 5-8: Perfil de descarga – Tensão em função do tempo.	68
Figura 5-9: Evolução da tensão em vazio, após carga/descarga normal.....	69
Figura 5-10: Evolução da tensão em vazio, após carga/descarga adicional.....	70
Figura 5-11: Carga média absorvida pela bateria em função da corrente de carga.....	70
Figura 5-12: Capacidade média fornecida pela bateria em função da corrente de descarga....	71
Figura 5-13: Rendimento médio global da bateria em função da corrente.....	72
Figura 5-14: Rendimento médio por ensaio em função da corrente.....	72
Figura 5-15: Ensaio dinâmico 1 - Tensão e perfil de corrente, em função do tempo.....	73
Figura 5-16: Ensaio dinâmico 2 - Tensão e perfil de corrente, em função do tempo.....	73
Figura 5-17: Ensaio dinâmico 3 - Tensão e perfil de corrente, em função do tempo.....	74
Figura 5-18: Ensaio dinâmico 4 - Tensão e perfil de corrente, em função do tempo.....	74
Figura 5-19: Ensaio dinâmico 5 - Tensão e perfil de corrente, em função do tempo.....	75
Figura 5-20: Evolução da capacidade em função do tempo, por ensaio.....	75
Figura 6-1: Sistema de teste adotado.	77
Figura 6-2: Perfil anual do consumo de energia.....	78
Figura 6-3: Perfil anual de produção PV simulado no PVGIS.....	79
Figura 6-4: Perfil de consumo e produção de energia num dia típico do mês de Dezembro... 79	
Figura 6-5: Perfil de consumo e produção de energia num dia típico do mês de Agosto..... 79	
Figura 6-6: Esquema unifilar do banco de baterias (48 V).	81

Figura 6-7: Perfil típico da corrente aplicada a uma bateria. 81

Figura 6-8: Perfil de teste da corrente aplicada a uma bateria. 82

Figura 6-9: Evolução do SoC, SoH e FCC em função do tempo – ensaio 1..... 83

Figura 6-10: Evolução da tensão de saída em função do tempo – ensaio 1..... 84

Figura 6-11: Evolução do SoC, SoH e FCC em função do tempo – ensaio 2..... 85

Figura 6-12: Evolução do SoC, SoH e FCC em função do tempo – ensaio 3..... 85

Figura 6-13: Evolução da tensão de saída em função do tempo – ensaio 2..... 85

Figura 6-14: Evolução da tensão de saída em função do tempo – ensaio 3..... 86

Figura 6-15: Perfil de teste adotado para o ensaio 4..... 86

Figura 6-16: Evolução do SoC, SoH e FCC em função do tempo – ensaio 4..... 86

Figura 6-17: Evolução da tensão de saída em função do tempo – ensaio 4..... 87

Figura 6-18: Evolução do SoC, SoH e FCC em função do tempo – ensaio 5..... 88

Figura 6-19: Evolução da tensão de saída em função do tempo – ensaio 5..... 88

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3-1: Características das principais tecnologias de baterias.....	25
Quadro 3-2: Principais métodos de carregamento de baterias	37
Quadro 3-3: Resumo dos principais métodos de estimativa do SoC.....	39
Quadro 4-1: Descrição das saídas digitais ativadas por alarme.	55
Quadro 4-2: Parâmetros do algoritmo de estimativa do SoC e do SoH.....	56
Quadro 5-1: Descrição dos ensaios e resultados observados.	62
Quadro 5-2: Resumo das características da bateria GL27H, de 20 Ah	62
Quadro 5-3: Principais características de uma célula de 40 Ah	64
Quadro 5-4: Correntes de carga / descarga a utilizar nos ensaios.	66
Quadro 5-5: Resumo da contagem da carga e do rendimento, por ensaio.....	75
Quadro 6-1: Resumo dos ensaios realizados ao algoritmo de estimativa do SoC e SoH.	83
Quadro 6-2: Comparação entre a carga medida e a carga estimada.	89
Quadro 6-3: Comparação entre o SoH teórico e o SoH estimado.....	90

1. Introdução

1.1 Enquadramento

O armazenamento de energia é um conceito muito vasto que remonta aos primórdios do próprio universo. Atendendo à “Lei da conservação da massa e da energia” e à célebre frase de *Lavoisier* “*No Universo nada se perde, nada se cria, tudo se transforma*”, podemos facilmente entender que, em todos os processos que nos envolvem, existe transferência de energia. Essa energia que transita de sistema em sistema, partícula em partícula, é frequentemente armazenada sob as mais diversas formas: O efeito de estufa criado pela atmosfera terrestre armazena o calor proveniente do sol; As moléculas de ATP (Adenosina Trifosfato) contidas no interior das células armazenam a energia necessária à vida. No limite, toda a matéria contém (e armazena) energia.

Desde sempre que a energia é armazenada pela Humanidade. De certa forma, os povos antigos recorriam a técnicas de armazenamento de energia que, embora rudimentares, foram fundamentais ao desenvolvimento e sustentabilidade de civilizações. Inicialmente armazenavam-se os alimentos e os combustíveis que continham a energia necessária à sobrevivência. Foram construídas represas de água que armazenavam o potencial gravítico para posteriormente ser libertado sob a forma de energia cinética. Os primeiros relógios mecânicos funcionavam graças à energia armazenada em pesos ou molas. A história está repleta de engenhos que utilizavam as mais diversas formas de armazenamento de energia, sendo que o princípio básico é sempre o mesmo: Aproveitar uma fonte de energia que possa ser armazenada para posteriormente, e na medida do necessário, ser libertada.

Por volta do século *XVII* são dados os primeiros avanços científicos na área da eletricidade e a primeira pilha¹ é construída em 1800 por *Alessandro Volta* [1]. Embora o uso generalizado da eletricidade tenha tardado até aos finais do século *XIX*, é com a descoberta da pilha de *Volta* que surge um novo conceito: **O armazenamento de energia elétrica.**

O armazenamento de energia pode ser aplicado visando diversas funções, podendo resultar em benefícios variados, destacando-se [2] [3]:

- **O desvio temporal entre a produção e o consumo de eletricidade** – Envolve o desfasamento temporal entre a compra e a venda de energia. Este conceito é frequentemente designado por “comprar barato e vender caro”. A energia, adquirida a baixo custo, é armazenada e posteriormente vendida a um preço mais elevado;
- **O fornecimento de capacidade à rede** – O fornecimento de energia previamente armazenada durante as horas de maior consumo (pontas do diagrama de cargas) pode reduzir a capacidade de produção instalada;
- **O seguimento de carga** – Comparativamente às centrais de produção convencionais, os sistemas de armazenamento permitem maior flexibilidade e dinamismo no que respeita às variações do diagrama de cargas (menor tempo de resposta);
- **A reserva de energia** – A operação técnica dos sistemas elétricos impõe a existência de uma reserva de produção, frequentemente designada por reserva girante. Frequentemente esta reserva é estabelecida para que seja, pelo menos, igual à maior central em funcionamento na rede. Para além de proporcionar reserva “girante”, o armazenamento pode suportar operações de restabelecimento da rede após um corte (*black start*);
- **A regulação de tensão** – Tradicionalmente, a regulação de tensão da rede é realizada pelas próprias centrais de produção e, localmente, por intermédio de baterias de condensadores (injeção de energia reativa). Porém, comparativamente aos sistemas tradicionais, os sistemas de armazenamento atuais permitem maior dinamismo na regulação do fator de potência (em virtude dos progressos na área da eletrónica de potência, sistemas de controlo e de comunicação);
- **O apoio à transmissão de energia** – O armazenamento de energia permite melhorar o desempenho da rede de transporte e de distribuição, uma vez que atua na compensação de várias anomalias e distúrbios (quedas de tensão, instabilidade e ressonância síncrona);
- **O descongestionamento da rede** – Nas horas de maior consumo, a energia pode ser fornecida localmente por um dispositivo de armazenamento, evitando-se o congestionamento das redes elétricas;

¹ A pilha de *Volta* é constituída por placas metálicas intercaladas, de Cobre e de Zinco, imersas numa solução de ácido sulfúrico.

- **O diferimento de investimentos** – A redução da capacidade instalada e o descongestionamento das próprias redes pode ser vantajoso no sentido em que se reduz a necessidade de construir ou ampliar centrais de produção, linhas de transporte e de distribuição bem como de subestações;
- **A gestão dos custos da energia** – Um consumidor final dotado de um sistema de armazenamento pode fazer uma gestão mais eficaz dos seus custos energéticos, ou seja, pode comprar a energia em períodos de menor procura (preço mais baixo) e, sobretudo, evitar o consumo nas horas de maior procura (preço consideravelmente mais elevado);
- **A fiabilidade e a qualidade de serviço** – O armazenamento permite maior fiabilidade e qualidade de serviço. Um utilizador de um sistema de armazenamento pode ficar imune à indisponibilidade da rede e a outros efeitos indesejáveis (cavas de tensão, flutuação da frequência e da tensão, harmónicos ou baixos fatores de potência) bem como adicionar à potência contratada, a potência disponibilizada pelo sistema de armazenamento (para suprir picos de consumo);
- **A penetração de fontes renováveis de energia** – O armazenamento de energia em grande escala desempenha um papel fundamental no que respeita à penetração das fontes renováveis de energia que, como se sabe, são voláteis e intermitentes. Para se manter o equilíbrio entre a produção e o consumo é necessário lidar com o frequente desfaseamento temporal entre a produção e o consumo - é neste âmbito que o armazenamento se destaca;
- **Outros benefícios** - Redução das perdas na rede; aumento da energia disponível; redução do risco de investimento nas redes de transporte e distribuição; dinamização da economia no seguimento dos investimentos e criação de novos postos de trabalho; correção do fator de potência a nível local; redução da geração com base em combustíveis fósseis e redução de emissões gasosas [3].

1.2 Interesse e fundamentação do trabalho

Conforme descrito na secção 1.1, o armazenamento de energia pode ser utilizado visando diversas funções. No caso de sistemas de alimentação autónomos, o armazenamento de energia sempre foi uma parte crucial ao respetivo funcionamento, particularmente nos sistemas baseados em fontes de energia voláteis como a energia solar fotovoltaica ou a energia eólica.

Nos sistemas elétricos interligados (convencionais), por sua vez, o armazenamento de energia tem-se cingido, fundamentalmente, ao armazenamento nas centrais hidroelétricas dotadas de albufeira. Contudo, os desenvolvimentos tecnológicos e as alterações na forma de funcionamento destes sistemas, particularmente as ligadas à liberalização do setor elétrico,

têm vindo a reforçar a necessidade de utilização de outras tecnologias para armazenamento de energia, visando melhorar o desempenho do sistema elétrico no que se refere à sua operação, à otimização das infraestruturas de rede e à própria integração das fontes renováveis de energia.

Efetivamente, o armazenamento de energia em sistemas de média e pequena dimensão tem vindo a ganhar uma importância significativa no âmbito do desenvolvimento das redes elétricas inteligentes (*smart grids*) que, entre outros aspetos, potenciam a utilização de conceitos emergentes como a microgeração, as microredes ou as “*Virtual Power Plants*”.

As tecnologias de armazenamento associadas ao desenvolvimento das redes inteligentes e à crescente liberalização do setor energético potenciam também um comportamento mais ativo dos consumidores e dos próprios comercializadores de eletricidade. Com efeito o armazenamento de energia permitirá flexibilizar o perfil de carga dos consumidores, reforçando a capacidade de resposta às variações nos preços da energia (utilizando energia previamente armazenada). Por outras palavras, o armazenamento de energia pode ser utilizado pelos consumidores de eletricidade, com base em sistemas de gestão de energia adequadamente concebidos, para responderem aos preços da energia, contribuindo desta forma para o adensar do conceito de resposta da procura (*demand response*). Os comercializadores de eletricidade poderão, neste âmbito e no seio do atual contexto de desenvolvimento dos mercados de energia, definir novas formas de tarifação da energia, nomeadamente recorrendo aos preços da energia em tempo real.

Os conceitos referidos tenderão a alterar significativamente a forma de operação dos sistemas elétricos, nomeadamente as relações técnico-económicas entre os consumidores, os distribuidores e os comercializadores de energia. Importa frisar que muitos dos conceitos referidos serão mais bem-sucedidos se for possível a integração de sistemas de armazenamento de energia junto das instalações de consumo. Por exemplo, o conceito de condomínio energético (extensão do conceito de microrede) impõe a utilização de sistemas de armazenamento de energia (além dos sistemas necessários para fornecer potência elevada por curtos períodos de tempo) de forma a melhorar as potencialidades destas entidades. Estes sistemas de armazenamento poderão estar concentrados ou distribuídos (junto de cada consumidor que integra a microrede).

Importa ainda relevar que os consumidores dotados de capacidade de armazenar energia poderão fornecer serviços importantes ao sistema elétrico, nomeadamente: reservas, gestão de congestionamentos, controlo de tensão, mitigação de algumas dificuldades originadas pela volatilidade da produção de algumas tecnologias, ações de correção do fator de carga, etc.

Naturalmente que o fornecimento deste tipo de serviços requer a existência de redes elétricas de distribuição mais capacitadas que as atualmente existentes, o que tem levado ao rápido desenvolvimento do conceito de redes inteligentes. A Figura 1-1 ilustra, de forma esquemática, algumas das características de uma rede elétrica inteligente (*smart grid*). Note-se que esta estrutura permite o funcionamento coordenado de várias entidades (geradores,

consumidores, microrredes, sistemas de armazenamento, etc.) por forma a otimizar o desempenho do sistema.

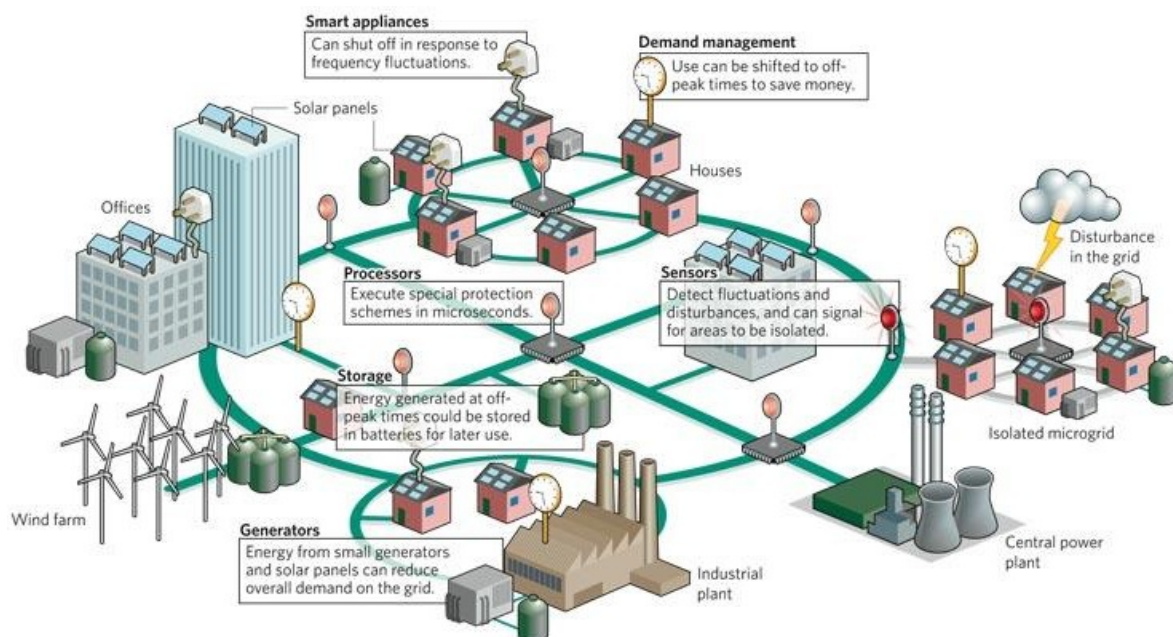


Figura 1-1: Principais elementos que constituem uma *smart grid* [4].

A presente dissertação insere-se neste âmbito sendo motivada pela importância do armazenamento de energia no contexto dos atuais sistemas elétricos isolados e interligados.

1.3 Objetivos e resultados esperados

O presente trabalho tem como principais objetivos a avaliação do desempenho das baterias LiFePO_4 para armazenamento de energia em pequena escala, nomeadamente no contexto das microrredes e das redes elétricas de distribuição inteligentes (*smart grids*) e o desenvolvimento de um algoritmo capaz de estimar e transmitir, em tempo real, o estado de carga (SoC) e de saúde (SoH) de um sistema de armazenamento baseado em baterias LiFePO_4 a um dispositivo de gestão de energia doméstico (*power box*).

Para tal, o trabalho foi desenvolvido de acordo com o seguinte plano de trabalhos:

- Numa primeira fase, realizou-se o estudo das principais tecnologias de armazenamento de energia com aplicação em sistemas elétricos, com especial incidência na tecnologia de baterias LiFePO_4 .
- A segunda fase envolveu a realização de um conjunto de ensaios com o intuito de caracterizar a tecnologia LiFePO_4 . Para o efeito, foi desenvolvida uma plataforma com a capacidade de efetuar cargas e descargas sucessivas a uma bateria de teste.

- O estudo de um método para estimar o SoC e o SoH de baterias LiFePO₄, assim como a caracterização de um perfil representativo de um sistema de armazenamento de energia de pequena escala, constituíram a terceira fase do trabalho.
- Na quarta e última fase, decorreu o desenvolvimento e teste de um algoritmo de estimativa do estado de carga e de saúde de baterias LiFePO₄.

Os resultados esperados envolvem a obtenção de conclusões acerca da viabilidade da tecnologia de baterias LiFePO₄ enquanto meio de armazenamento de energia em pequena escala, nomeadamente quando comparada com outras tecnologias de armazenamento.

Quanto à componente prática do trabalho, é esperado que o algoritmo realize a estimativa do SoC e do SoH da bateria de teste em tempo real com uma margem de erro que se enquadre no tipo de aplicação a que se destina. Será desejável que o custo do sistema de controlo, medição e transmissão de dados se mantenha relativamente baixo e que o algoritmo seja genérico no sentido de se adequar a diferentes sistemas de armazenamento baseados em baterias LiFePO₄.

2. Sistemas de armazenamento de energia

Um sistema de armazenamento de energia (“*Energy Storage System*” - ESS) é um dispositivo dotado de capacidade para armazenar energia com o objetivo de, posteriormente a libertar (naturalmente que apenas é libertada parte da energia previamente armazenada) [5]. Quanto ao meio ou natureza física do armazenamento, atualmente os ESS são classificados como [6]:

- **Sistemas mecânicos** – A energia é armazenada sob a forma de energia cinética. Distinguem-se os sistemas de inércia (*flywheels*);
- **Sistemas hidráulicos** – A energia armazena-se sob a forma de energia potencial. Os sistemas de bombagem hidráulica são um exemplo;
- **Sistemas pneumáticos** – Baseados principalmente nas tecnologias de ar comprimido;
- **Sistemas elétricos** – Caracterizam-se por armazenar diretamente a energia elétrica sem qualquer tipo de conversão associada. São exemplo os supercondensadores;
- **Sistemas magnéticos** – A energia é armazenada em campos magnéticos criados por uma corrente DC (supercondutividade magnética);
- **Sistemas eletroquímicos** – A energia é armazenada num eletrólito através de processos eletroquímicos. Enquadram-se neste tipo todas as tecnologias de baterias e pilhas de combustível (Hidrogénio).

É também frequente classificarem-se os sistemas de armazenamento de energia segundo o tipo de armazenamento – direto ou indireto (veja-se a Figura 2-1).

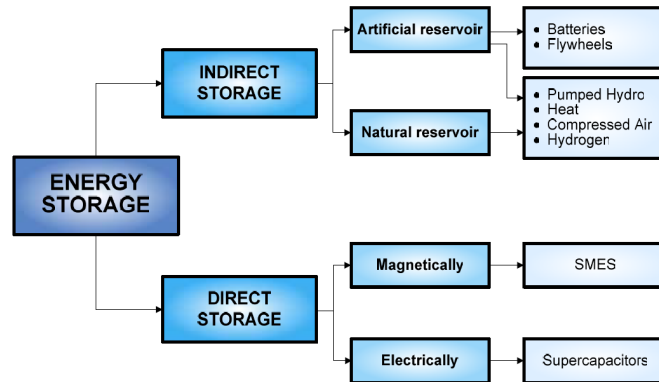


Figura 2-1: Classificação dos sistemas de armazenamento de energia [6].

2.1 Tecnologias de armazenamento de energia

2.1.1 Armazenamento de energia por bombagem hidráulica (PHES)

Um sistema de armazenamento de energia por bombagem hidráulica (“*Pumped Hydroelectric Energy Storage*” - PHES) baseia-se no princípio de que uma massa de água contida a uma determinada altura armazena energia potencial. Há várias décadas que se usa este princípio nas barragens, convertendo a energia potencial da água em energia elétrica [7].

A energia E (em MWh) de um volume de água V (em m^3) contido a uma determinada altura H (em metros) é dada pela Equação (2-1), onde ρ é densidade da água em kg/m^3 , g é a aceleração da gravidade em m/s^2 e η é a eficiência global do sistema [7]:

$$E = \frac{\rho g H V \eta}{3,6 * 10^9} \quad (2-1)$$

Um PHES convencional é composto por dois reservatórios de água separados verticalmente, conforme exemplificado na Figura 2-2. A energia elétrica é produzida quando a água flui do reservatório superior para o reservatório inferior, através de um grupo turbina-gerador. Revertendo o processo, a energia é armazenada quando a água é bombeada do reservatório inferior para o superior. A geração de energia e a bombagem podem ser realizadas, respetivamente, por turbinas-gerador e bombas, ou por um único grupo reversível [7].

Caso existam condições geográficas favoráveis à construção de um reservatório junto ao mar, é possível construir um PHES cujo reservatório inferior é o próprio mar. Atualmente, os PHES apresentam rendimentos globais da ordem dos 70 a 85% e tempos de resposta de apenas alguns minutos desde o arranque inicial, ou 10 a 30 segundos se o sistema se encontrar em *standby* [7].

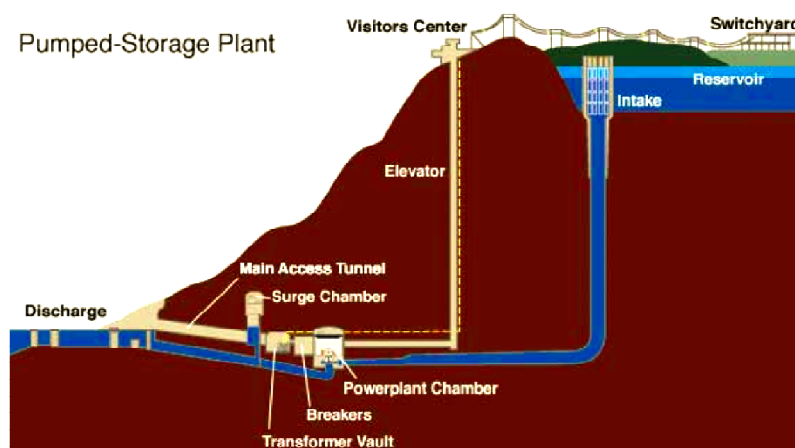


Figura 2-2: Principais componentes de um PHES [7].

Um caso particular de um PHES é um sistema de armazenamento subterrâneo de energia por bombagem hidráulica (UPHES). Um UPHES tem o mesmo princípio de funcionamento de um PHES - dois reservatórios de água separados verticalmente. A principal diferença tem a ver com a localização dos reservatórios: Num UPHES, o reservatório superior situa-se ao nível do solo e o reservatório inferior situa-se em profundidade, no subsolo (normalmente, uma gruta ou caverna natural). A escassez de localizações geográficas favoráveis à construção de um UPHES é o principal inconveniente desta tecnologia [7].

2.1.2 Armazenamento de energia em ar comprimido (CAES)

A tecnologia de armazenamento de energia em ar comprimido (“*Compressed Air Energy Storage*” – CAES) armazena energia sob a forma de ar comprimido em grutas naturais ou reservatórios construídos para o efeito.

Distinguem-se dois tipos de tecnologias: Armazenamento de energia em ar comprimido (CAES) – sistemas de elevada capacidade de armazenamento de energia; Armazenamento de energia em ar comprimido de pequena escala (“*Small Scale CAES*” ou SSCAES).

Num CAES, o processo de armazenamento de energia elétrica consiste na compressão do ar (até 75 Bar) por intermédio de um compressor elétrico. Geralmente o armazenamento do ar comprimido é feito em grutas ou cavernas naturais de grande dimensão. Para otimizar a capacidade de armazenamento, o ar é arrefecido na fase de compressão [8].

A libertação da energia armazenada é efetuada à medida que se extrai o ar do reservatório. Tipicamente, o processo de libertação de energia, ilustrado na Figura 2-3, inicia com o pré-aquecimento do ar num recuperador. O ar aquecido é depois misturado com pequenas quantidades de petróleo ou gás natural e é queimado na câmara de combustão de uma turbina-gerador [8]. No processo de queima, o ar é expandido e libertado para o grupo turbina-gerador com uma pressão superior à pressão de armazenamento, aumentando o rendimento do sistema e a capacidade de fornecimento de energia.

A potência típica de um CAES situa-se entre os 50 e 300 MW [8]. O tempo de resposta varia entre 9 (em situação de emergência) e 12 minutos e o armazenamento pode ser feito por longos períodos, já que a taxa de autodescarga é praticamente nula [8].

A principal desvantagem de um CAES relaciona-se com a dificuldade em encontrar uma estrutura geológica favorável. Contudo, quando a localização o permite, a instalação de um CAES revela-se uma opção viável de armazenamento de energia a grande escala [8].

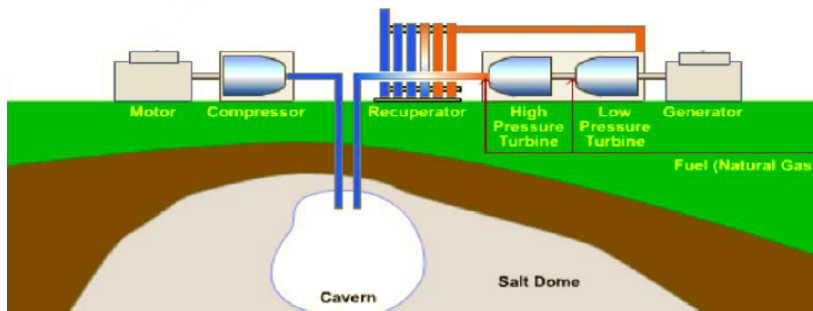


Figura 2-3: Princípio de funcionamento de um CAES [8].

Tipicamente, um CAES aplica-se a sistemas de potência relativamente elevada, contudo o armazenamento do ar comprimido a alta pressão (até 300 Bar) em cilindros construídos em fibra de carbono é uma solução viável para aplicações de pequena e média escala (SSCAES) [9].

Um SSCAES consiste num motor/gerador acoplado a um compressor reversível e num reservatório de ar comprimido. A energia é armazenada quando o sistema funciona como motor e o ar é comprimido. No processo inverso, o ar comprimido é libertado e a energia é transmitida ao gerador elétrico.

A eficiência global de um SSCAES é baixa (na ordem dos 50%), contudo possui um elevado número de ciclos (dezenas de milhares) e portanto uma longa vida útil [9].

2.1.3 Armazenamento de energia em baterias (BES)

Um sistema de armazenamento de energia em baterias (“*Battery Energy Storage*” – BES) utiliza baterias eletroquímicas recarregáveis como forma de armazenamento de energia.

Uma bateria é um dispositivo que converte energia química diretamente em energia elétrica e é composta, normalmente, por várias células ligadas em série e paralelo, dependendo da tensão e capacidade pretendidas.

Cada célula de uma bateria divide-se em duas meias-células, ligadas em série através de um eletrólito condutor. O eléctrodo positivo (cátodo) encontra-se na meia-célula na qual os catiões podem migrar (através do eletrólito). O eléctrodo negativo (ânodo) encontra-se na meia-célula

na qual os aniões podem migrar (através do eletrólito) [8]. A Figura 2-4 exemplifica, independentemente da tecnologia, o princípio de funcionamento de uma célula eletroquímica.

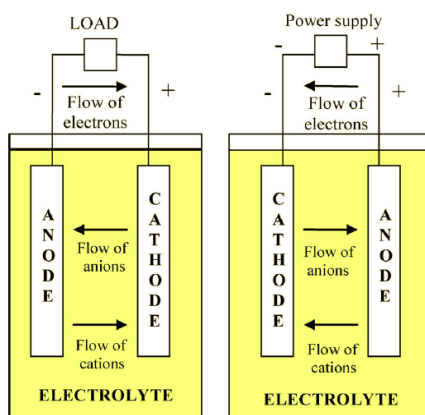


Figura 2-4: Princípio de funcionamento de uma célula eletroquímica [8].

Na reação química que energiza a bateria, os catiões são reduzidos e os elétrons são adicionados ao cátodo, ao passo que os aniões são oxidados e os elétrons removidos do ânodo. A membrana existente entre as duas meias-células permite o fluxo seletivo dos iões [8].

Dependendo do tipo dos eletrólitos, elétrodos e membranas, existem várias tecnologias de baterias, das quais se destacam [10], [11]:

1. **Baterias de Chumbo-ácidas:** Foi a primeira tecnologia comercialmente disponível e é o tipo de bateria mais comum e económico. Dentro desta tecnologia, distinguem-se as baterias fluidas (as mais comuns), as baterias VLRA, cujo eletrólito é um gel (diferem das fluidas apenas no facto de serem totalmente seladas), e mais recentemente, as baterias AGM (semelhantes às VLRA, mas com o eletrólito envolvido em fibra de vidro);
2. **Baterias de Níquel:** Distinguem-se as baterias NiMH (*Nickel-metal hydride*) e as baterias NiCd (*Nickel Cadmium*). A densidade de energia das baterias NiMH é cerca do dobro das baterias ácidas e 40% superior às NiCd. Esta tecnologia foi amplamente utilizada nos dispositivos móveis, no entanto encontra-se em declínio face à emergência das atuais baterias de iões de Lítio;
3. **Baterias de Sulfato de Sódio:** São baterias eficientes que podem ser descarregadas totalmente sem perda de propriedades. Apesar de serem relativamente baratas, os custos de exploração são elevados e possuem o inconveniente da temperatura de funcionamento ser superior a 300 °C. Usualmente esta tecnologia é integrada em projetos de grande dimensão;
4. **Baterias de Iões de Lítio:** É atualmente a tecnologia com maior crescimento e popularidade na área militar e aeroespacial. Estima-se que mais de 50% dos

dispositivos móveis utilizam esta tecnologia. A crescente popularidade desta tecnologia deve-se principalmente ao facto das baterias serem as mais eficientes e duráveis do mercado, possuírem elevada densidade de energia, taxa de autodescarga negligenciável e ausência do efeito de memória (presente nas baterias de Níquel). A principal desvantagem desta tecnologia é o preço. No entanto, os mercados estão a evoluir no sentido de reduzir os custos de produção para atrair novos mercados, nomeadamente o mercado dos veículos elétricos. De entre as tecnologias de iões de Lítio, distinguem-se as baterias LiFePO_4 , LiCoO_2 e LiMn_2O_4 [12].

2.1.4 Armazenamento de energia em baterias de fluxo (FBES)

Um sistema de armazenamento de energia em baterias de fluxo (“*Flow Battery Energy Storage*” – FBES) funciona de modo semelhante a um BES. A principal diferença entre um FBES e um BES é a tecnologia do acumulador eletroquímico – um FBES utiliza uma bateria de fluxo (FB) ao passo que um BES utiliza uma bateria eletroquímica.

De acordo com o esquema de funcionamento de uma FB, ilustrado na Figura 2-5, distinguem-se dois componentes principais: uma bateria composta por uma pilha de células e um sistema de armazenamento e bombagem dos eletrólitos composto por dois reservatórios e duas bombas [7]. Cada uma das células constituintes da bateria contém uma membrana que garante a separação física dos eletrólitos (positivo e negativo).

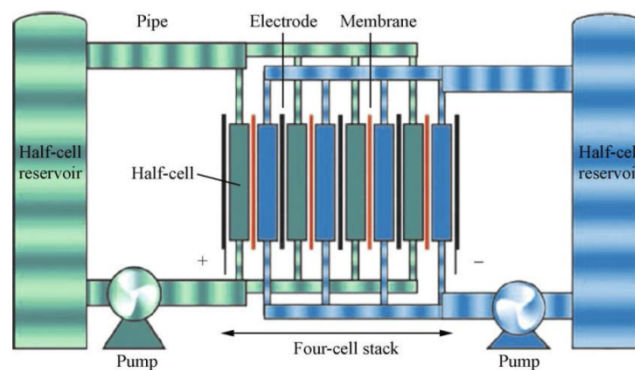


Figura 2-5: Esquema genérico do funcionamento de uma bateria de fluxo [5].

A principal diferença entre uma bateria de fluxo e uma bateria convencional é que a primeira armazena a energia no eletrólito (armazenado separadamente). Esta característica faz com que a bateria de fluxo apresente uma taxa de autodescarga substancialmente inferior a uma bateria convencional [5].

Numa FB, a capacidade de armazenamento relaciona-se com o volume dos eletrólitos e a potência relaciona-se com o tamanho dos elétrodos. Um FBES é uma tecnologia de armazenamento de grande escala com tempos de resposta e comutação entre carga e descarga muito rápidos.

A principal desvantagem desta tecnologia é a existência de partes mecânicas rotativas associadas à bombagem do eletrólito que, por um lado, dificultam a sua miniaturização [13] e, por outro, acrescentam custos de investimento e de manutenção. A eficiência de um FBES é da ordem dos 75 (ZnBr e PSB) a 85% (VRB) [5].

As principais tecnologias de baterias de fluxo são as seguintes:

1. **VRB (*Vanadium Redox Battery*):** A energia é armazenada através da interligação de duas formas diferentes de Iões de Vanádio (V^{2+}/V^{3+} no eletrodo negativo e V^{4+}/V^{5+} no eletrodo positivo) contidos num eletrólito de ácido sulfúrico. À medida que a bateria descarrega, os iões H^+ comutam através de uma membrana permeável entre os dois eletrólitos que fluem dos reservatórios para a célula. A energia potencial associada à mudança iónica do Vanádio é convertida em energia elétrica. Na fase de carga, este processo é invertido. O tempo de resposta de uma VRB é elevado e as baterias suportam cerca de 10000 ciclos. Uma outra vantagem é o facto de uma VRB poder ser totalmente descarregada sem prejuízo da sua performance [14];
2. **PSB (*Polysulphide Bromide Battery*):** As PSB funcionam de forma semelhante às VRB, com a única diferença em que os eletrólitos são compostos por Brometo de Sódio (eletrólito positivo) e Polisulfato de Sódio (eletrólito negativo). O número de ciclos de carga/descarga estima-se em cerca de 2000 e a principal desvantagem desta tecnologia é a necessidade de manutenção intensiva das células, uma vez que se formam cristais de Sulfato de Sódio que têm que ser frequentemente removidos [7];
3. **ZnBr (*Zinc Bromide Battery*):** Uma bateria ZnBr funciona de forma diferente das VRB e PSB, apesar dos seus componentes principais serem idênticos. Ao contrário das VRB e PSB, os eletrodos numa bateria ZnBr agem como substratos para a reação eletroquímica. O processo de carga realiza-se quando os eletrólitos de iões de Zinco e Brómio fluem através da célula. Os eletrólitos encontram-se separados por uma membrana microporosa e à medida que a reação ocorre, o Zinco é depositado no eletrodo negativo (galvanização) e o Brómio no eletrodo positivo. No processo de descarga, a reação é revertida: O Zinco dissolve-se a partir do eletrodo negativo e o Brómio forma-se no eletrodo positivo. Apesar de ser a tecnologia de baterias de fluxo com maior densidade de energia, o número de ciclos de carga/descarga é baixo (2000 ciclos) devido à degradação da membrana microporosa [7].

2.1.5 Armazenamento de energia num volante de inércia (FES)

Um sistema de armazenamento de energia num volante de inércia (“*Flywheel Energy Storage*” – FES) é um dispositivo que armazena energia mecânica numa massa rotativa, sendo constituído por um motor-gerador e um volante de inércia (*flywheel*) montados sob um eixo central. Nas aplicações de armazenamento de energia, onde importa reduzir os atritos

(para evitar a autodescarga), é comum instalar-se o conjunto rotativo numa câmara de vácuo (ou preenchida com Hélio) de forma a reduzir o atrito aerodinâmico e o eixo é montado sob rolamentos magnéticos para reduzir a fricção [7], conforme a Figura 2-6 exemplifica.

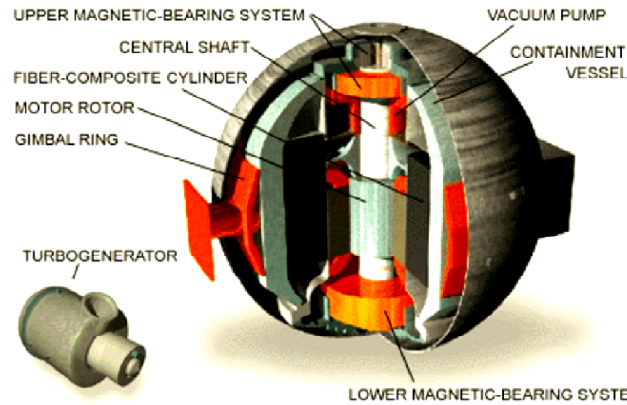


Figura 2-6: Principais componentes de um FES [7].

A energia armazenada é diretamente proporcional ao momento de inércia I do volante e do quadrado da velocidade angular ω , de acordo com a Equação (2-2) [15].

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (2-2)$$

Existem duas abordagens para aumentar a capacidade de armazenamento de uma *flywheel*: aumentar o momento de inércia (distribuição da massa na superfície exterior de um cilindro oco) ou aumentar a velocidade de rotação [15]. O resultado de primeira abordagem é uma *low-speed flywheel*, tipicamente pesada e de grandes dimensões, cuja rotação é da ordem das 10000 rpm. Mais recentemente, e com o desenvolvimento das técnicas de construção, nomeadamente os rolamentos magnéticos de baixo atrito e as câmaras de vácuo, surgiram as *high-speed flywheel* (até 100000 rpm) com potências de pico superiores, mais compactas, leves e com menor taxa de autodescarga [7].

Uma característica destes sistemas é a capacidade de fornecer elevadas potências de pico, com um tempo de resposta dinâmica muito reduzido [7], contudo a densidade de energia é muito baixa.

A quantidade de ciclos de carga/descarga é virtualmente infinita ($> 100\ 000$) e o rendimento dos sistemas atuais é da ordem dos 90% [13], no entanto possui uma taxa de autodescarga muito elevada, o que impossibilita o armazenamento de energia de longa duração [9].

2.1.6 Armazenamento de energia em supercondensadores (SCES)

Os supercondensadores, também designados por condensadores eletroquímicos de dupla camada (ECDL) combinam, à exceção dos processos químicos, as características dos condensadores convencionais e das baterias eletroquímicas [9].

No armazenamento de energia em supercondensadores (“*Supercapacitor Energy Storage*” – SCES), a energia é armazenada no campo elétrico criado entre dois elétrodos, fisicamente separados por um dielétrico. O potencial aplicado no elétrodo positivo atrai os iões negativos do eletrólito, ao passo que os iões positivos são atraídos pelo elétrodo negativo [12], conforme exemplificado na Figura 2-7.

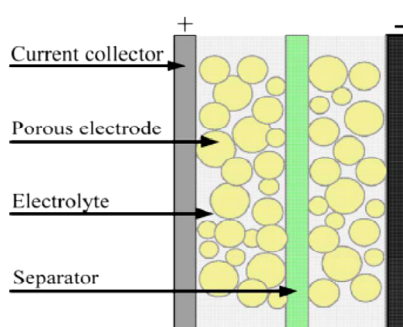


Figura 2-7: Princípio de funcionamento de um ECDL [12].

Uma vez que não existem variações químicas nos elétrodos, a densidade de energia é baixa, contudo a densidade de potência é elevada. Os supercondensadores podem ser carregados de forma substancialmente mais rápida que as baterias convencionais e suportam dezenas de milhares de ciclos de carga/descarga [5]. O tempo de resposta da ordem de poucos milissegundos é uma das principais vantagens desta tecnologia.

À semelhança de um condensador convencional, a energia E armazenada num ECDL depende da capacidade C e do quadrado da tensão U , de acordo com a Equação (2-3) [13].

$$E = \frac{1}{2}CU^2 \quad (2-3)$$

A eficiência de um ECDL supera os 95%, no entanto a taxa de autodescarga de 5% por dia invalida o armazenamento de longa duração [9].

2.1.7 Armazenamento de energia por supercondutividade magnética (SMES)

Um sistema de armazenamento de energia por supercondutividade magnética (“*Superconducting Magnetic Energy Storage*” - SMES) consiste no armazenamento de energia no campo magnético criado por uma corrente DC.

A corrente circula numa bobine supercondutora que é mantida abaixo da temperatura crítica de supercondutividade (até 7,2 °K, no caso dos materiais supercondutores de baixa temperatura, ou cerca de 100 °K no caso de materiais supercondutores de alta temperatura) [14]. A temperatura de funcionamento é mantida através de um processo de refrigeração criogénica, conforme exemplificado na Figura 2-8.

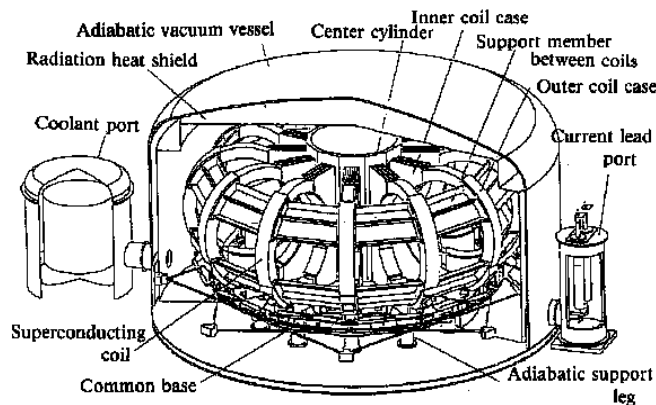


Figura 2-8: Esquema conceptual de um SMES de pequena escala [14].

A energia E armazenada na bobine, depende da indutância L e do quadrado da corrente I que flui pela bobine, segundo a Equação (2-4) [14].

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (2-4)$$

Uma vez que um SMES armazena diretamente a energia elétrica, o tempo de resposta deste sistema é praticamente nulo (na ordem de poucos milissegundos).

A eficiência global de um SMES situa-se entre 90 e 99% e o número de ciclos de carga/descarga pode ascender aos milhares sem degradação do dispositivo magnético [14].

Os problemas ambientais associados ao forte campo magnético produzido por um SMES, a complexidade do sistema de refrigeração e o custo elevado, são as principais desvantagens desta tecnologia [5].

2.1.8 Armazenamento de energia no Hidrogénio (HES)

Um sistema de armazenamento de energia no Hidrogénio (“*Hydrogen Energy Storage*” – HES) consiste numa célula de combustível, num eletrolisador e num reservatório de Hidrogénio. O eletrolisador consome energia elétrica para produzir Hidrogénio, através de um processo de eletrólise da água. O Hidrogénio produzido é armazenado num reservatório ao passo que o Oxigénio é libertado para a atmosfera [9]. O meio de armazenamento de energia é o próprio Hidrogénio.

Nos sistemas tradicionais, o eletrolisador encontra-se geograficamente separado da célula de combustível, o que implica o transporte do Hidrogénio. Contudo, as tecnologias mais recentes combinam o eletrolisador, o reservatório e a célula de combustível numa única unidade.

O princípio de funcionamento de uma célula de combustível consiste numa forma de restaurar a energia elétrica gasta na eletrólise da água para produzir Hidrogénio. A estrutura de uma célula de combustível é idêntica à estrutura de uma bateria eletroquímica convencional, na qual ocorre um processo de oxidação-redução entre o Hidrogénio armazenado (combustível) e o Oxigénio proveniente do ar. Uma célula é constituída (veja-se Figura 2-9) por dois elétrodos (ânodo e cátodo) separados por um eletrólito que funciona como meio de transferência das cargas (iões). O produto da reação química é a água que pode ser reutilizada no eletrolisador [9].

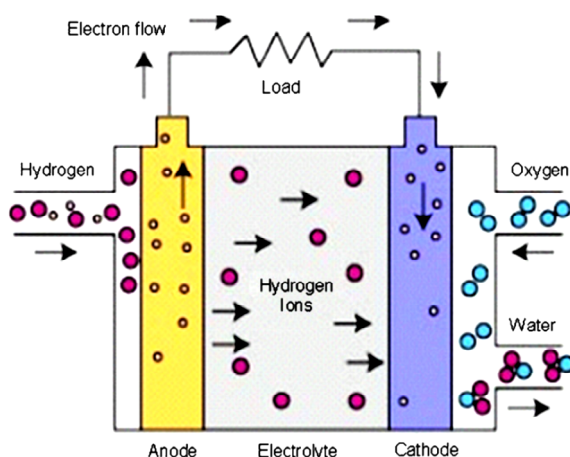


Figura 2-9: Princípio de funcionamento de uma célula de combustível [9].

Existem várias tecnologias de células de combustível, entre as quais, as células AFC (*Alkaline Fuel Cell*), PEMFC (*Polymer Exchange Membrane Fuel Cell*), DMFC (*Direct Methanol Fuel Cell*), PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cell*), MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*) e SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*). Um HES possui uma eficiência global muito baixa, na ordem do 35% (70% para o eletrolisador e 50% para a célula de combustível). Para além do tempo de vida útil ser muito reduzido, um HES possui custos de construção e de manutenção elevados [9].

2.2 Características dos sistemas de armazenamento de energia

As principais características, que habitualmente se utilizam na definição de um sistema de armazenamento de energia, são as seguintes [9]:

- **Capacidade de armazenamento** – Quantidade de energia que o sistema pode armazenar, geralmente expressa em Wh;
- **Potência disponível** – Máxima potência instantânea que o sistema pode fornecer, normalmente expressa em W;
- **Densidade de energia** – Quantidade de energia armazenada por unidade de volume ou massa, geralmente expressa em Wh/dm³ ou Wh/kg respetivamente;
- **Densidade de potência** – Potência disponível por unidade de volume ou massa, respetivamente em W/dm³ ou Wh/kg;
- **Eficiência** – Rácio entre a energia armazenada e a energia devolvida. É comum expressar-se por eficiência global do sistema, por ciclo. A eficiência global inclui todas as perdas de conversão de energia e a energia despendida para manter o sistema em funcionamento (arrefecimento, bombagem, etc.);
- **Profundidade máxima de descarga** - Este parâmetro é frequentemente referido por DoD (*Depth of Discharge*). A profundidade máxima de descarga refere-se à quantidade máxima de carga que pode ser retirada de um sistema de armazenamento, sem que ocorra deterioração das suas características, expressa em percentagem da capacidade estipulada;
- **Quantidade de ciclos de carga-descarga (Durabilidade)** – Número de vezes que o sistema pode ser carregado e descarregado sem que ocorram perdas significativas da capacidade original de armazenamento. Um ciclo completo corresponde a uma carga e a uma descarga completas, contudo é comum expressar-se a quantidade de ciclos de carga-descarga para valores específicos de profundidade de descarga (DoD);
- **Taxa de autodescarga** – Parte da energia inicialmente armazenada que se dissipa ao longo do tempo. A autodescarga deve-se às perdas internas de um sistema provocadas pelos atritos, fugas, evaporação, resistência dos condutores, processos eletroquímicos residuais, etc;
- **Tempo de resposta** – Tempo necessário para que o sistema de armazenamento inicie o fornecimento de energia;
- **Autonomia (Tempo de descarga)** - Tempo durante o qual o sistema pode fornecer energia;
- **Custo** – Normalmente expresso em unidade monetária por energia armazenada em cada ciclo ou ao longo da vida útil do sistema (€/Wh). O capital investido e os custos

operacionais (manutenção, perdas de energia e custos de exploração) são os fatores mais importantes a considerar durante a vida útil do sistema;

- **Segurança e restrições operacionais** – Relacionam-se com as condições de operação (temperatura, pressão, etc.) e com os requisitos de segurança da instalação (risco de incêndio ou explosão, libertação de resíduos, etc.);
- **Taxa de carga e de descarga (*C-rate*)** – É uma característica normalmente associada às baterias. O *C-rate* representa a taxa a que uma bateria é carregada ou descarregada relativamente à sua capacidade estipulada, ou seja, uma descarga a 1C significa, independentemente da capacidade da bateria, que esta descarrega totalmente numa hora. Por sua vez, a uma taxa de 2C, a bateria descarrega em metade do tempo (dobro da corrente);
- **Impacto ambiental** – Parte das tecnologias produzem impactos ambientais significativos (alteração dos ecossistemas, resíduos tóxicos, libertação de gases, etc.) que condicionam a sua adequabilidade a determinadas aplicações;
- **Fiabilidade** – Com implicações diretas na garantia de continuidade do serviço e no retorno dos investimentos nos prazos estabelecidos.

2.3 Comparação das tecnologias de armazenamento

Não existem sistemas ideais que possam ser utilizados em todos os tipos de aplicações de armazenamento de energia. Consoante a natureza física das tecnologias, os sistemas de armazenamento possuem características distintas (tempo de resposta, autonomia, etc.) que se adequam a um conjunto restrito de aplicações.

Contudo, a escolha de uma tecnologia deve considerar todos os aspetos técnicos e económicos que a definem. Neste sentido, a ESA² [2] definiu um conjunto de gráficos que comparam as diversas tecnologias de armazenamento em função de uma determinada característica, nomeadamente eficiência por ciclo, densidade energética e custos (investimento inicial e custo por ciclo).

O gráfico da Figura 2-10 compara, em função da potência e da capacidade de armazenamento, as principais tecnologias de armazenamento.

² *Electricity Storage Association.*

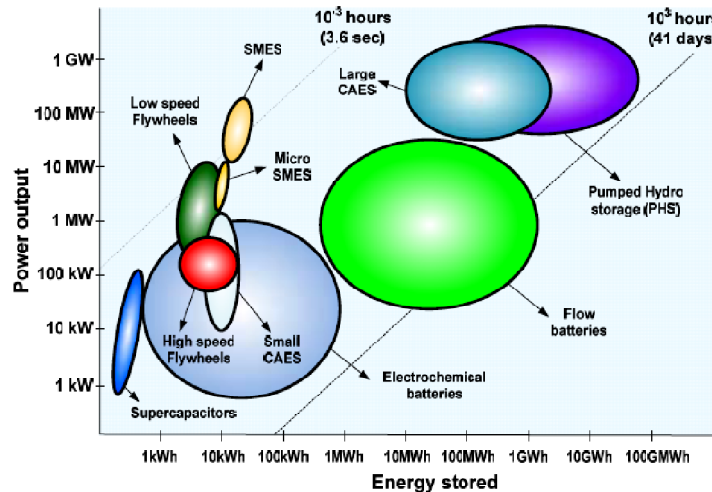


Figura 2-10: Tecnologias de armazenamento em função do campo de aplicação [6].

O gráfico da Figura 2-11 compara as tecnologias de armazenamento em função da eficiência energética (não inclui a eletrônica de potência) e da durabilidade (número de ciclos estimado com uma profundidade de descarga de 80%).

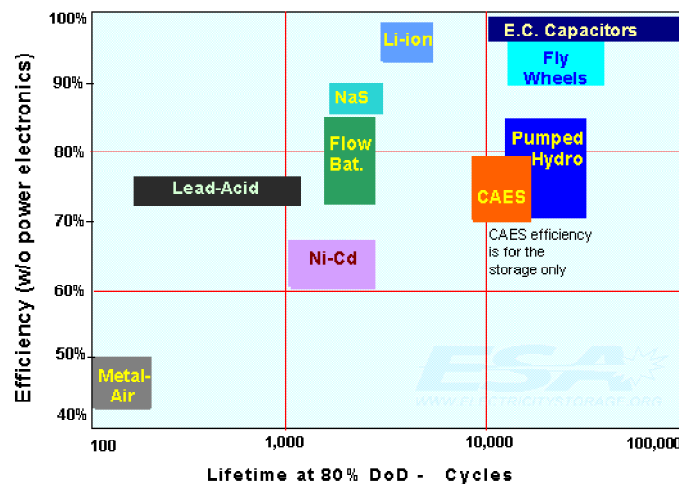


Figura 2-11: Tecnologias de armazenamento em função da eficiência e durabilidade [2].

A densidade de energia é uma característica importante, principalmente nos sistemas de armazenamento de pequena escala, portáteis ou destinados a áreas confinadas (cidades, edifícios, etc.). A Figura 2-12 representa a distribuição gráfica das tecnologias de armazenamento de pequena escala, em função da densidade energética.

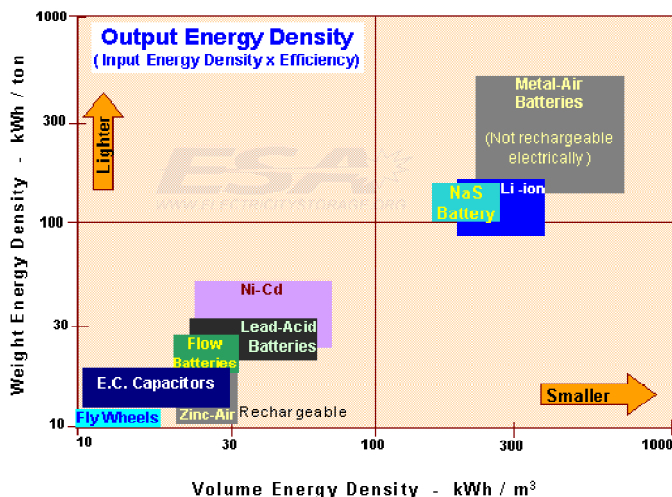


Figura 2-12: Tecnologias de armazenamento em função da densidade de energia [2].

Quanto aos custos, o gráfico da Figura 2-13 compara as tecnologias de armazenamento em função do custo inicial (investimento). Os custos estimados por ciclo, ou seja, o custo por Wh armazenado, considerando a eficiência e a durabilidade do sistema, são representados na Figura 2-14. Note-se que os custos de manutenção e de reposição de componentes, não foram considerados.

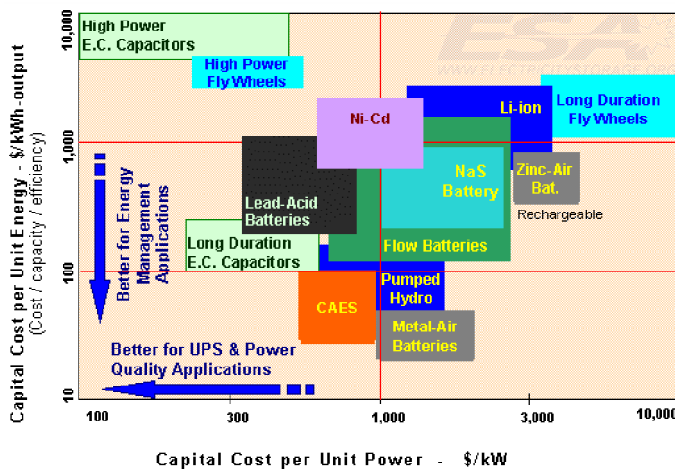
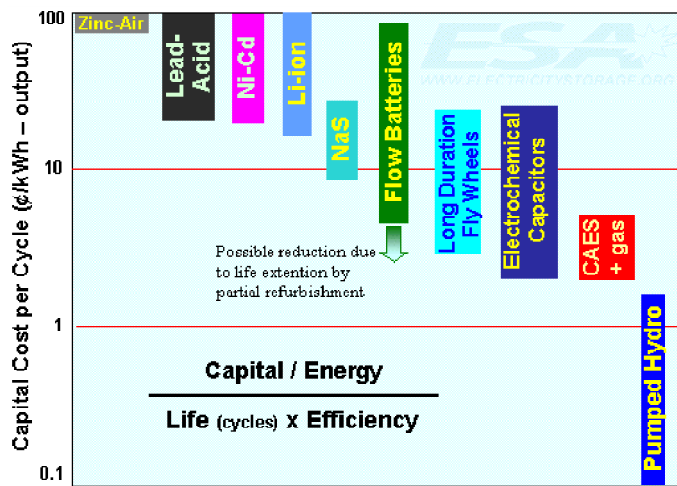


Figura 2-13: Tecnologias de armazenamento em função do custo de investimento [2].



Carrying charges, O&M and replacement costs are not included

Figura 2-14: Tecnologias de armazenamento em função do custo estimado por ciclo [2].

3. Tecnologia de armazenamento adotada

As aplicações de armazenamento de energia podem ser divididas em duas categorias principais: Aplicações de energia e aplicações de potência.

As aplicações de energia têm como principais funções, nivelar o diagrama de cargas e suprir o desfasamento entre as horas de produção e as horas de consumo, ou seja, a energia é armazenada durante as horas de maior produção (ou em vazio) e é libertada nas horas de maior consumo. Como tal, estes sistemas possuem uma autonomia relativamente elevada (na ordem de algumas horas ou dias) e a frequência dos ciclos de carga/descarga é praticamente diária (tipicamente, entre um e dois ciclos diários) [2].

As aplicações de potência envolvem garantia de continuidade de serviço, qualidade de energia e controlo da frequência da rede em tempo real. Neste tipo de aplicações, os tempos de descarga são curtos (alguns segundos ou minutos), contudo, com potências de pico elevadas. Dependendo da sua natureza, a quantidade de ciclos de carga/descarga pode ser relativamente elevada (algumas centenas por ano) [2].

De acordo com subcapítulo 2.3, as tecnologias de armazenamento diferem quanto às suas características e adaptabilidade a cada uma das aplicações de armazenamento possíveis – aplicações de energia ou de potência, em grande, média ou pequena escala. Como tal, antes de seleccionar a tecnologia de armazenamento, importa definir os requisitos da aplicação em causa.

Considere-se um sistema doméstico de armazenamento de energia (baixa potência e capacidade de armazenamento) com a capacidade de armazenar a energia importada da rede em horas de vazio (por razões económicas) ou a energia proveniente de uma fonte de energia renovável.

Atendendo à sua natureza, esta é uma aplicação de energia, cujas principais características e condicionantes técnicas são:

1. **Segurança** – O risco de incêndio ou explosão, bem como a libertação de gases ou resíduos tóxicos não é admissível;
2. **Autonomia** – A autonomia desejada é da ordem de algumas horas;
3. **Eficiência** – A eficiência é um fator chave do sistema;
4. **Densidade de energia** – O sistema deverá ser compacto e relativamente leve;
5. **Tempo de resposta** – Na ordem de poucos milissegundos (inferior a 1 ciclo);
6. **Taxa de autodescarga** – Deverá ser baixa, permitindo o armazenamento a médio prazo;
7. **Durabilidade** – Requer-se um número de ciclos de carga e descarga elevado;
8. **Impacto ambiental** – Relacionado com o meio em que o sistema se insere (interior de edifícios) onde as vibrações e os ruídos são indesejáveis. A reciclagem de todos os componentes no final do tempo de vida útil é desejável.

Considerando a eficiência e o tempo de resposta, podem agrupar-se um conjunto de tecnologias que viabilizam o sistema. São elas as baterias (todas as tecnologias), os supercondensadores, as bobines de supercondutividade magnética e as *flywheels*. Contudo, as bobines supercondutoras produzem campos magnéticos indesejáveis e possuem uma densidade de energia baixa, à semelhança das *flywheels* e dos supercondensadores. Adicionalmente, tanto os supercondensadores como as *flywheels* têm uma taxa de autodescarga muito elevada.

De entre estas tecnologias, as que melhor se adequam a aplicações de energia são as baterias, nomeadamente as baterias de iões de Lítio, Chumbo-ácidas ou baterias de fluxo.

As baterias de fluxo, para além de serem caracterizadas por um fator de disponibilidade reduzido (devido às manutenções periódicas), são constituídas por reservatórios externos e por grupos de bombagem dos eletrólitos, fatores indesejáveis ao tipo de aplicação pretendido.

As baterias Chumbo-ácidas, apesar de serem as mais económicas, apresentam um risco moderado de segurança (libertação de H₂ e risco de incêndio em caso de sobrecarga), baixa eficiência e densidade de energia reduzida. Importa ainda referir que as baterias de iões de Lítio, nomeadamente as baterias LiFePO₄ possuem uma taxa de carga e descarga (*C-rate*) relativamente elevada, permitindo cargas e descargas rápidas e com correntes elevadas.

O Quadro 3-1 resume as características das principais tecnologias de baterias.

Quadro 3-1: Características das principais tecnologias de baterias [16] [11] [17].

	Chumbo-ácida	NiCad	NiMH	LiCoO ₄	LiMnO ₄	LiFePO ₄
Dens. energia (Wh/L)	100	80 ~ 150	120 ~ 150	360 ~ 500	250 ~ 400	180 ~ 300
Dens. energia (Wh/Kg)	24 ~ 40	40 ~ 60	40 ~ 80	135 ~ 150	100 ~ 140	85 ~ 130
Eficiência (por ciclo)	60 ~70%	75%	70%	90%	90%	> 95%
Autodescarga (mensal)	2 ~ 5%	5 ~ 20%	5 ~ 20%	3%	5%	< 1%
Nº de ciclos (prof. descarga a 80%)	500 ~ 800	> 2 000	> 2 000	300 ~ 500	300 ~ 500	2 000~10 000
Segurança	Média	Boa	Boa	Média	Média	Muito Boa
Efeito de memória	Não	Sim	Sim	Não	Não	Não
Produto ecológico	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim

De entre as principais tecnologias de baterias, as que possuem maior durabilidade, eficiência e densidade energética são as baterias de íões de Lítio, das quais se destaca a tecnologia LiFePO₄.

Enumeram-se de seguida as principais vantagens desta tecnologia [16] [11] [17]:

- **Segurança e manuseabilidade** – Não existem riscos de incêndio ou explosão, mesmo em condições de sobrecarga. As baterias são de construção sólida e podem ser operadas em qualquer posição e sujeitas a vibrações. Não são libertados gases ou materiais tóxicos, mesmo quando o encapsulamento é danificado;
- **Durabilidade** (nº de ciclos) – Superior a 2 000 ciclos completos de carga/ descarga;
- **Autodescarga** – Inferior a 1%/mês, é a tecnologia com a menor taxa de autodescarga;
- **Rendimento** – Apresenta o rendimento mais elevado de todas as baterias (> 95%);
- **Manutenção** – Não exige qualquer tipo de manutenção e pode ser armazenada por longos períodos com carga parcial sem risco de se deteriorar;
- **Impacto ambiental** – A tecnologia é ambientalmente segura e as baterias são facilmente recicladas;
- **Taxa de carga e de descarga** – Apresenta uma das maiores taxas (*C-rate*) de carga e de descarga (cargas e descargas rápidas, com correntes elevadas).

A bateria LiFePO₄, apesar de possuir um custo de investimento elevado, é a bateria que melhor se enquadra no tipo de sistema considerado – aplicação de energia, de baixa capacidade de armazenamento. Note-se que, apesar do elevado custo de investimento (que tenderá a baixar em virtude da massificação da produção), as baterias LiFePO₄ apresentam um custo estimado por ciclo comparável às baterias de Chumbo-ácidas [2].

Os gráficos da Figura 3-1 comparam as diversas tecnologias de baterias de Lítio, nomeadamente quanto ao custo, durabilidade, eficiência, segurança e densidade de energia e de potência.

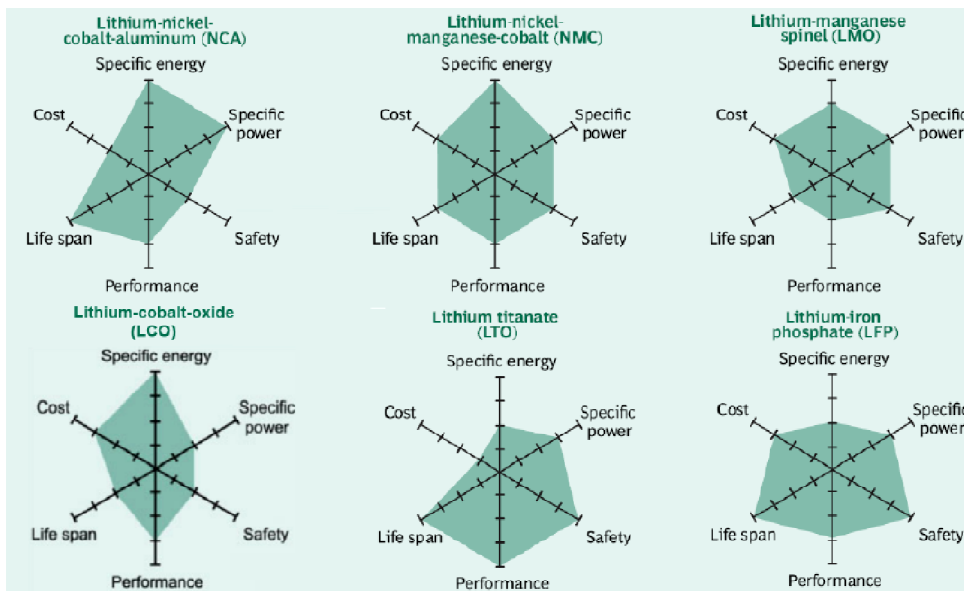


Figura 3-1: Comparação das tecnologias de baterias de Lítio [18].

3.1 Estudo das baterias LiFePO_4

As baterias LiFePO_4 (Lítio–Fosfato de Ferro) são as baterias de iões de Lítio recarregáveis que mais interesse suscitaram desde a sua descoberta em 1997, por Goodenough [19]. Esta tecnologia é ideal para aplicações de armazenamento de energia, nomeadamente em dispositivos móveis, por possuir elevada segurança, durabilidade e estabilidade química/térmica. A construção da bateria é baseada em materiais abundantes na natureza, relativamente baratos e de reduzido impacto ambiental.

A densidade de energia teórica é de 170 Wh/kg e podem ser efetuados entre 2000 a 10000 ciclos de carga/descarga completa sem que a perda da capacidade de armazenamento seja superior a 80% da capacidade inicial. Atualmente produzem-se baterias com densidade de energia e de potência, respetivamente, de 160 Wh/kg e 3 kW/kg [20].

Uma bateria recarregável de iões de Lítio, tal como todos os conversores de energia eletroquímicos (baterias), é constituída por um ânodo, um cátodo e um eletrólito. O eletrólito é uma solução salina de Lítio dissolvida numa mistura de compostos orgânicos, inorgânicos ou polímeros [21]. A Figura 3-2 ilustra o princípio de funcionamento de uma célula que compõe uma bateria LiFePO_4 . O ânodo é a fonte dos Iões positivos de Lítio e o cátodo é o recetor.

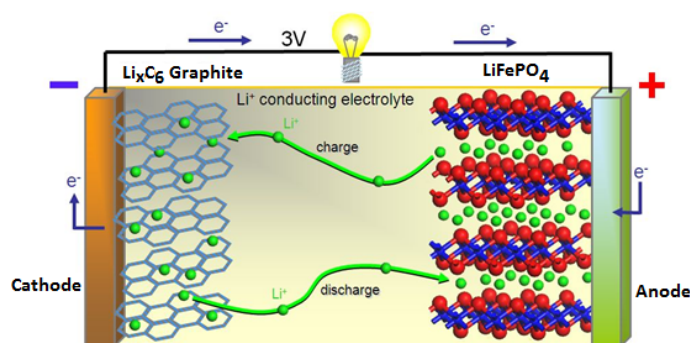


Figura 3-2: Princípio de funcionamento de uma bateria LiFePO_4 [22].

Normalmente a natureza química dos materiais catódicos (óxidos de um metal) determina o tipo de bateria de íons de Lítio. Os materiais mais comuns são o LiFePO_4 , o LiMn_2O_4 , e o LiCoO_2 [21]. No caso das baterias de Lítio–Fosfato de Ferro, o material catódico é o LiFePO_4 , ilustrado na Figura 3-3.

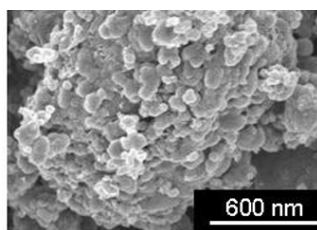


Figura 3-3: Mineral de LiFePO_4 visto ao microscópio eletrônico [23].

De todos os materiais catódicos, o LiFePO_4 é o mais económico, abundante e reciclável. A sua estrutura particularmente estável, ilustrada na Figura 3-4, permite que esta seja a tecnologia mais segura, nomeadamente quando comparada com as tecnologias LiCoO_2 ou LiMn_2O_4 [21].

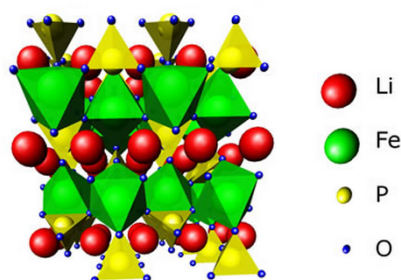
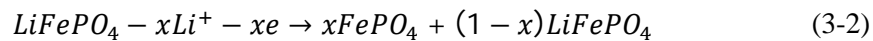
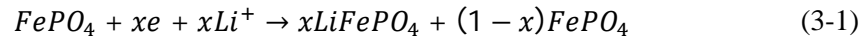


Figura 3-4: Disposição atômica do LiFePO_4 [24].

As baterias LiFePO_4 , apesar da sua estrutura química bastante compacta, possuem um ciclo de carga/descarga notoriamente bom, sobretudo para baixas densidades de corrente. A

característica mais determinante do processo cíclico de carga/descarga³ é o efeito de difusão do Lítio através do canal $\text{LiFePO}_4/\text{FePO}_4$ (que vai estreitando à medida que o Lítio é reinserido na estrutura FePO_4) e a morfologia dos elétrodos, cujo desempenho é afetado pelo tamanho e forma das partículas e pela natureza dos contactos e ligações [25].

A reação eletroquímica global de carga e de descarga das baterias LiFePO_4 é dada, respetivamente, pelas Equações (3-1) e (3-2) [19].



3.1.1 Esquema elétrico equivalente

Uma bateria não é uma fonte ideal. Na prática, a tensão medida aos terminais de uma bateria não é linear com a carga e depende de fatores como o estado de carga da bateria, temperatura ou histórico do regime de carga (histerese). Da mesma forma, não é possível eliminar a resistência interna e o efeito capacitivo.

A aproximação a um modelo elétrico equivalente permite relacionar matematicamente as características dinâmicas com o estado interno da bateria. De facto, a tensão, corrente, temperatura ou outras variáveis externas podem ser utilizadas para conhecer o estado interno da bateria, nomeadamente o seu estado de carga (SoC) [20].

Um dos modelos mais utilizados para descrever as características dinâmicas de uma bateria LiFePO_4 , é o modelo da Figura 3-5.

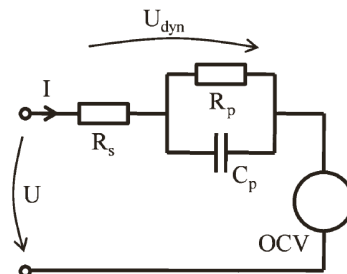


Figura 3-5: Esquema elétrico equivalente de uma bateria LiFePO_4 [20].

³ De acordo com um estudo realizado por Anderson, A.S. *et al* [25], onde se analisou o processo eletroquímico de inserção e extração dos iões de Lítio do LiFePO_4 , através da difusão de raios-X (XRD) e da eletroscopia *Mössbauer*.

Este modelo é constituído por uma resistência R_S em série com uma malha RC ($R_P||C_P$), conforme exemplificado na Figura 3-5. A fonte de tensão OCV (*Open Circuit Voltage*), que alimenta a malha, representa a tensão em circuito aberto da bateria.

A resistência série R_S é a resistência interna da bateria e é a causa da queda de tensão inicial que ocorre quando é aplicada uma carga. A malha RC representa o efeito de polarização da bateria (efeito capacitivo do ânodo e do cátodo). É esta malha que descreve matematicamente a variação de tensão dinâmica da bateria em função da carga.

A tensão em circuito aberto (OCV) reflete o estado eletroquímico da bateria e é função do estado de carga (SoC), da temperatura (θ) e da histerese (ψ).

A tensão medida aos terminais (U) é a soma da tensão em circuito aberto (OCV) com a componente dinâmica da malha RC (U_{dyn}).

As resistências e capacidades internas, representadas na Figura 3-5 por R_S , R_P e C_P dependem da temperatura, do estado de carga, do histórico do perfil de carga e descarga e do estado de saúde (envelhecimento) da bateria [20]. Note-se que o envelhecimento da bateria provoca o aumento da resistência e da capacidade interna da bateria. A componente de polarização (R_P e C_P) é, aliás, a principal causa da perda de capacidade de armazenamento como efeito do envelhecimento da bateria [26].

3.2 Comportamento e características das baterias LiFePO_4

As características elétricas de uma bateria LiFePO_4 não são lineares. A capacidade, tensão e corrente dependem de diversos fatores tais como temperatura, estado eletroquímico da bateria ou histórico do regime de carga e/ou descarga. A realização de ensaios laboratoriais sob condições controladas permite conhecer as variações das características elétricas de uma determinada bateria em função de cada um dos fatores a que é submetida.

Seguidamente, e como forma de compreender melhor as características reais de uma bateria LiFePO_4 , será descrito um conjunto de ensaios laboratoriais conduzidos por investigadores das mais diversas áreas.

3.2.1 Perfil de carga

Marongiu, A. *et al* [21] determinaram um perfil de carga de uma bateria de 13,2 V com uma capacidade de 2,3 Ah. A bateria em teste admite uma corrente máxima de carga de 10 A e uma corrente de descarga máxima de 70 A em regime contínuo. O método de carga usado foi o método CC-CV (*constant current – constant voltage*) com uma corrente constante de 2,3 A (1C), cujos resultados se representam no gráfico da Figura 3-6.

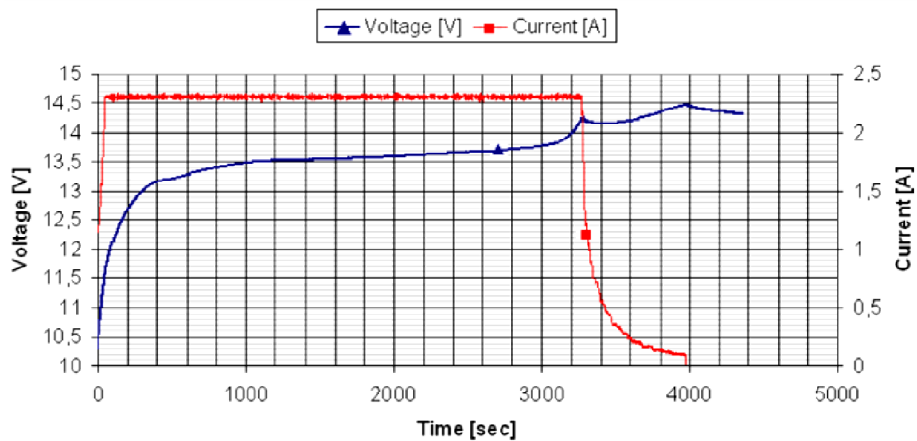


Figura 3-6: Evolução da tensão e corrente de carga em função do tempo [21].

Segundo o mesmo método de carga (CC-CV), e mantendo a temperatura da bateria constante, realizaram-se cargas sucessivas com perfis de corrente que variaram entre 550 e 7000 mA. Para cada um dos perfis, foi traçado um gráfico (veja-se a Figura 3-7) que relaciona a tensão da bateria em função da capacidade.

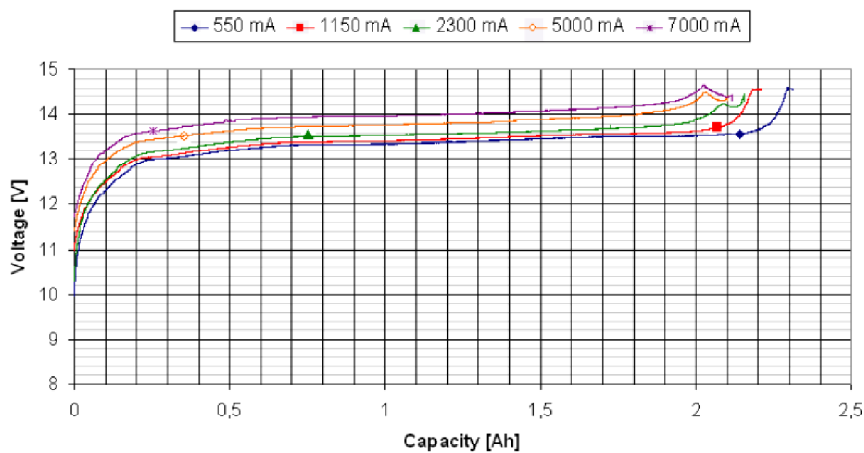


Figura 3-7: Tensão em função da capacidade para diferentes correntes de carga [21].

De acordo com o gráfico da Figura 3-7, uma corrente de carga mais baixa permite uma melhor utilização da capacidade da bateria. Com uma corrente de carga da ordem de 1/4C, foi possível armazenar 2,3 Ah (100% da capacidade). Em contrapartida, com uma corrente equivalente a 3C (7 A), a carga máxima conseguida foi de apenas 2,2 Ah, ou seja, 94% da capacidade estipulada. A tensão medida (em carga) é função, não só do estado de carga da bateria, como também da corrente aplicada, ou seja, a tensão sobe de acordo com a curva de carga, à medida que o estado de carga aumenta. Para um mesmo estado de carga, a tensão é tanto maior quanto maior for a corrente de carga.

3.2.2 Perfil de descarga

Nas mesmas condições da realização dos perfis de carga, Marongiu, A. *et al* [21] conduziram vários perfis de descarga com os resultados da Figura 3-8:

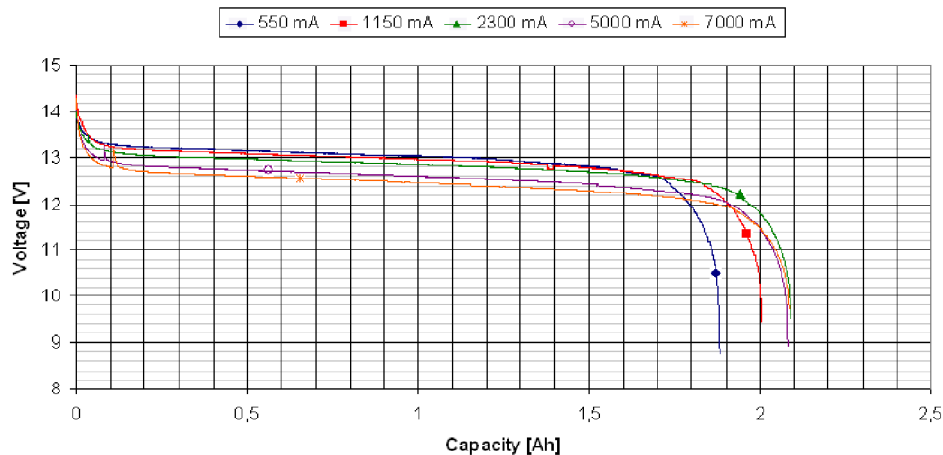


Figura 3-8: Tensão em função da capacidade para diferentes correntes de descarga [21].

Teoricamente, a capacidade de armazenamento deveria ser superior para correntes de descarga mais baixas. Os resultados do gráfico da Figura 3-8 indicam, contrariamente aos modelos teóricos, uma maior perda de capacidade para correntes de descarga inferiores à estipulada. Segundo os investigadores [21], correntes de descarga muito baixas abrandam as reações eletroquímicas da bateria. Como consequência, a perda de capacidade é superior, tanto para as correntes de descarga muito elevadas como para correntes muito inferiores à estipulada. De acordo com os dados, a corrente de descarga que provoca a menor perda de capacidade é a corrente estipulada, ou seja, equivalente a 1C.

3.2.3 Influência da temperatura

Para determinar a influência da temperatura sobre a capacidade de uma bateria LiFePO_4 , Marongiu, A. *et al* [21] realizaram um conjunto de ensaios em que a temperatura da bateria variou entre -15 e 50 °C. Entre cada ensaio, a bateria repousou 4 horas à temperatura de teste para se estabilizar termicamente. A corrente de descarga foi constante e igual a 2,3 A (1C) em todos os ensaios.

De acordo com os resultados registados no gráfico da Figura 3-9, existe uma diminuição da capacidade da bateria (e da tensão) à medida que a temperatura diminui. Para uma gama de temperaturas iguais ou superiores a 25 °C, o desempenho da bateria mantém-se praticamente constante. Tal deve-se, principalmente, ao aumento da resistência interna da bateria com a diminuição da temperatura, sobretudo para temperaturas inferiores a 25 °C, conforme se verifica no gráfico de Figura 3-10.

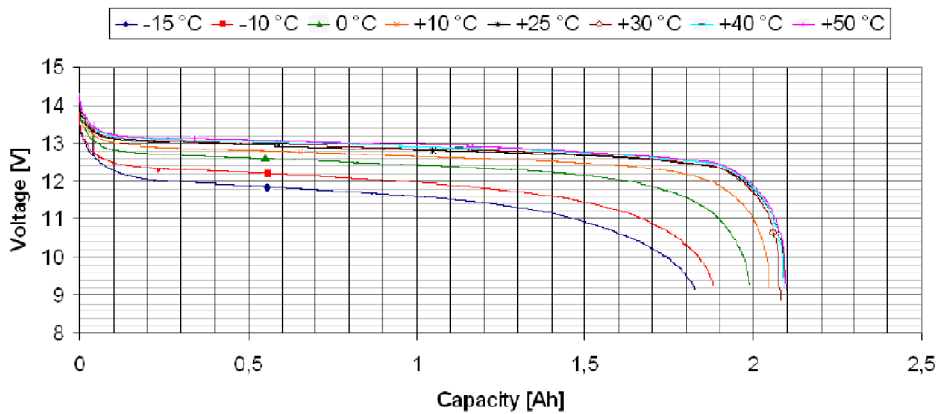


Figura 3-9: Curvas de descarga em função da temperatura [21].

O gráfico da Figura 3-10 relaciona o tempo de descarga, a capacidade e a resistência interna da bateria, em função da temperatura.

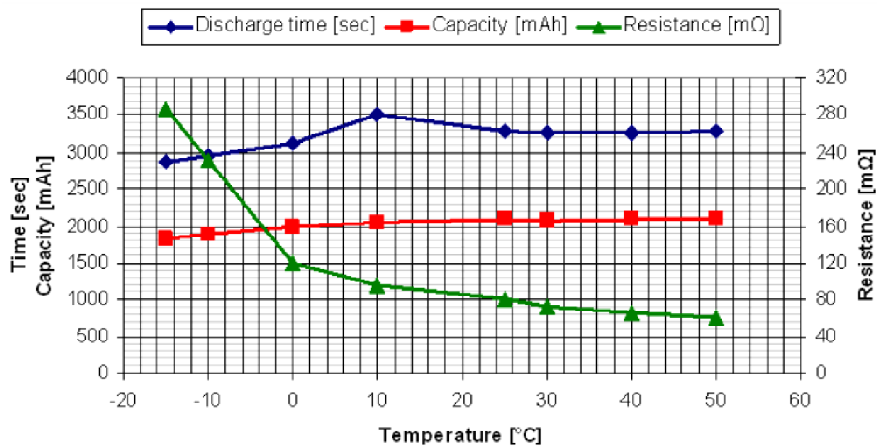


Figura 3-10: Tempo de descarga, capacidade e resistência em função da temperatura [21].

3.2.4 Característica de funcionamento dinâmico

A bateria foi submetida a um perfil de descarga dinâmico, onde Marongiu, A. *et al* [21] fizeram variar a corrente de descarga entre 0 e 15 A, através de um banco de cargas variáveis.

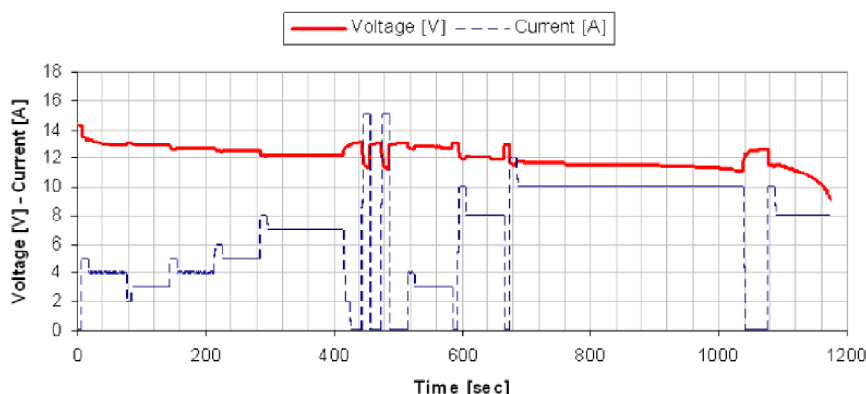


Figura 3-11: Perfil de descarga dinâmica [21].

De acordo com este ensaio (gráfico da Figura 3-11), a tensão da bateria não é influenciada significativamente para pequenas variações de corrente, no entanto, grandes variações de corrente provocam alterações repentinas na tensão (e que demoram algum tempo a estabilizar). Estas variações de tensão devem-se à resistência interna e ao estado eletroquímico da bateria.

3.2.5 Tensão em circuito aberto (OCV) e histerese

O ensaio de tensão em circuito aberto (OCV – *Open Circuit Voltage*) foi realizado por Jiayuan, W. *et al* [19] numa célula LiFePO₄ de 40 Ah com uma tensão nominal de 3,2 V. O ensaio iniciou com a bateria totalmente carregada.

Foram efetuados vários ensaios de carga e descarga a diferentes temperaturas (20 °C e 40 °C), e com tempos de repouso de 5 e 8 horas. A corrente de carga e de descarga foi constante e igual a 1/4C em todos os ensaios. Durante os processos de carga e descarga, a tensão foi monitorizada a cada intervalo de 5% da capacidade, e após o tempo de repouso determinado. Os resultados obtidos encontram-se representados na Figura 3-12.

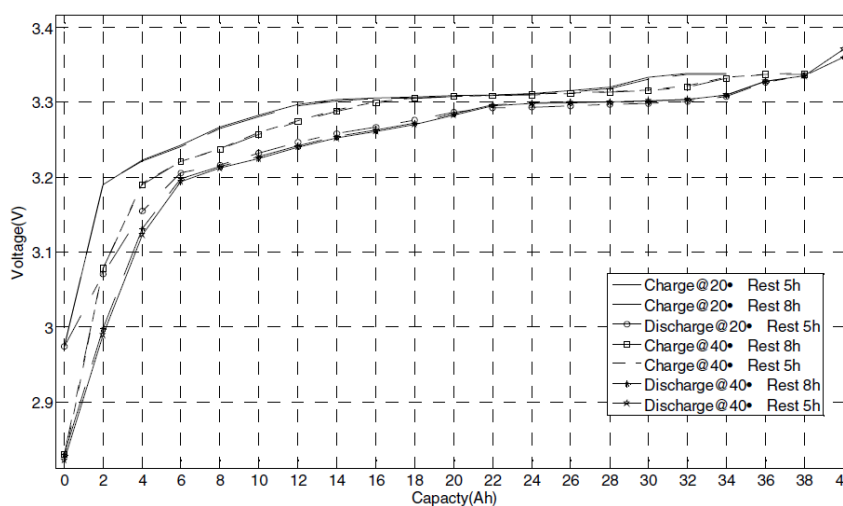


Figura 3-12: OCV em função da temperatura e da corrente de carga/descarga [19].

Os investigadores concluíram que 5 horas é um tempo de repouso suficiente para permitir que a tensão medida possa ser considerada a tensão em circuito aberto.

Ainda, de acordo com os ensaios, foi determinado o fenómeno de histerese característico de uma célula LiFePO_4 , ilustrado na Figura 3-13.

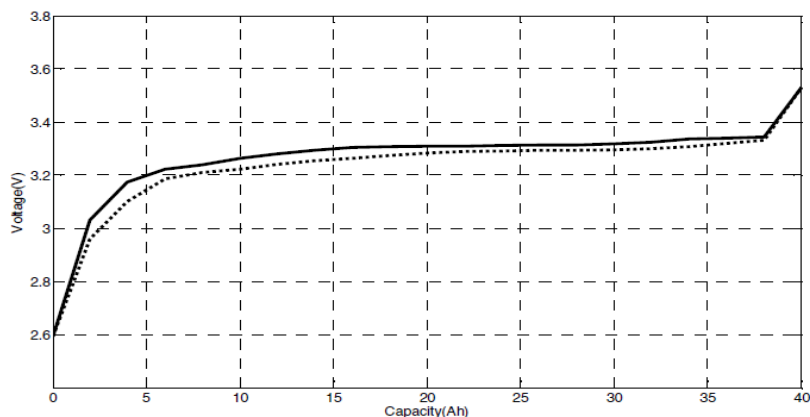


Figura 3-13: Histerese associada a uma célula LiFePO_4 [19].

No gráfico da Figura 3-13, a linha sólida representa a OCV medida durante o processo de carga e a linha tracejada, a OCV medida durante o processo de descarga. A diferença do potencial de equilíbrio, ou seja, a histerese é de 20 a 50 mV, para estados de carga que variam entre cerca de 5 e 90% da capacidade. Quando a célula está carregada (> 90%) ou descarregada (< 5%), a histerese é praticamente nula. Desta forma, a OCV depende, tanto do estado de carga, como do histórico do perfil de carga/descarga.

3.2.6 Descarga a altas frequências com diferentes formas de onda

A maioria dos conversores DC-AC tem como entrada uma corrente que é comutada a altas frequências e com uma forma de onda triangular, trapezoidal ou em dente de serra. Se ligada a um destes conversores, uma bateria LiFePO_4 é sujeita a um perfil de descarga que é função da corrente de entrada do conversor.

Para determinar as características de uma célula LiFePO_4 quando sujeita a um perfil de descarga imposto por um conversor DC-AC, Yao-Ching, H. *et al* [27] efetuaram um conjunto de ensaios a uma célula de 2,3 Ah (3,2 V) com os resultados que se traduzem na Figura 3-14, na Figura 3-15 e na Figura 3-16.

A corrente de descarga usada nos ensaios foi igual a 1C (2,3 A).

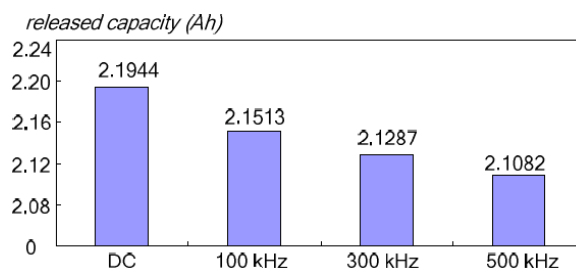


Figura 3-14: Capacidade fornecida em função da frequência (onda trapezoidal) [27].

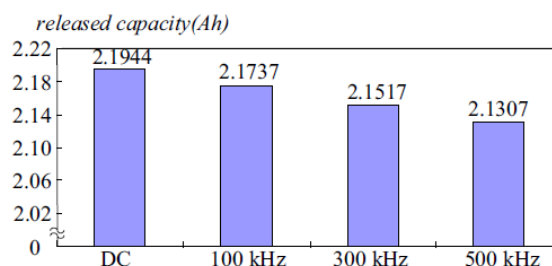


Figura 3-15: Capacidade fornecida em função da frequência (onda em dente de serra) [27].

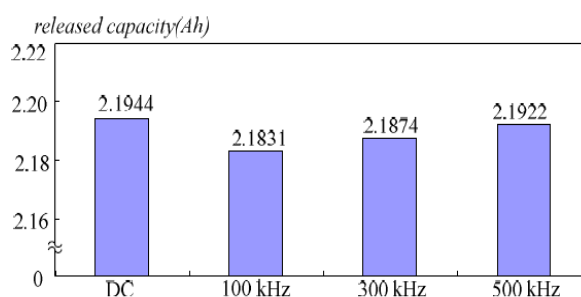


Figura 3-16: Capacidade fornecida em função da frequência (onda triangular) [27].

Segundo os investigadores, quanto maior for a componente AC (*ripple*) da corrente que flui pela bateria, maior será a sua impedância interna. Uma maior impedância significa uma maior dissipação de energia e conseqüentemente, um menor aproveitamento da capacidade da bateria. Desta forma, e de acordo com os ensaios realizados, as correntes DC são as que permitem um melhor aproveitamento da capacidade da bateria [27].

As ondas triangulares, por possuírem menor *ripple* a altas frequências, são as que conseguem extrair maior capacidade da bateria, ao contrário das ondas trapezoidais que possuem uma maior componente AC a altas frequências [27].

3.2.7 Durabilidade e taxa de autodescarga

Nunotani, K. *et al* [28] testaram uma célula de 6,2 Ah (3,25 V) com o intuito de determinar a durabilidade e a taxa de autodescarga das baterias LiFePO₄ em função da temperatura e do tempo de armazenamento. Os ensaios de durabilidade foram realizados a cada 100 ciclos de carga/descarga completos e as correntes de carga e de descarga foram constantes e

equivalentes a 4C. Os resultados obtidos em função de diferentes temperaturas são demonstrados no gráfico da Figura 3-17.

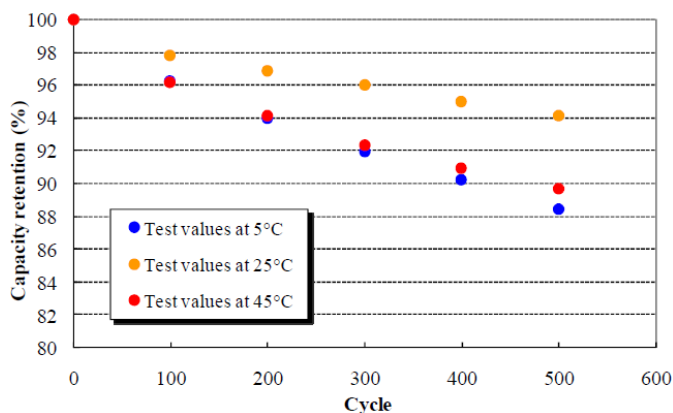


Figura 3-17: Perda da capacidade de armazenamento em função do nº de ciclos [28].

Segundo os ensaios, a durabilidade de uma bateria depende fortemente da temperatura de funcionamento. Uma bateria sujeita a temperaturas de funcionamento próximas da temperatura ambiente possui uma maior durabilidade (nº de ciclos de carga/descarga). Segundo o gráfico da Figura 3-17, ao final de 500 ciclos, a capacidade da bateria foi reduzida em apenas 6% quando funcionou a uma temperatura de 25 °C. Com temperaturas muito inferiores ou superiores (5 °C e 45 °C), a capacidade foi reduzida em cerca de 11%.

Quanto à taxa de autodescarga, os ensaios determinaram que esta é função, tanto da temperatura de armazenamento, como do estado de carga. Os resultados ilustrados no gráfico da Figura 3-18 indicam que quanto menor for a temperatura de armazenamento e o estado de carga da bateria, menor será a perda de capacidade em função do tempo. Esta característica deve-se ao facto de existir um abrandamento das reações eletroquímicas a baixas temperaturas [28].

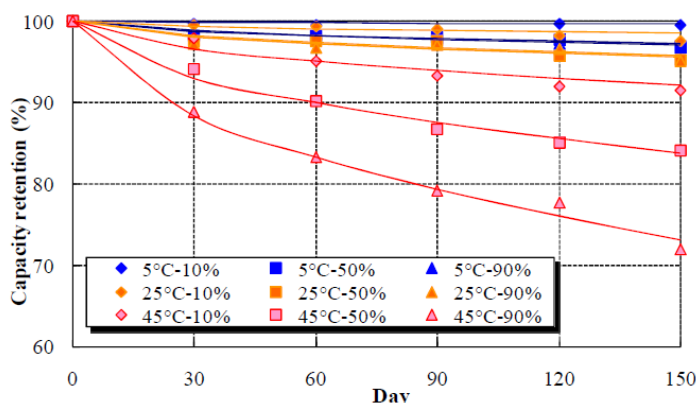


Figura 3-18: Perda de capacidade em função do tempo de armazenamento e do SoC [28].

3.3 Métodos de carregamento das baterias LiFePO₄

Existem vários métodos para carregar baterias, nomeadamente os métodos de carregamento por tensão constante (tipicamente aplicados na carga das baterias de chumbo-ácidas) e por corrente constante (mais utilizados na carga de baterias de íões de Lítio). Contudo, não existem métodos ideais que possam ser aplicados a todos os tipos de baterias. O método de carregamento deve ser selecionado de acordo com o tipo de bateria e segundo as instruções do fabricante.

O Quadro 3-2 apresenta um resumo das vantagens e inconvenientes dos principais métodos de carregamento de baterias.

Quadro 3-2: Principais métodos de carregamento de baterias [16].

Método	Vantagens	Desvantagens
Corrente constante (CC)	A limitação de corrente previne sobrecargas durante a fase inicial de carga;	Possibilidade de sobrecarga durante a fase final de carga;
Tensão constante (CV)	O limite de tensão previne sobretensões na fase final de carga;	Durante a fase inicial de carga, a corrente facilmente atinge valores elevados;
Corrente constante/ Tensão constante (CC-CV)	Limita a tensão e a corrente;	Tempo de carga muito longo;
Carga por pulsos e método <i>Reflex</i>	Pode reduzir o efeito de polarização para prevenir o aumento da temperatura da bateria;	Sistema de controlo complexo.

Tipicamente, as baterias de íões de Lítio, e em particular as baterias LiFePO₄, são carregadas de acordo com o método CC-CV [29]. Este método consiste, numa primeira fase, em carregar a bateria com uma fonte de corrente constante até que a tensão limite (em carga) da bateria seja atingida. Numa segunda fase, a tensão mantém-se constante e à medida que o estado de carga da bateria aumenta, a corrente diminui progressivamente até um determinado valor (normalmente 1/10 da capacidade estipulada da bateria), a partir do qual se considera que a bateria está totalmente carregada. A principal desvantagem deste método é o tempo de carga [29]. De acordo com a Figura 3-19, cerca de 95% da carga total da bateria deve-se apenas à primeira fase de carga (corrente constante), que é concluída num espaço de tempo substancialmente inferior quando comparado com o método *standard* (CC-CV).

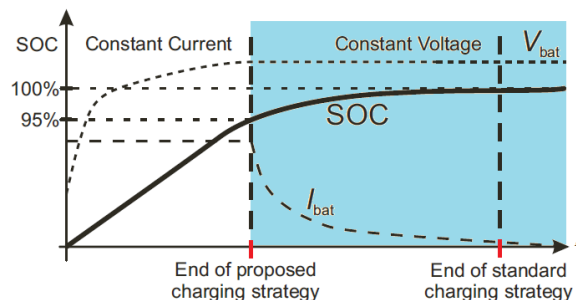


Figura 3-19: Comparação dos métodos de carga CC e CV [29].

Apesar de cerca de 5% da capacidade da bateria não ser utilizada, uma carga efetuada com o método CC é significativamente mais rápida. Consequentemente um carregador de baterias do tipo CC é mais compacto, robusto e económico comparado com um carregador do tipo CC-CV. Adicionalmente, o método de carga CC permite prolongar o tempo de vida útil da bateria uma vez que o tempo a que esta fica sujeita a tensões elevadas é menor [29].

3.4 Sistema de Gestão de Baterias (BMS)

Tipicamente um sistema de armazenamento de energia eléctrica baseado em baterias (BES) é constituído por uma unidade central de controlo, um conversor AC-DC bidirecional, um banco de baterias e um sistema de gestão de baterias [30] ou “*Battery Management System*” (BMS), conforme se exemplifica na Figura 3-20.

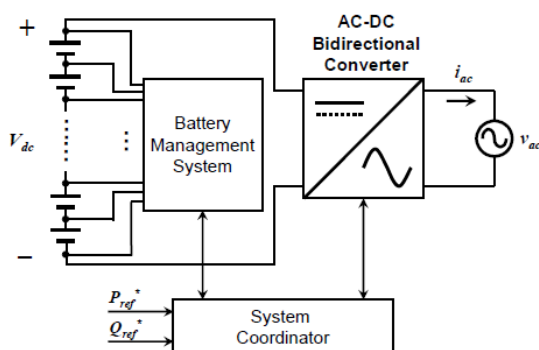


Figura 3-20: Principais constituintes de um BES [30].

O conversor AC-DC bidirecional tem dupla funcionalidade: Carregar as baterias (conversor AC-DC) e adaptar os níveis bem como o tipo de tensão (DC) das baterias à rede (AC) quando esta solicita carga (conversor DC-AC).

O BMS é o elemento chave do sistema, tendo a missão de monitorização da tensão, corrente e temperatura das baterias. Uma das principais funcionalidades do BMS é a gestão das baterias do ponto de vista da segurança de operação, ou seja, o BMS atua no balanceamento das células individuais da bateria, previne sobrecargas e sobretensões e impede cargas ou

descargas excessivas das baterias. Para além destas funcionalidades, alguns BMS implementam algoritmos que estimam o estado de carga (SoC) e o estado de saúde (SoH), e comunicam o estado da bateria a um utilizador ou unidade central de controlo.

3.5 Métodos de estimativa do SoC

O estado de carga de uma bateria (“*State of Charge*” - SoC) é definido como o rácio entre a carga existente em determinado momento e a carga estipulada da bateria [26].

Usualmente o SoC é expresso em percentagem da carga estipulada da bateria Ah_{nom} e define-se matematicamente de acordo com a Equação (3-3) [31]. A corrente medida aos terminais da bateria $I(t)$ é positiva quando a bateria é descarregada (naturalmente, é negativa quando a bateria é carregada).

$$SoC(t) = \frac{Ah_{nom} - \int_0^t I(t) dt}{Ah_{nom}} \cdot 100 \quad \text{onde } 0 \leq SoC(t) \leq 100, \forall t \quad (3-3)$$

Os principais métodos usados para estimar o SoC de uma bateria resumem-se no Quadro 3-3.

Quadro 3-3: Resumo dos principais métodos de estimativa do SoC [32] [33].

Método	Descrição	Vantagens	Desvantagens
Teste de descarga	Medição do tempo e da corrente de descarga (DC). Usa-se para determinar a carga inicial da bateria (início de vida).	É o método com maior precisão.	Demoroso; Consumo de energia; Medição <i>offline</i> do estado de carga.
Contagem de <i>Coulomb</i>	Contagem das cargas e descargas (integração da corrente em função do tempo). Usado em todos os tipos de baterias.	Medição <i>online</i> ; Fácil implementação; Preciso, quando existem suficientes pontos de calibração.	Acumulação de erros de medição; Necessidade de calibração periódica.
Tensão em circuito aberto (OCV)	Medição da OCV. Comparação OCV-SoC (tabela).	Medição <i>online</i> ; Implementação fácil e económica.	Demoroso; Necessidade de períodos longos de repouso ($I=0$ A).
Impedância (Espectroscopia)	Medição da impedância da bateria (combinação RC). Aplica-se a todos os tipos de baterias.	Medição <i>online</i> ; Estimativa do SoC e SoH.	Custo elevado; Sensibilidade à variação de temperatura.
Resistência interna DC	Medição da resistência interna DC. Aplicável a baterias de Chumbo-ácidas e Níquel (NiCd).	Medição <i>online</i> ; Informação do SoC e SoH; Fácil implementação.	Custo elevado; Sensibilidade à variação de temperatura. Precisão varia com o SoH.

Filtros <i>Kalman</i>	Baseia-se no modelo da bateria para obtenção de dados. Rejeição de não linearidades e irregularidades, através de um filtro <i>Kalman</i> . Aplica-se a todos os tipos de baterias.	Medição <i>online</i> ; Modelo dinâmico, flexível e preciso.	Modelo computacional complexo.
Redes neuronais	Baseia-se num modelo pré estabelecido da bateria para construção de uma rede neuronal adaptativa; Aplicável a todos os tipos de baterias.	Medição <i>online</i> .	Dependência de um histórico de dados (de uma bateria semelhante); Custos elevados.
Lógica <i>Fuzzy</i>	Aplica-se a todos os tipos de baterias.	Medição <i>online</i> ; Modelo robusto.	Necessidade de grandes quantidades de memória e cálculo computacional.

Atualmente, a técnica mais utilizada para estimar o SoC de uma bateria é a contagem de *Coulomb*. Esta técnica, que consiste na integração da corrente (medida dinamicamente aos terminais da bateria) ao longo do tempo, permite a indicação direta (e *online*) do SoC e é aplicável a todo o tipo de baterias. É considerada uma das técnicas de estimativa do SoC com maior precisão, contudo tende a acumular erros ao longo do tempo (como consequência da própria integração da corrente, erros de medição, resolução e arredondamentos), sendo que periodicamente, o algoritmo de estimativa do SoC tem que ser calibrado [26].

Apesar da tensão em circuito aberto (OCV) ser uma técnica económica e de fácil implementação, no caso das baterias LiFePO_4 , a sensibilidade a erros de estimativa do SoC é muito elevada devido ao comportamento da tensão em vazio em função do SoC (variações pouco perceptíveis numa vasta gama de carga). Um outro inconveniente desta técnica (devido à dinâmica que caracteriza o comportamento de uma bateria, em particular de LiFePO_4) é que uma OCV suficientemente precisa só pode ser obtida após um longo período de descanso (corrente nula) [26]. Por conseguinte, este método não é realista numa aplicação em tempo real e não é adequado a aplicações que envolvam flutuações frequentes da corrente.

Para além das técnicas de contagem de *Coulomb* e medição da OCV (consideradas técnicas económicas e de fácil implementação), são frequentemente referidas técnicas heurísticas que assentam em métodos computacionais mais complexos, nomeadamente a lógica *Fuzzy* e as redes neuronais. A implementação destas técnicas, para além de dispendiosa, requer modelos fiáveis das baterias e um vasto histórico de dados, obtido através da experiência com baterias semelhantes [26].

Os filtros *Kalman* requerem um modelo fiável da bateria e uma correta inicialização do seu estado inicial (de forma a que não ocorra a convergência dos estados seguintes). Os algoritmos de estimativa do SoC baseados em filtros *Kalman* aplicam-se à estimativa do SoC de uma única bateria e sob condições experimentais controladas [26].

Os métodos de medição da impedância da bateria (Espetroscopia) são dispendiosos e, de acordo com vários estudos efetuados [26], ainda não se adequam a aplicações práticas de

estimativa do SoC, uma vez que são sensíveis à temperatura e ao estado de saúde das baterias (que têm implicações diretas na impedância da bateria).

3.6 Estado de Saúde (SoH) de uma bateria

O estado de saúde (ou de envelhecimento) de uma bateria (*“State of Health”* - SoH) é a capacidade que a bateria possui para armazenar energia relativamente à sua capacidade original – o SoH indica, geralmente em percentagem, o estado da bateria entre o início de vida (*“Beginning of Life”* - BoL) e o final de vida (*“End of Life”* - EoL) [18]. Normalmente considera-se que o EoL é de 80%, nomeadamente no caso das baterias LiFePO₄.

Algumas das técnicas utilizadas para estimar o SoC podem também ser utilizadas para estimar o SoH, nomeadamente a medição da impedância (espectroscopia) ou da resistência interna da bateria [31]. Contudo estimar o SoH de uma bateria LiFePO₄ continua a revelar-se um problema devido à falta de métodos e técnicas fiáveis.

A estimativa do SoH de uma determinada bateria é considerada subjetiva e depende fortemente do tipo de aplicação considerada [18], contudo para aplicações práticas deve considerar-se um método de estimativa do SoH que permita medições *on-line* [26].

4. Plataforma desenvolvida

No presente trabalho foi desenvolvida uma plataforma capaz de proceder à recolha de dados relacionados com o processo de carga/descarga de uma bateria do tipo LiFePO_4 (tensão e corrente) visando a respetiva caracterização. Ademais, esta plataforma foi, numa fase posterior, integrada no desenvolvimento de um sistema de estimativa do estado de carga (SoC) e de saúde (SoH) da bateria, visando o fornecimento de informação em tempo real a um sistema doméstico de gestão de energia.

Para permitir a simulação de uma aplicação doméstica de armazenamento de energia, a plataforma desenvolvida inclui, para além do BMS, um carregador de baterias e um sistema de descarga, conforme ilustrado no esquema funcional da Figura 4-1.

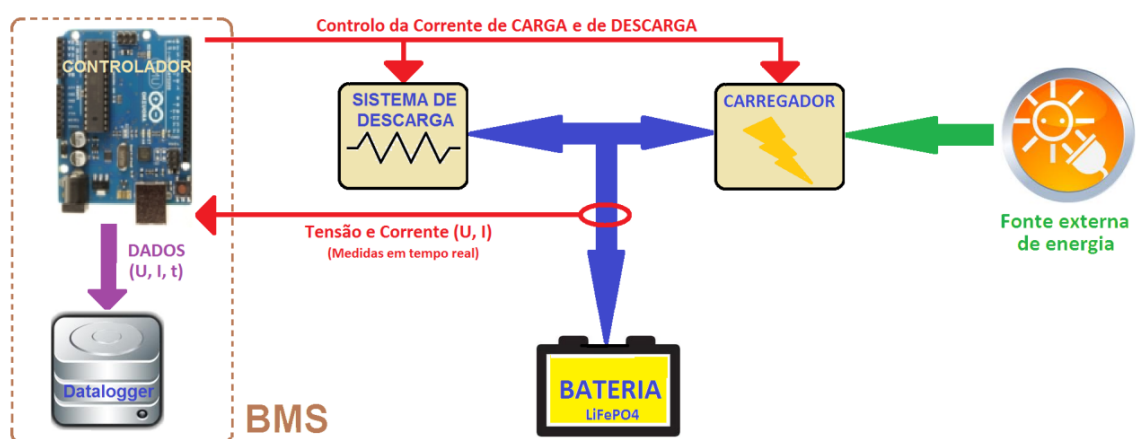


Figura 4-1: Esquema funcional dos módulos constituintes da plataforma.

A Figura 4-2 ilustra a plataforma concebida, após assemblagem de todos os componentes.

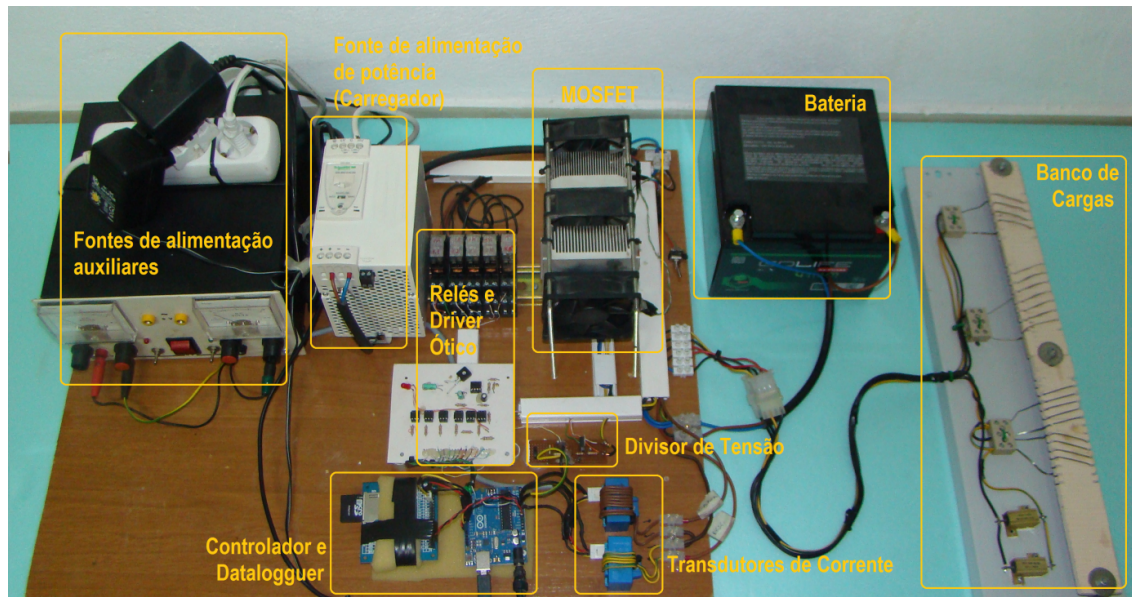


Figura 4-2: Fotografia da plataforma, após assemblagem dos componentes.

O sistema de controlo desenvolvido contém um algoritmo que monitoriza a tensão e a corrente da bateria (corrente de carga e de descarga), atuando, para efeitos de ensaio das baterias, sobre um banco de cargas e sobre um carregador alimentado a partir de uma fonte DC de 24 V (10 A). A atuação é efetuada de acordo com o perfil de carga/descarga que se pretende testar, o qual é parametrizável.

As correntes e tensões, bem como o tempo e a carga, são registadas num cartão SD integrado no *datalogger*.

4.1 Controlador e *Datalogger*

O controlador é um constituinte de relevância do sistema, uma vez que é o responsável pela aquisição dos dados relativos ao teste das baterias e pela implementação do algoritmo de estimativa do SoC e SoH (que também envolve recolha de dados). Adicionalmente o controlador implementa a funcionalidade de comunicação do SoC e SoH a um dispositivo doméstico de gestão de energia.

A implementação do controlador poderia ser efetuada utilizando diversas soluções existentes no mercado (PLC, computadores e controladores). Neste trabalho adotou-se um controlador Arduino [33], dotado de um microcontrolador ATmega. O Arduino, para além de oferecer um conjunto de módulos de expansibilidade (*shields*), possui um ambiente de programação de alto nível baseado na linguagem de programação “C”. Adicionalmente, o custo de um Arduino é relativamente baixo quando comparado com um PLC ou computador. A gama UNO, cujas características se enumeram na Figura 4-3, é suficiente para o controlo da plataforma que se implementou, nomeadamente no que se refere à disponibilidade de

memória, à capacidade processamento e à adequação das entradas e saídas analógicas e digitais.

Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz

Figura 4-3: Principais características do Arduino Uno R2 [33].

O *datalogger* utilizado consiste num cartão SD, acedido pelo Arduino através de uma placa de interface SD. O cartão utilizado tem capacidade para 2 Gb e permite o registo de mais de 20000 horas de ensaios sem perda de informação.

A Figura 4-4 apresenta o detalhe da montagem do Arduino e da placa de interface SD utilizados na plataforma desenvolvida.



Figura 4-4: Detalhe da montagem do Arduino e do *datalogger*.

4.2 Dispositivos de medição

A tensão da bateria é medida diretamente nos seus terminais, utilizando um circuito divisor de tensão do tipo resistivo. O divisor, cujo esquema se representa na Figura 4-5, foi calculado de forma a adaptar a tensão da bateria (até um máximo de 17 V) à gama de tensão da entrada analógica do controlador (0 a 5 V). Caso a tensão da bateria seja inferior a 9,9 V ou superior a

14,6 V (parametrizados por *software*), o algoritmo entra em modo de “falha da bateria” e desliga completamente os circuitos de carga e descarga. De mesma forma, se a bateria se encontrar desligada (ou um condutor partido), o modo de falha é ativado.

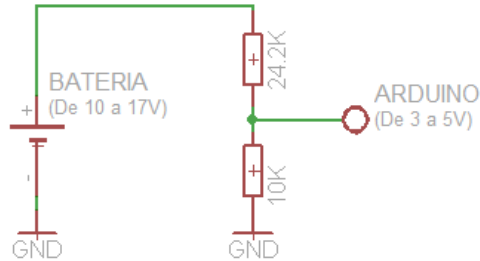


Figura 4-5: Esquema do circuito divisor de tensão.

A corrente máxima neste circuito não ultrapassa 0,5 mA, pelo que se admite que a medição da tensão por este meio tem pouca influência no valor a medir. Importa ainda referir que não são esperados efeitos adversos na medição da tensão e da corrente relacionados com a temperatura, uma vez que o sistema se destina a aplicações domésticas, onde a temperatura ambiente se encontra dentro de uma gama relativamente reduzida.

A medição da corrente de carga e de descarga é feita através de dois transdutores de corrente, cujas características principais constam da Figura 4-6.

Electrical data			
Type	Primary nominal current rms	Primary current, measuring range ¹⁾	RoHS since date code
	I_{PN} (A)	I_{PM} (A)	
HAS 50-S	50	± 150	45217
V_C	Supply voltage ($\pm 5\%$) ¹⁾	± 15	V
I_C	Current consumption	± 15	mA
R_{IS}	Isolation resistance @ 500 VDC	> 1000	M Ω
V_{OUT}	Output voltage (Analog) @ $\pm I_{PN}$, $R_L = 10\text{ k}\Omega$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	$\pm 4V \pm 40$	mV
R_{OUT}	Output internal resistance	approx 100	Ω
R_L	Load resistance ²⁾	> 1	k Ω
Accuracy - Dynamic performance data			
X	Accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$ (excluding offset)	$< \pm 1$	%
ϵ_L	Linearity error ³⁾ ($0 \dots \pm I_{PN}$)	$< \pm 1$	% of I_{PN}
V_{OE}	Electrical offset voltage, $T_A = 25^\circ\text{C}$	$< \pm 20$	mV
V_{OH}	Hysteresis offset voltage @ $I_p = 0$, after an excursion of $1 \times I_{PN}$	$< \pm 20$	mV
TCV_{OE}	Temperature coefficient of V_{OE}	HAS 50-S	$< \pm 2$ mV/K
		HAS 100 .. 600-S	$< \pm 1$ mV/K
TCV_{OUT}	Temperature coefficient of V_{OUT} (% of reading)	$< \pm 0.1$	%/K
t_r	Response time to 90 % of I_{PN} step	< 3	μs
di/dt	di/dt accurately followed	> 50	A/ μs
BW	Frequency bandwidth (-3 dB) ⁴⁾	DC .. 50	kHz

Figura 4-6: Principais características do transdutor de corrente [34].

Os transdutores possuem uma gama de medição entre 0 e 50 A, apresentando na saída um valor de tensão proporcional à corrente que os atravessa (de 0 a 4 V). Ambos os transdutores foram calibrados (segundo o mesmo procedimento) e a linearidade da tensão de saída foi verificada, para uma gama de correntes de 0 a 10 A.

Os condutores dos circuitos de carga e descarga foram enrolados (4 espiras) em torno dos toróides, permitindo uma melhor utilização da gama de medição dos transdutores.

4.3 Carregador de corrente constante

O módulo de carga integrado na plataforma foi desenvolvido com base numa fonte industrial de 24 V (10 A) que alimenta um driver constituído por MOSFET, os quais, funcionando como uma fonte de corrente controlada por tensão, permitem o fornecimento de uma corrente constante à bateria.

A Figura 4-7 apresenta a característica dos MOSFET utilizados - corrente dreno-fonte (*Drain-Source*), em função da tensão dreno-fonte, para diferentes valores da tensão da porta (*gate*).

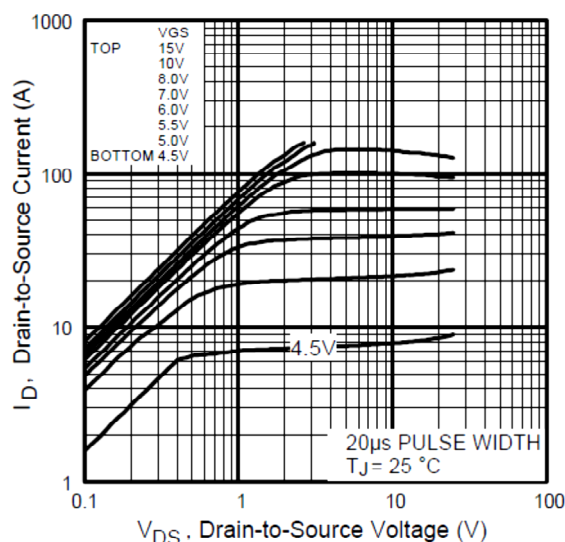


Figura 4-7: Característica de saída dos MOSFET utilizados [35].

O circuito implementado para controlo da corrente de carga encontra-se esquematizado na Figura 4-8. De acordo com este esquema, para que um MOSFET conduza um determinado valor de corrente, a tensão da gate (relativamente à massa) terá que ser a soma da tensão da bateria com a tensão de controlo.

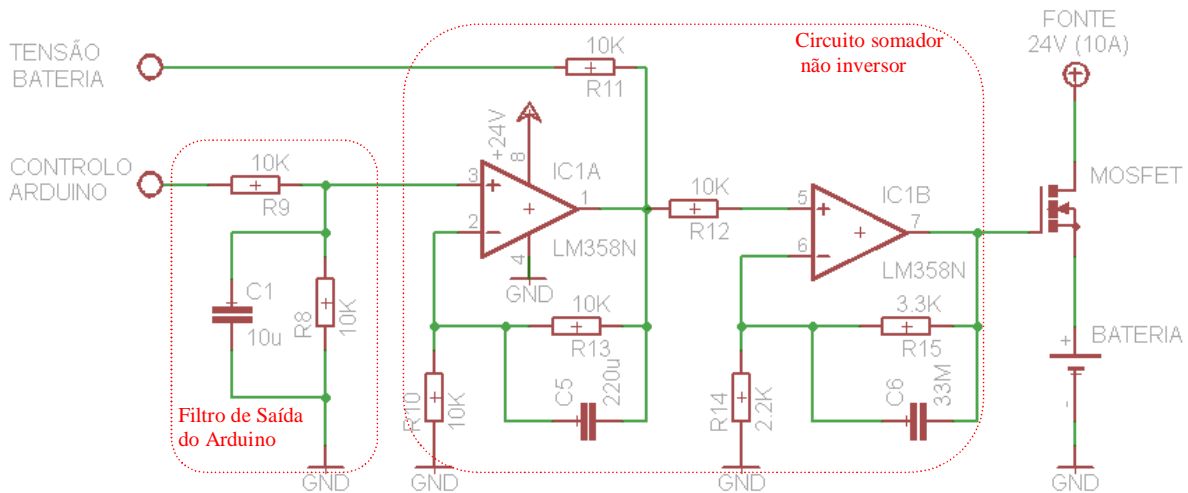


Figura 4-8: Esquema do circuito de controlo da corrente de carga.

A tensão de controlo (saída do Arduino) é um sinal PWM com frequência de 500 Hz e amplitude 5 V (por defeito), cujo *duty cycle* é parametrizável por *software*, entre 0 e 100%.

O circuito de conversão do sinal PWM em tensão DC, que permite controlar a condução de corrente pelo MOSFET, é constituído por um filtro RC de 1ª ordem em série com uma cascata de amplificadores operacionais montados numa configuração somador não inversor (conforme ilustrado na Figura 4-8).

A tensão de controlo, à saída do 1º estágio de amplificação, varia entre 0 e 5 V (DC), consoante o *duty cycle* do sinal PWM varia entre 0 e 100%, respetivamente. O filtro de 1ª ordem converte o sinal PWM em tensão DC conforme o exemplo do gráfico da Figura 4-9.

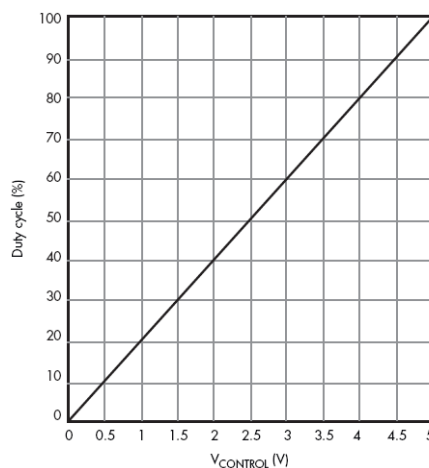


Figura 4-9: Resposta de um filtro RC de 1ª ordem, em função de um sinal PWM [36].

A saída do 2º estágio de amplificação, ou seja, a tensão da *gate* do MOSFET, é a soma da tensão da bateria com a tensão de controlo proveniente do 1º estágio de amplificação.

O ganho de cada um dos amplificadores da cascata foi calculado para que a tensão da *gate* (relativamente à tensão da bateria) varie entre cerca de 2 a 4 V, para que o MOSFET conduza correntes de dreno-fonte, respetivamente, de 0 a 10 A.

A corrente de carga é parametrizável, por *software*, para qualquer corrente compreendida entre 0 e 10 A.

4.4 Sistema de descarga

O banco de cargas utilizado na plataforma de teste das baterias é apresentado na Figura 4-10, sendo constituído por 4 resistências que podem absorver, respetivamente 1, 2, 3 e 5 A da bateria.

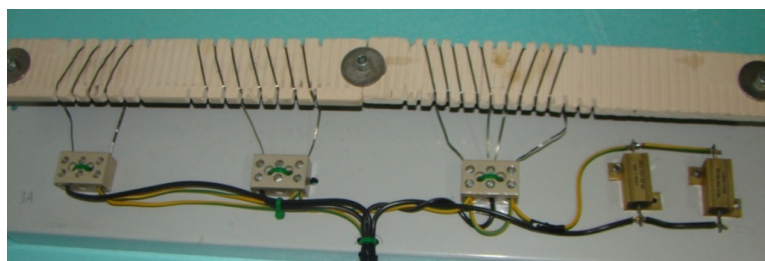


Figura 4-10: Pormenor do banco de cargas.

A associação destas resistências (operada pelo controlador) permite a obtenção de correntes de descarga com valores entre 1 e 10 A, com discretização de 1 A. O *driver* que permite controlar a potência a partir do Arduino é constituído por um conjunto de foto-acopladores e relés, montados de acordo com o esquema da Figura 4-11.

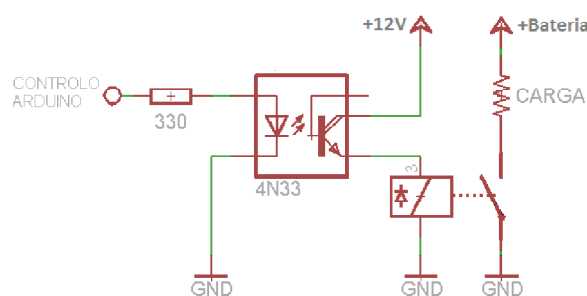


Figura 4-11: Esquema do *driver* de potência, constituído por foto-acoplador e relé.

Os foto-acopladores foram utilizados com o intuito de prevenir sobrecargas perigosas ao controlador (por isolamento ótico).

4.5 Algoritmo desenvolvido para realização dos ensaios

O algoritmo foi desenvolvido no ambiente de programação do Arduino e tendo em consideração a futura integração no algoritmo de estimativa do SoC e do SoH, através da criação de rotinas e variáveis que dinamizam a operacionalidade de todo o sistema. Sublinham-se as seguintes funcionalidades:

- Possibilidade da criação de vários regimes de carga e de descarga, através da parametrização das correntes e do tempo por cada ciclo (de carga e de descarga);
- Integração de sistemas de segurança com deteção dos níveis mínimos e máximos da tensão da bateria. Em caso de máximo ou mínimo de tensão, o sistema desliga todos os dispositivos de carga e de descarga da bateria;
- Deteção de bateria desligada (por mínimo de tensão);
- Deteção de cartão SD não inserido ou inválido;
- Informação visual (através de um LED) de falhas relacionadas com limites de tensão da bateria e com o cartão SD;
- Ajuste automático da corrente de carga, através do controlo da tensão fornecida aos MOSFET;
- Registo da tensão, corrente, tempo e contagem da carga, em ficheiro “.txt”, a cada ciclo de aproximadamente 1 segundo;
- Cálculo da carga em μAs , aumentando a precisão da contagem de *Coulomb*;
- Mensagens de estado do sistema através do *serial monitor* do Arduino, caso exista um computador ligado via USB ao controlador;
- Parametrização de intervalos de espera entre ciclos de carga e de descarga e registo da evolução da tensão da bateria em vazio.

O programa, cujo funcionamento se tipifica no fluxograma da Figura 4-12, (e cujo código se encontra no Anexo 1) é composto por uma rotina de “*Setup*”, uma rotina principal “*Loop*” e por um conjunto de sub-rotinas que executam um conjunto de tarefas repetitivas ao longo do programa. A rotina “*Setup*” corre apenas uma vez quando se executa o programa e é responsável pela inicialização das portas digitais e do cartão SD. A rotina principal “*Loop*” estabelece *setpoints* e define a sequência de carga/descarga pretendida. Esta rotina passa parâmetros (corrente, tempo e nomes dos ficheiros a criar) às sub-rotinas de carga e descarga, que são chamadas de acordo com os ensaios a realizar.

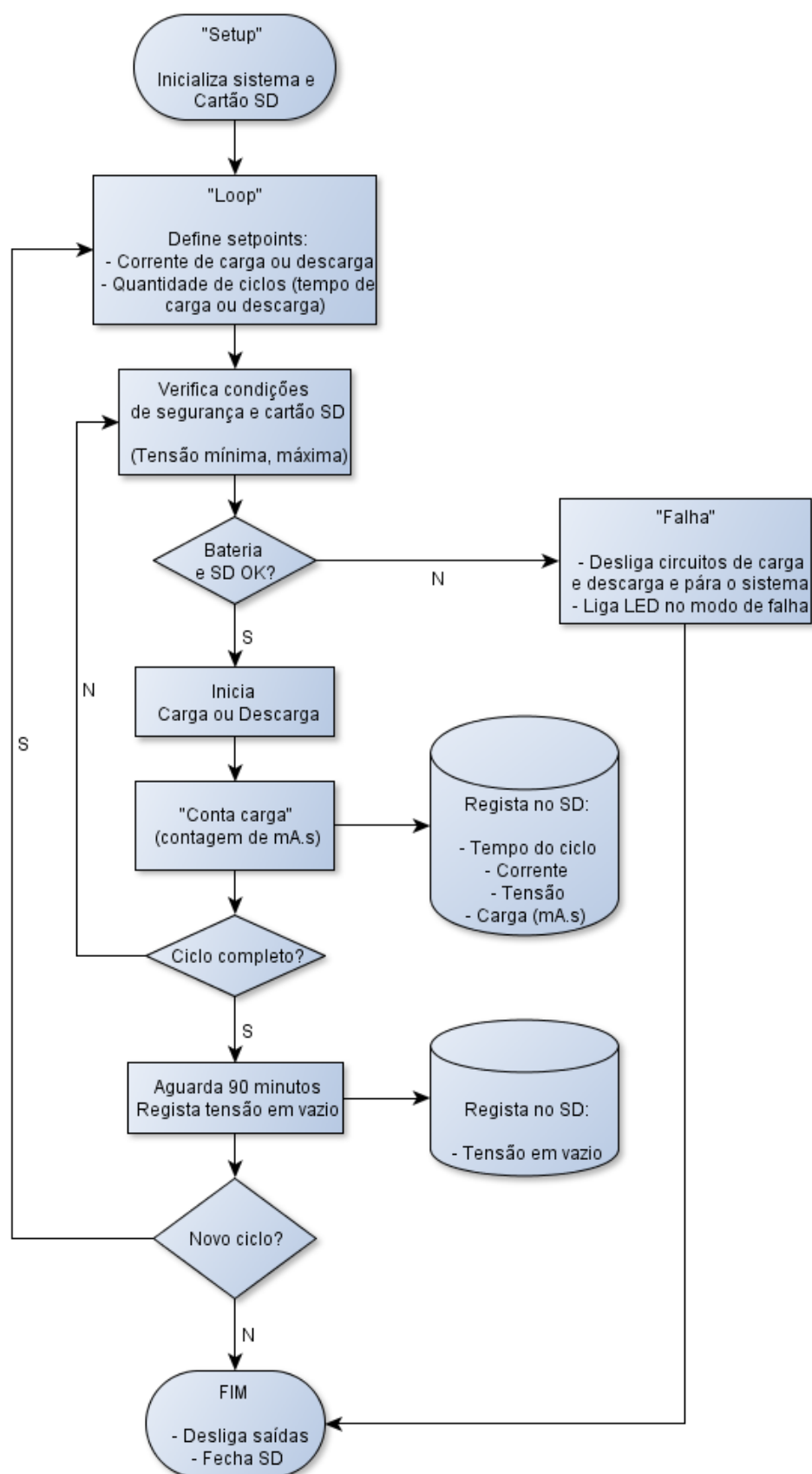


Figura 4-12: Fluxograma geral do programa desenvolvido para a realização de ensaios.

4.6 Algoritmo de estimativa do SoC e do SoH

Atendendo aos resultados dos ensaios realizados à bateria LiFePO_4 (veja-se o capítulo 5) e ao conteúdo do subcapítulo 3.5 (no qual se enunciaram as vantagens e inconvenientes dos principais métodos de estimativa do SoC) adotou-se neste trabalho um método baseado na contagem de *Coulomb* para estimar o SoC de uma bateria LiFePO_4 .

Apesar de não possibilitar a estimativa do SoC inicial e de ser sensível a erros de medição da corrente (que se podem acumular ao longo dos ciclos de carga/descarga – veja-se a Figura 4-13), a contagem de *Coulomb* continua a ser o método mais utilizado para estimar o SoC de uma bateria [32].

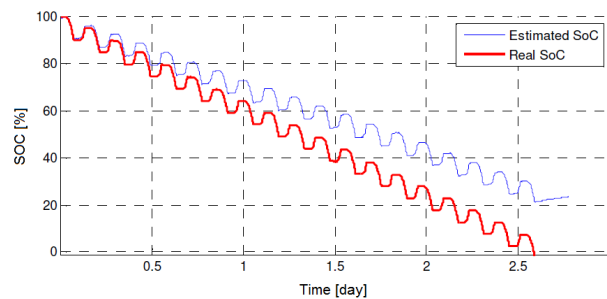


Figura 4-13: SoC estimado (contagem de *Coulomb*) em função do SoC real [32].

O gráfico da Figura 4-13 ilustra a evolução do SoC real de uma bateria (a vermelho) e o SoC estimado (a azul) ao longo do tempo. Note-se que a diferença entre o SoC estimado e o SoC real aumenta em função do tempo e do número de ciclos de carga/descarga, ou seja, o erro é cumulativo e deve-se, sobretudo, a erros de medição e arredondamentos internos do sistema de contagem [32].

Uma técnica utilizada frequentemente para eliminar o efeito cumulativo do erro que advém da contagem de *Coulomb* é a calibração periódica do contador, ou seja, periodicamente o sistema deve ser reinicializado com a contagem real. Esta técnica pode incluir um teste de descarga (realização da descarga total da bateria) ou a medição da OCV (tensão em circuito aberto) como forma de conhecer a carga real da bateria num determinado momento. Contudo, estes procedimentos têm o inconveniente de ser morosos e implicarem a paragem do sistema (medição *offline*) [32].

A técnica que, neste trabalho se desenvolveu e aplicou no algoritmo de estimativa do SoC, pretende ir além das técnicas tradicionais e consiste no reajuste dinâmico do algoritmo de estimativa do SoC e do SoH. Por outras palavras, o algoritmo utilizado tem a capacidade de se autoajustar face ao comportamento da bateria que vai variando ao longo dos ciclos de carga/descarga.

Assim espera-se, em oposição às técnicas tradicionais, a convergência da estimativa do SoC para um valor próximo do SoC real.

De salientar que, neste trabalho, o conceito de SoC que se utiliza é ligeiramente diferente daquele que habitualmente se considera. Com efeito, o conceito habitual define o SoC como sendo, em valor percentual, o quociente entre a carga em Ah que a bateria possui num dado momento e a sua capacidade estipulada, também em Ah. Assim, uma bateria com capacidade de 100 Ah que possua uma carga de 80 Ah terá um SoC de 80% no âmbito do conceito mais habitual de SoC.

Neste trabalho, o SoC é definido como sendo, em valor percentual, o quociente entre o valor da carga que a bateria pode efetivamente fornecer (“ C_{atual} ”) e a respetiva carga estipulada (“ C_{est} ”), conforme se exemplifica na Equação (4-1).

$$SoC = \frac{C_{atual}}{C_{est}} * 100\% \quad (4-1)$$

Note-se que este conceito de SoC difere daquele mais habitual devido às perdas existentes no processo de descarga. Retomando o exemplo acima, se a mesma bateria então considerada apresentar um rendimento de descarga de 90%, então o SoC para a definição aqui efetuada será de 72%.

O mecanismo responsável pela contagem da carga que é carregada e descarregada da bateria, assim como pelo autoajuste dinâmico do SoC, será descrito adiante na secção 4.6.1.

Quanto à estimativa do SoH, adotou-se uma técnica que consiste na comparação da carga máxima que a bateria atinge no momento em que se considera totalmente carregada (sendo a carga total determinada por máximo de tensão), com a carga estipulada da bateria. O SoH em percentagem é, portanto, obtido através do quociente entre a carga máxima atingida pela bateria “ C_{full} ” e a respetiva carga estipulada “ C_{est} ”, conforme se expressa na Equação (4-2).

$$SoH = \frac{C_{full}}{C_{est}} * 100\% \quad (4-2)$$

O algoritmo desenvolvido, cujo código consta do Anexo 2, encontra-se explicitado no fluxograma da Figura 4-14. Note-se que as funcionalidades existentes no algoritmo desenvolvido para ensaios foram mantidas, nomeadamente as rotinas de carga/descarga e os sistemas de segurança (as quais não se incluem no fluxograma da Figura 4-14).

De uma forma geral, os processos de carga e descarga da bateria são idênticos, à exceção das rotinas “Conta carga” e “Ajusta FCC e SoH”, identificadas a laranja no fluxograma da Figura 4-14), consistindo:

- Na contagem da carga (em μ As) a cada ciclo do programa (de aproximadamente 1 segundo);

- Na atualização do contador geral, no qual se soma ou subtrai a carga contada em cada ciclo, consoante a bateria está a ser carregada ou descarregada;
- Na atualização das saídas em tensão que correspondem ao SoC e SoH;
- Na atualização de saídas digitais que serão ativadas caso se verifique a ocorrência de alarmes pré-programados (veja-se o Quadro 4-1).

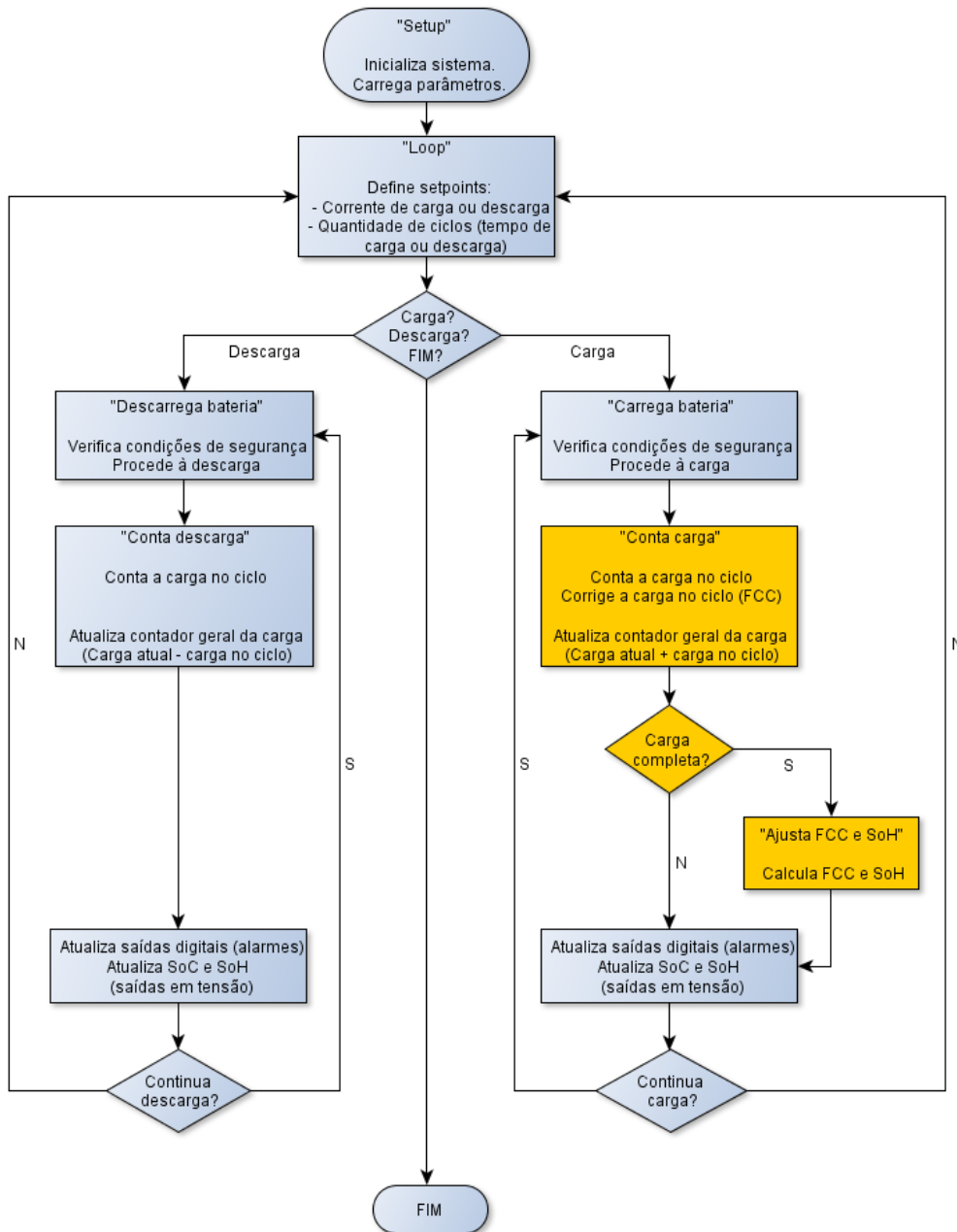


Figura 4-14: Algoritmo desenvolvido para estimar o SoC e o SoH de uma bateria.

Quadro 4-1: Descrição das saídas digitais ativadas por alarme.

Variável	Alarme	Descrição
“PinDOut_SOH”	Alarme de SoH baixo	Ativa saída caso o SoH seja inferior a “SoH_m” (parametrizado para 80%)
“PinDOut_A1”	Alarme bateria baixa - nível 1	Ativa saída caso o SoC seja inferior a “SoC_A11” (parametrizado para 10%)
“PinDOut_A2”	Alarme bateria baixa - nível 2	Ativa saída caso o SoC seja inferior a “SoC_A12” (parametrizado para 5%)

Importa referir que o fluxograma da Figura 4-14 se refere à forma como os testes foram implementados e inclui as rotinas utilizadas para simular os perfis de teste adotados, nomeadamente, a definição de *setpoints* (tempo e corrente de carga/descarga) e a gestão do carregador e do banco de cargas. Naturalmente que, numa aplicação prática do algoritmo, tais funcionalidades são dispensáveis.

O fluxograma da Figura 4-15 tipifica o funcionamento do algoritmo, quando integrado numa aplicação real. Note-se que, adicionalmente ao algoritmo que se representou no fluxograma da Figura 4-14, este implementa um mecanismo de verificação do sentido da corrente (carga que é carregada ou descarregada da bateria).

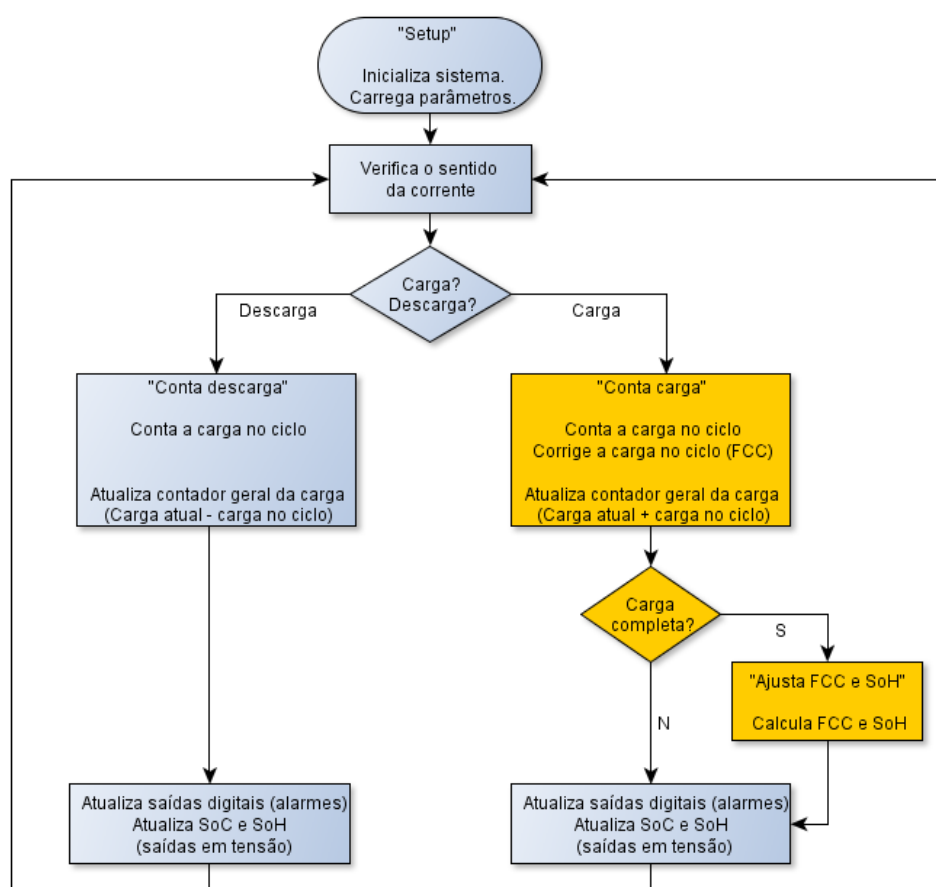


Figura 4-15: Algoritmo de estimativa do SoC e SoH (aplicação real).

De salientar que os dados gerados pelos ensaios ao algoritmo de estimativa do SoC e do SoH que se descrevem no capítulo 6, foram armazenados no cartão SD para se permitir a sua análise e apresentação gráfica, contudo numa aplicação prática, a utilização do *datalogger* é dispensável (bem como as rotinas de acesso e escrita do cartão SD).

As saídas em tensão do controlador, que são proporcionais ao SoC e ao SoH (respetivamente, “Saida_SoC” e “Saida_SoH”), variam em função do SoC e do SoH, conforme se exemplifica no gráfico da Figura 4-16.

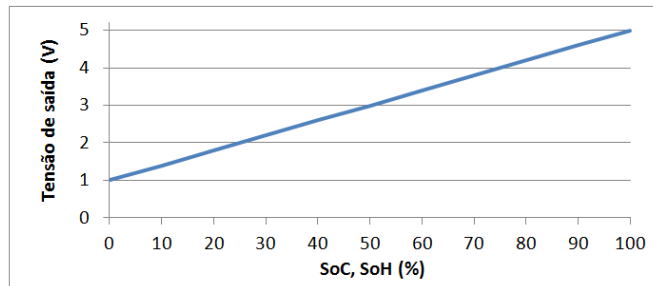


Figura 4-16: Tensão de saída do controlador em função do SoC/ SoH.

De notar que a tensão mínima (que corresponde a 0% do SoC ou do SoH) é diferente de zero (valor mínimo de 1 V), permitindo-se desta forma a identificação de uma eventual falha de comunicação ou do sistema de estimativa do SoC e do SoH, por parte de um dispositivo de monitorização externo.

A resolução da saída analógica do controlador é de 8 bits, ou seja, 256 níveis de tensão (cerca de 20 mV por nível). Assim, a resolução dos sinais correspondentes ao SoC e ao SoH é de cerca de 0,4%.

Os parâmetros que foram programados e que se relacionam diretamente com a bateria em teste encontram-se definidos no Quadro 4-2. Note-se que estes parâmetros devem estar em conformidade com as características da bateria em uso, nomeadamente os limites de tensão e a carga estipulada.

Quadro 4-2: Parâmetros do algoritmo de estimativa do SoC e do SoH.

Variável	Parâmetro	Descrição
Ubat_V_min	10000	Tensão mínima da bateria (mV)
Ubat_V_max	14500	Tensão máxima da bateria (mV)
CARGA_est	72000000	Carga estipulada da bateria (mAs)
FCC	97.80	FCC inicial
SoC_A11	7200000	SoC mínimo para gerar o alarme 1
SoC_A12	3600000	SoC mínimo para gerar o alarme 2
SoH_m	80	SoH mínimo para gerar alarme

4.6.1 Mecanismo de autoajuste dinâmico do algoritmo

O ajuste dinâmico do algoritmo, implementado nas rotinas “Conta carga” e “Ajusta FCC e SoH”, é realizado sempre que a bateria se encontra totalmente carregada. Assume-se que a bateria atingiu o estado de carga total quando a tensão aos seus terminais assume o máximo valor admissível. Importa referir que, dada a natureza da aplicação em estudo, se assume que a bateria é frequentemente sujeita a cargas completas, pelo que o ajuste tende a ocorrer de forma frequente.

O fluxograma da Figura 4-17 mostra a forma como o algoritmo efetua o autoajuste, cujo mecanismo depende, particularmente, dos seguintes processos:

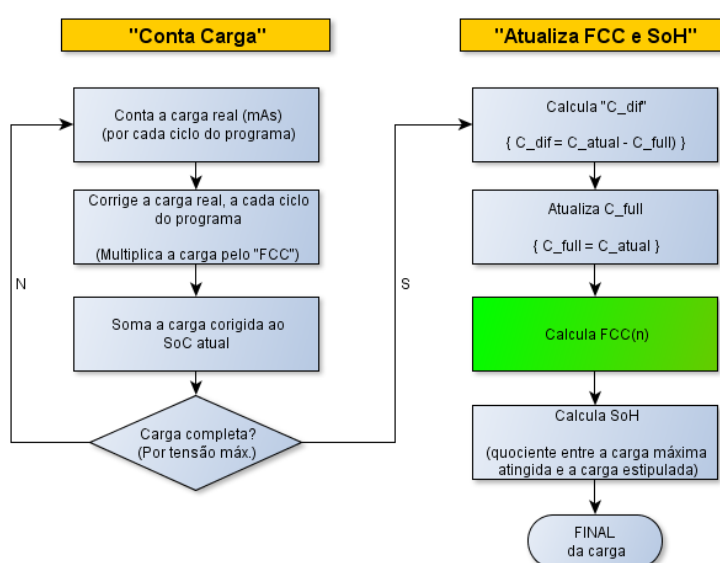


Figura 4-17: Rotinas responsáveis pelo cálculo e atualização do FCC e do SoH.

- i. **Ajuste (correção) da carga absorvida pela bateria** – A carga que é carregada na bateria é multiplicada, a cada ciclo do programa, por um fator de correção da carga (FCC). Este fator (FCC) deve ser inicializado, preferencialmente, com um valor igual ao rendimento típico da bateria⁴ (que contabiliza as perdas típicas nos processos de carga e de descarga). Note-se que, se o rendimento da bateria não variar ao longo dos ciclos de carga/descarga, o FCC irá permanecer constante. A correção da carga realiza-se na rotina “Conta carga”.

De salientar que, como referido anteriormente, o SoC estimado representa a carga que a bateria pode fornecer e não a carga que a bateria possui de facto (que naturalmente diferem em função das perdas internas da bateria). Tal resulta do facto da carga que é carregada na bateria ser atualizada pelo fator FCC que representa o rendimento dos

⁴ É desejável que o FCC seja inicializado com um valor semelhante ao rendimento típico da bateria (de forma a que a primeira estimativa do SoC seja a mais correta), caso contrário o algoritmo atuará (nos ciclos seguintes) no sentido da sua correção.

processos de carga e de descarga. Assim, a carga que é descarregada da bateria (que não é atualizada e corresponde à carga real) corresponde à carga (estimada) que a bateria pode fornecer (veja-se o fluxograma da Figura 4-17);

- ii. **Ajuste do FCC** – Naturalmente que existem perdas nos processos de carga e de descarga, as quais tendem a variar (ainda que ligeiramente) com os regimes de corrente em que os processos de carga e descarga ocorrem. O FCC representa, portanto, a relação entre a carga que é utilizada para carregar a bateria (superior à carga que efetivamente fica na bateria) e aquela que é descarregada da bateria. A atualização do valor FCC apenas ocorre nos ciclos em que se considera que a bateria se encontra totalmente carregada (tensão máxima atingida).

O processo de ajuste do FCC, ilustrado na rotina “Atualiza FCC e SoH” (veja-se o fluxograma da Figura 4-17), inicia-se com o cálculo da diferença “ C_{dif} ” existente entre a carga atual da bateria “ C_{atual} ” e a “ C_{full} ”. A “ C_{full} ” corresponde à carga máxima (momento em que se considerou a bateria totalmente carregada) que a bateria atingiu no ciclo anterior (ciclo “ $n-1$ ”). Note-se que, no primeiro ciclo de funcionamento ($n=1$), a “ C_{full} ” é inicializada com o valor da capacidade estipulada da bateria. A fase seguinte consiste na atualização da “ C_{full} ” que, a partir desse momento, assume o valor da carga atual (“ C_{atual} ”).

Por fim, é realizado o cálculo do FCC (bloco identificado a verde no fluxograma da Figura 4-17) de acordo com a expressão a que se refere a equação (4-3).

A carga que no ciclo seguinte ($n+1$), ou seja, no ciclo pelo qual a bateria é novamente carregada na sua totalidade, é carregada na bateria será, portanto, multiplicada pelo $FCC_{(n)}$.

$$FCC_{(n)} = FCC_{(n-1)} - \left[\left(\frac{C_{dif}}{C_{(full)}} \right) * 100 \right] \quad (4-3)$$

Considere-se, a título de exemplo, que uma bateria se encontra totalmente carregada e que o FCC foi corretamente inicializado. Após várias cargas e descargas parciais da bateria, esta é novamente carregada na sua totalidade. Neste momento, a rotina “Ajustar FCC e SoH” é chamada pelo algoritmo. Se a carga atual não diferir da “ C_{full} ” (carga máxima admitida pela bateria no último ciclo em que foi completamente carregada), o FCC permanece inalterado e as cargas no ciclo seguinte são corrigidas pelo mesmo valor.

No ciclo seguinte, por influência da alteração do rendimento da bateria ou de erros de medição, a carga que a bateria possui no momento em que é novamente carregada na sua totalidade (“ C_{atual} ”) é, por exemplo, superior a “ C_{full} ”. Esta situação significa que o FCC foi anteriormente sobrevalorizado e a carga absorvida foi contada por excesso. Neste caso, o FCC

é atualizado relativamente ao FCC anterior, ao qual se subtrai o correspondente (em percentagem) à diferença entre a “ C_{atual} ” e a “ C_{full} ”.

A situação inversa ocorre quando a carga da bateria é estimada por defeito (inferior à “ C_{full} ”), ou seja, o FCC foi subvalorizado e a carga carregada na bateria foi contada por defeito. Neste caso, o FCC é aumentado relativamente ao FCC anterior, ao qual é somada a diferença (em percentagem) entre a “ C_{atual} ” e a “ C_{full} ”.

Conforme se poderá verificar nos ensaios realizados no subcapítulo 6.3, o FCC vai tender para um valor final que corresponderá à relação entre a carga que é carregada e descarregada da bateria.

4.7 Gama de operação da plataforma

A plataforma desenvolvida, conforme descrito, integra um sistema de carga e de descarga desenvolvido para a gama de tensão e corrente da bateria em teste. Naturalmente que numa aplicação real pode ser utilizado um banco de baterias cuja capacidade, corrente e tensão sejam muito superiores ou inferiores à bateria em teste (devendo o circuito ser convenientemente adaptado).

O controlador usado permite fazer a contagem de 596,5 Ah (antes do *overflow* da variável que guarda o SoC), contudo, este número pode ser aumentado com recurso a técnicas de programação. Os valores máximos admissíveis de tensão e de corrente são virtualmente infinitos, bastando a adaptação dos transdutores de corrente e do divisor de tensão. O sistema pode funcionar por um período de tempo virtualmente infinito, contudo ressalva-se o facto do contador interno que permite a contagem do tempo (em ms) reiniciar a cada 50 dias (aproximadamente) devido ao *overflow* da variável associada – a consequência da reinicialização desta variável é a perda da contagem de um ciclo do programa (cuja duração é de cerca de 1 segundo), considerada desprezável.

4.7.1 Adequação do sistema a outras tecnologias de baterias

A aplicação da plataforma a baterias Chumbo-ácidas ou de Níquel (ou eventualmente uma outra tecnologia de baterias de iões de Lítio) com características diferentes em termos de métodos de carregamento, correntes máximas admissíveis e limites de tensão implica a adaptação da plataforma de ensaios. O algoritmo de estimativa do SoH e SoC foi otimizado para a tecnologia LiFePO_4 , contudo a técnica adotada para estimativa do SoC (contagem de *Coulomb*) é aplicável a todos os tipos de baterias [31]. Antevê-se portanto que, devidamente parametrizado, o algoritmo desenvolvido poderá funcionar com outras tecnologias de baterias, no entanto com as seguintes restrições:

- As baterias LiFePO_4 são caracterizadas (mesmo quando sujeitas a correntes de carga e de descarga mais elevadas) por apresentarem um rendimento elevado e praticamente constante em função do perfil de carga/descarga (vejam-se os ensaios descritos nos subcapítulos 5.3 e 5.4). Uma vez que o rendimento de uma bateria Chumbo-ácida ou de Níquel é mais baixo e pode variar em função da corrente de carga/descarga, também o FCC (que tende a convergir para um determinado valor quando em funcionamento com uma bateria LiFePO_4) pode variar em função de diferentes perfis de carga/descarga. Note-se que, quanto maior for a variação do rendimento da bateria em função do perfil de carga/descarga, maior será o erro da estimativa do SoC e do SoH;
- O estado de carga máximo é detetado (recorrendo à medição da tensão máxima da bateria) com maior exatidão nas baterias de LiFePO_4 , uma vez que possuem baixa resistência interna e que as curvas de tensão não variam significativamente (em comparação com as tecnologias de baterias Chumbo-ácidas ou de Níquel) em função da corrente de carga. Desta forma, e sendo que a estimativa do SoC e do SoH depende da deteção do SoC máximo para realização do autoajuste do algoritmo, poderá ocorrer uma maior influência do perfil de carga na estimativa do SoC e do SoH de baterias Chumbo-ácidas ou de Níquel, quando comparadas às baterias de LiFePO_4 ;
- Ao contrário das baterias de LiFePO_4 , as tecnologias de baterias de Níquel e Chumbo-ácidas possuem efeito de memória [16] que poderá influenciar a estimativa do SoC e do SoH (uma vez que existe dependência dos ciclos de carga/descarga anteriores).

5. Ensaios realizados à bateria em teste

5.1 Organização e motivo dos ensaios

O objetivo prático dos ensaios realizados é conhecer as características associadas à bateria LiFePO_4 que permitam a implementação de um algoritmo adequado para estimar o estado de carga (SoC) e de saúde (SoH) da bateria. De acordo com o estudo desenvolvido no subcapítulo 3.2, destacam-se com maior relevância os ensaios de determinação do perfil de carga e de descarga (corrente constante), os ensaios dinâmicos (perfis de carga/descarga variáveis ao longo do tempo) e o comportamento da tensão em vazio. Os tipos de ensaios realizados, bem como os resultados observados, resumem-se no Quadro 5-1.

A influência da temperatura não foi âmbito de estudo, bem como a influência de cargas ou descargas realizadas por correntes pulsadas (influência de conversores eletrônicos), embora o seu impacto seja reduzido (perda de capacidade inferior a 4%, no pior dos casos), de acordo com os ensaios realizados por Yao-Ching, H. *et al* [27], descritos no subcapítulo 3.2.6. Quanto à influência da temperatura, de acordo com Marongiu, A. *et al* [21] (subcapítulo 3.2.3), os resultados dos ensaios não são afetados significativamente para temperaturas iguais ou superiores a 25 °C. Nos ensaios realizados à temperatura de 10 °C, a perda de capacidade da bateria foi da ordem dos 3 %.

Durante os ensaios, o controlador registou, a cada ciclo de processamento (parametrizado para uma duração de 1 segundo), os valores de tensão, corrente e tempo. Adicionalmente, a contagem da carga que efetivamente foi carregada ou descarregada da bateria, foi calculada pelo produto da corrente (em mA) pelo tempo (em ms). Após cada ensaio, o sistema repousou durante um intervalo de tempo suficiente para estabilizar térmica e quimicamente a bateria.

Os ensaios foram conduzidos à temperatura ambiente (20 °C) e a carga da bateria foi efetuada com recurso ao método da corrente contante (CC), conforme descrito no subcapítulo 3.3.

Quadro 5-1: Descrição dos ensaios e resultados observados.

	Resultados observados	Descrição
Ensaio estáticos	Perfis de carga e de descarga (estáticos)	Curva de tensão em função da capacidade e do tempo, para diferentes correntes de carga e descarga;
	Comportamento da tensão em vazio	Registo da tensão em vazio, após uma carga ou descarga completa;
	Contagem da carga	Contagem da carga absorvida e fornecida pela bateria, em função de diferentes correntes de carga e de descarga;
	Rendimento (em regime estático)	Cálculo do rendimento da bateria para diferentes correntes (contantes) de carga/descarga;
Ensaio dinâmicos	Perfil dinâmico de carga/descarga	Representação da curva de tensão em função da corrente de carga e descarga (variável);
	Contagem da carga	Contagem da carga absorvida e fornecida pela bateria, em função do perfil de corrente de carga/descarga;
	Rendimento (em regime dinâmico)	Cálculo do rendimento em função do perfil de corrente de carga/descarga.

5.2 Características das baterias em teste

O principal objetivo prático deste trabalho consiste no ensaio de uma bateria de 20 Ah (12 V) composta por um conjunto de células LiFePO₄ e por um circuito eletrónico de proteção. A bateria ensaiada tem as características apresentadas no Quadro 5-2, sendo do fabricante Autosil [37].

Quadro 5-2: Resumo das características da bateria GL27H, de 20 Ah [38].

Refª. AUTOSIL	I456301
Tensão	12 V
Capacidade	250 Wh
Peso	3.5 kg
Dimensões	175 x 165 x 124 (C x L x A) (mm)
Tensão de carga normal	14.5 V
Tensão de carga máx.	15.2 V
Tensão de carga mín.	14.1 V
Limite de descarga (<i>cutoff</i>)	10 V
Corrente máx. (Protecção circuito electrónico)	10 A (outras a pedido)

O circuito de proteção eletrónico (BMS) protege a bateria contra cargas e descargas excessivas e gere o balanceamento das células. A corrente máxima admissível tanto na carga como na descarga é de 10 A, correspondendo a 0,5C.

O gráfico da Figura 5-1, fornecido pela Autosil, representa o ciclo de carga e descarga típico de uma célula de 10 Ah (3,2 V), onde a curva a azul representa a corrente de carga e de descarga (em mA) e a curva a preto representa a tensão aos terminais da célula, em função do tempo (em minutos).

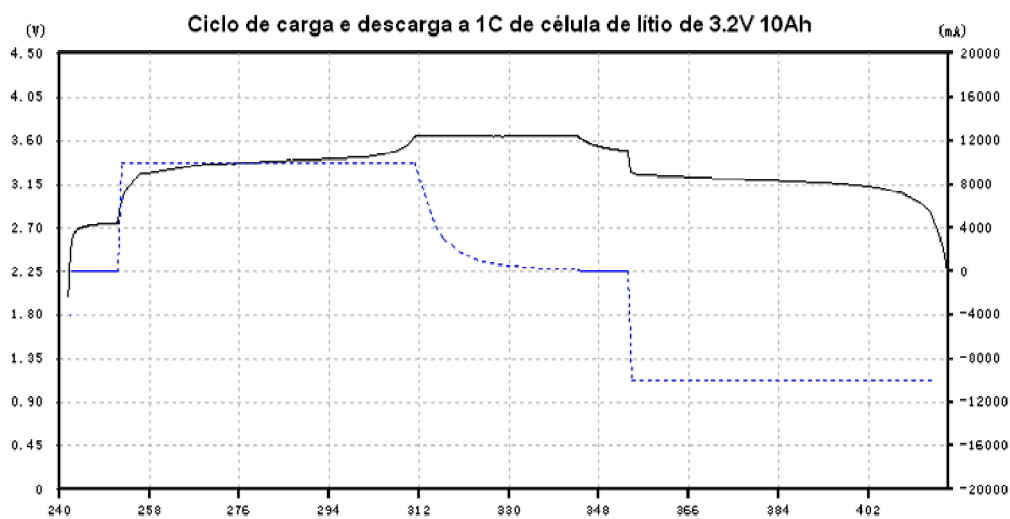


Figura 5-1: Característica de carga e descarga de uma célula de 10 Ah.

A capacidade de uma célula de 10 Ah em função da taxa de descarga (*C-rate*) e da temperatura é representada no gráfico da Figura 5-2 (informação fornecida pela Autosil). Note-se que a bateria pode fornecer mais de 100% da capacidade estipulada, caso a descarga seja feita até uma corrente correspondente a 5C e com uma temperatura superior a 30 °C.

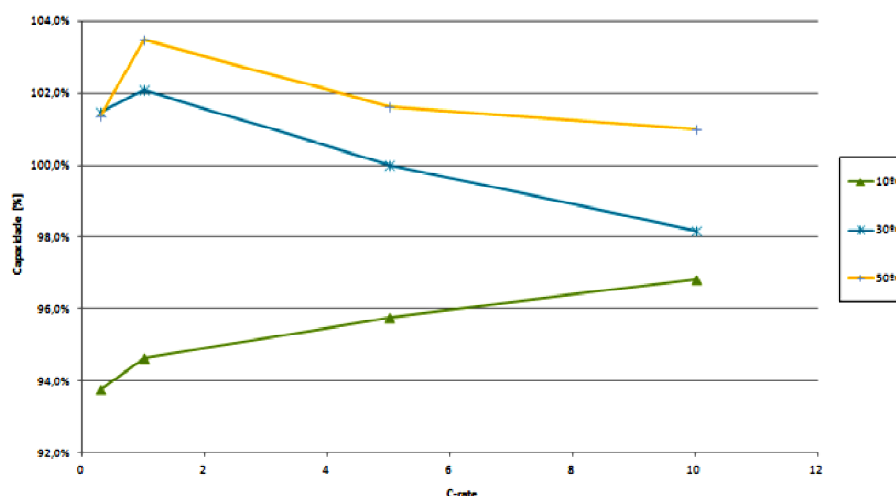


Figura 5-2: Descarga de uma célula de 10 Ah com diferentes *C-rate* e temperaturas.

Como complemento ao Quadro 5-2, e após solicitação à Autosil, foi obtida a seguinte informação adicional:

- O perfil de carga é do tipo IV, em que a corrente de carga é constante até se atingir a tensão final de carga (3,65 V/célula). Quando a tensão atinge esse valor, mantém-se a tensão constante e a corrente de carga decresce até atingir 5% da corrente nominal da bateria, valor após o qual se considera a bateria totalmente carregada;
- As tensões (máximas e mínimas) referidas nas características referem-se sempre a tensões em carga;
- A tensão de carga normal de 14,5 V é equivalente a uma tensão por célula de 3,63 V. Para se preservar a vida útil das células, e conseqüentemente da bateria, é conveniente que a tensão de carga da bateria não exceda os 14,6 V;
- O valor de tensão de carga máxima, igual a 15,2 V, refere-se à tensão máxima admitida pelo circuito de proteção eletrónico. Caso atinja um valor superior, este circuito atuará desligando a bateria;
- O limite de descarga (*cutoff*) de 10 V é o valor mínimo de tensão em descarga, controlado pelo circuito de proteção eletrónico de modo a garantir que a bateria não seja sujeita a uma descarga excessiva, que provocaria sérios danos na vida útil e desempenho da mesma;
- A corrente máxima de carga e descarga encontra-se limitada eletronicamente a 10 A, correspondendo a um *C-rate* de 0,5C.

Durante a fase de teste e calibração da plataforma de ensaios, e com o objetivo de não provocar envelhecimento à bateria da Autosil, foi utilizada uma bateria de 40 Ah, composta por 4 células em série, com as características apresentadas no Quadro 5-3. Optou-se por esta configuração para se obter uma tensão na bateria semelhante à tensão da bateria de 20 Ah a testar.

Quadro 5-3: Principais características de uma célula de 40 Ah [39].

MODEL: TS-LFP40AHA			
Nominal capacity	40AH	Operation Voltage	Charge: 4.25V
			Discharge: 2.5V
Max Charge Current	≤3CA	Max Discharge Current	Constant Current ≤ 3CA
			Impulse Current ≤ 10CA
Standard Charge/Discharge Current	0.3CA	Cycle Life	(80DOD%) ≥2000Times
			(70DOD%) ≥3000Times
Temperature Durability Of Case	≤250°C	Operating Temperature	Charge: -25°C~75°C
			Discharge: -25°C~75°C
Self-discharge Rate	≤3%	Weight	1.6kg ± 100g

A capacidade desta bateria (composta por 4 células em série) é de 40 Ah e os limites de tensão de carga e de descarga são respetivamente de 10 V e 17 V (valores admissíveis pela plataforma de ensaios).

As curvas de descarga destas baterias (tensão em função da capacidade), ilustradas na Figura 5-3, mostram que quanto maior a corrente de descarga menor a capacidade fornecida pelas células. Pode ainda observar-se na figura referida que, para uma determinada capacidade, a tensão aos terminais da célula será tanto menor quanto maior for a corrente de descarga.

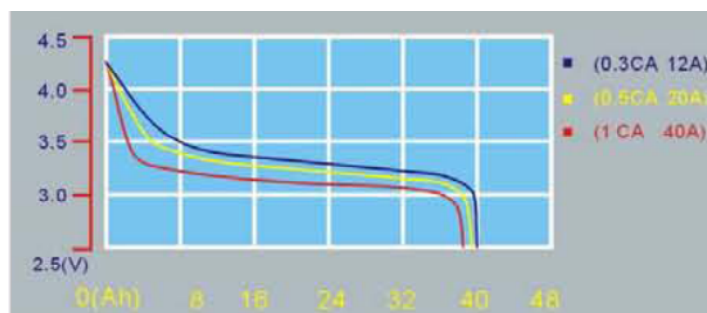


Figura 5-3: Característica de descarga de uma célula LFP40AHA [39].

5.3 Ensaios estáticos (corrente constante)

A sequência de ações definida para cada um dos ensaios, encontra-se esquematizada no fluxograma da Figura 5-4.

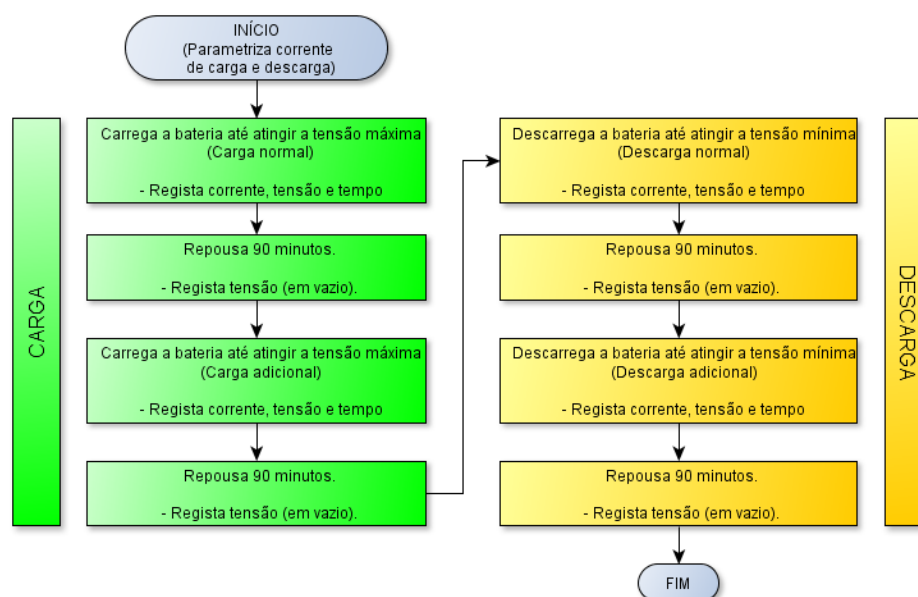


Figura 5-4: Sequência de ações realizadas nos ensaios estáticos.

Note-se que os processos de carga/descarga envolvem duas fases: Carga/descarga “normal” e carga/descarga “adicional”. Esta abordagem pretendeu facultar a avaliação da carga adicional que a bateria pode absorver, após ter sido considerada totalmente carregada (por máximo de tensão). Da mesma forma, após a bateria se considerar totalmente descarregada (por mínimo de tensão), foi determinada a carga remanescente que esta poderia fornecer. Importa referir que a carga ou descarga adicionais, foram efetuadas após o período de estabilização da bateria e com uma corrente baixa, equivalente a 0,1C.

Com o intuito de se compararem dados, foram realizados 3 conjuntos de ensaios (semelhantes) para cada uma das correntes de carga e descarga definidas no Quadro 5-4.

Quadro 5-4: Correntes de carga / descarga a utilizar nos ensaios.

Corrente (A)	C-rate correspondente	
	Bateria de 40 Ah	Bateria de 20 Ah
1	-	0,05
2	0,05	0,1
3	-	0,15
4	-	0,2
5	0,125	0,25
6	-	0,3
7	-	0,35
8	-	0,4
9	-	0,45
10	0,25	0,5

A bateria de 40 Ah foi testada apenas com correntes de 2, 5 e 10 A, visando fundamentalmente aferir as medições efetuadas pela plataforma de ensaios e calibrar a mesma. Os resultados destes ensaios são apresentados no Anexo 3.

Os resultados que se apresentam em seguida referem-se, portanto, à bateria de 20 Ah. Por uma questão de simplicidade, os gráficos dos perfis de carga e de descarga representam apenas as curvas de tensão correspondentes aos ensaios realizados com correntes de 2, 5 e 10 A. Os gráficos que representam a totalidade das curvas de tensão ensaiadas, encontram-se no Anexo 4.

5.3.1 Perfil de carga

A Figura 5-5 e a Figura 5-6 mostram o perfil de tensão durante o processo de carga da bateria (de 20 Ah) em função, respetivamente, do nível de carga e do tempo.

O gráfico da Figura 5-5 mostra que, no início do processo de carga, existe uma zona em que a tensão sobe rapidamente (até cerca de 10% da capacidade), verificando-se em seguida uma

zona em que a tensão sobe ligeiramente à medida que a carga aumenta. Esta zona de tensão quase constante mantém-se até que a carga da bateria atinja cerca de 90% da capacidade. A partir dos 90% da capacidade regista-se um novo aumento rápido da tensão até ao valor máximo admissível pela bateria.

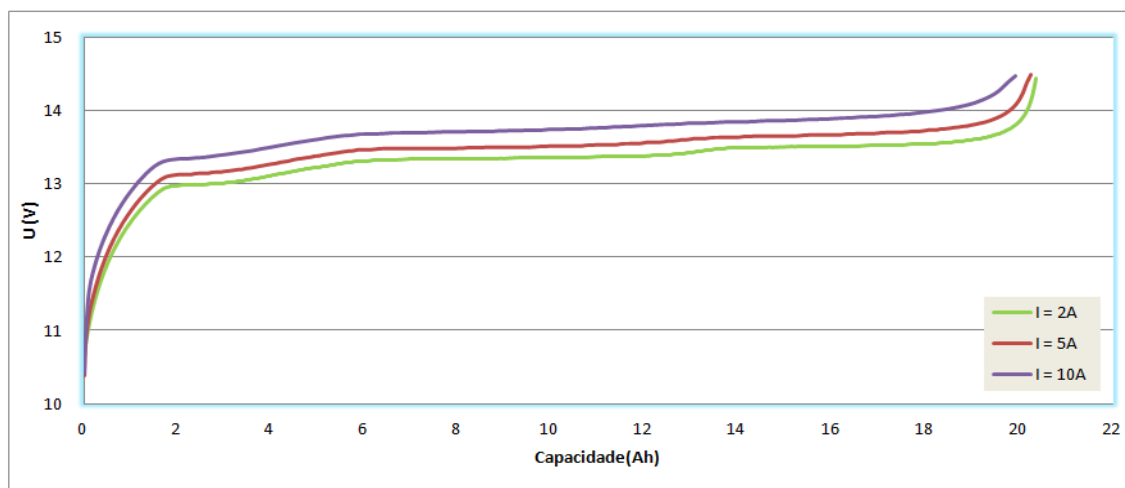


Figura 5-5: Perfil de carga – Tensão em função da capacidade.

A Figura 5-5 mostra ainda que a tensão aos terminais da bateria é tanto maior, quanto maior for a corrente de carga, uma vez que a tensão (medida em carga) aos terminais da bateria é a soma da tensão em vazio (OCV) com a componente dinâmica U_{dyn} (de acordo com o esquema elétrico equivalente ilustrado no subcapítulo 3.1.1) que depende da corrente que atravessa a bateria.

As curvas de tensão em função do tempo (Figura 5-6) são em tudo idênticas às curvas traçadas em função da capacidade. Para uma corrente de carga superior, o tempo de carga é inferior. Com efeito, a bateria de 20 Ah carregou em cerca de 2 horas, com uma corrente de 10 A (0,5C) e em aproximadamente 10 horas com uma corrente de 2 A (0,1C).

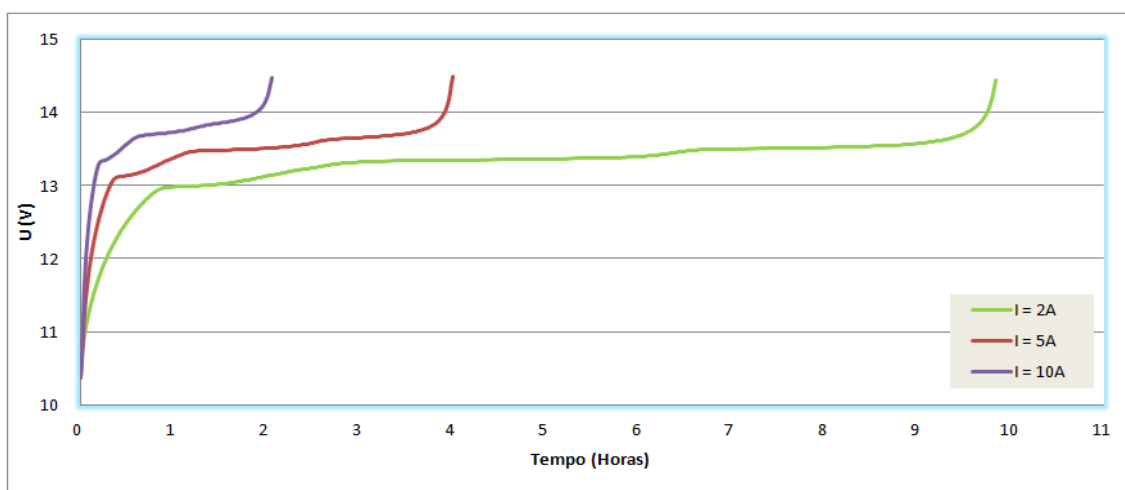


Figura 5-6: Perfil de carga – Tensão em função do tempo.

5.3.2 Perfil de descarga

Os gráficos da Figura 5-7 e da Figura 5-8 mostram o perfil de tensão durante o processo de descarga da bateria em função, respetivamente, do nível de carga e do tempo.

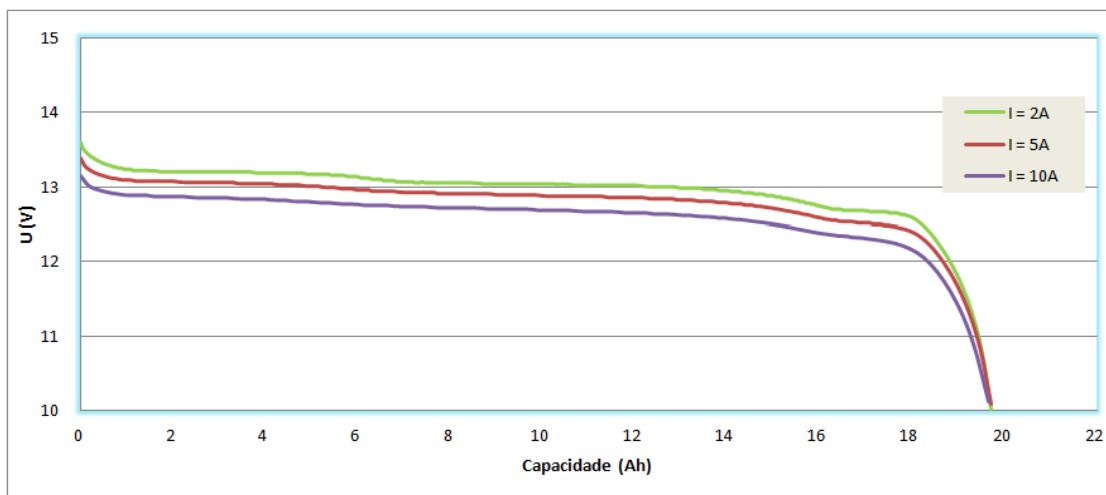


Figura 5-7: Perfil de descarga – Tensão em função da capacidade.

O gráfico da Figura 5-7 mostra que, no início do processo de descarga, existe uma zona em que a tensão desce rapidamente, verificando-se em seguida uma zona em que a tensão desce ligeiramente à medida que a bateria descarrega. Esta zona de tensão quase constante mantém-se até que a bateria chegue a um nível de descarga próximo dos 90% da capacidade estipulada. A partir deste ponto regista-se novamente uma descida rápida da tensão até ao valor mínimo admissível pela bateria.

A tensão aos terminais da bateria é tanto menor, quanto maior for a corrente de descarga, devido à queda de tensão U_{dyn} (veja-se subcapítulo 3.1.1) provocada pela resistência interna da bateria.

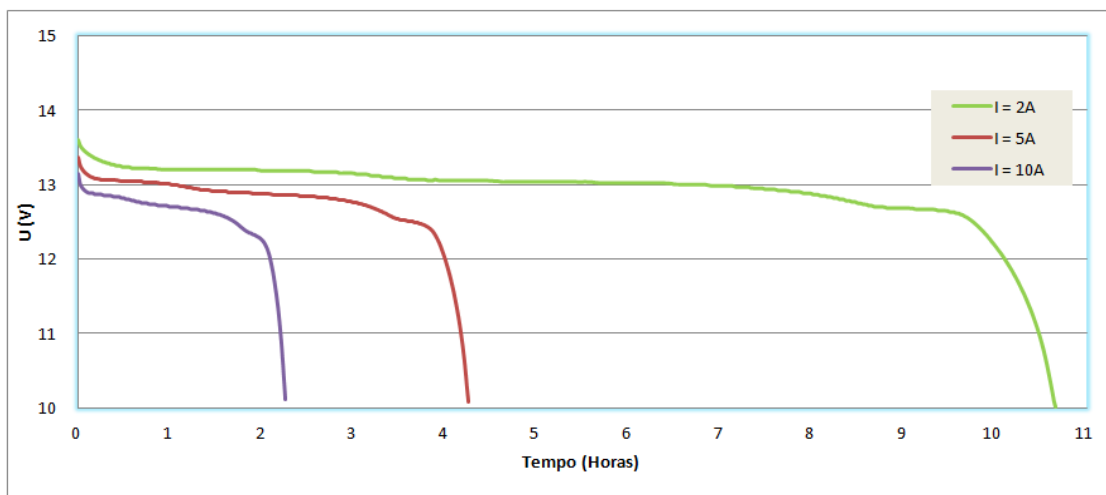


Figura 5-8: Perfil de descarga – Tensão em função do tempo.

5.3.3 Evolução da tensão em vazio

A Figura 5-9 ilustra o comportamento no tempo da tensão em vazio, lida após a bateria ter sido carregada ou descarregada (carga e descarga normal) com correntes de 1, 5 e 10 A.

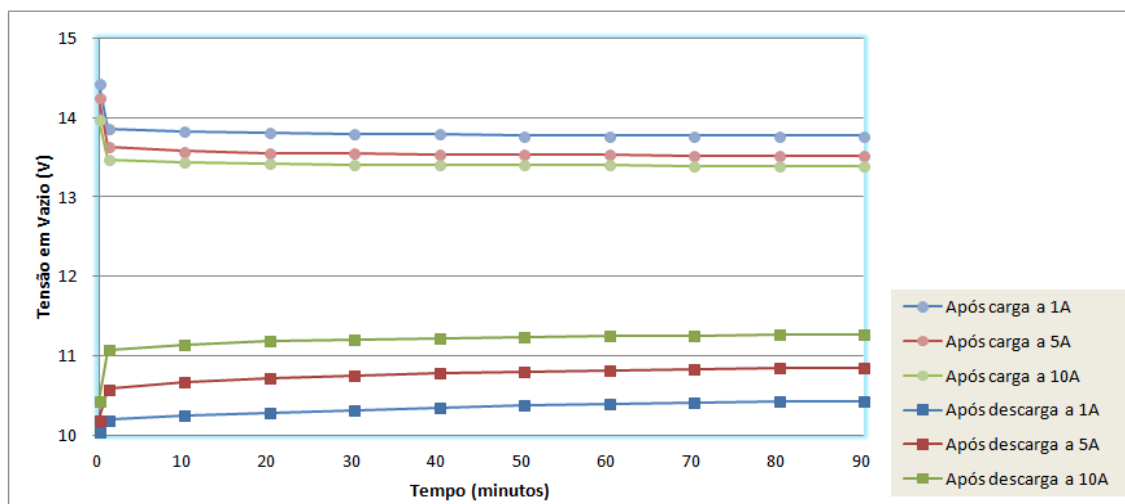


Figura 5-9: Evolução da tensão em vazio, após carga/descarga normal.

Nos primeiros instantes após o processo de carga ter sido desligado verifica-se uma acentuada queda de tensão. Um fenómeno semelhante, embora em sentido contrário, ocorre após o final de um processo de descarga, onde a tensão sobe bruscamente. Estas variações de tensão são tanto maiores quanto maior for a corrente de carga ou descarga, devendo-se, principalmente, ao efeito produzido pela resistência interna da bateria (componente U_{dyn}).

Após esta variação inicial, a tensão regista um valor praticamente constante (com uma variação inferior a 1% após o processo de carga e de cerca de 2,5%, após um processo de descarga). Esta pequena variação de tensão ao longo do tempo deve-se principalmente à estabilização térmica e química da bateria.

Relativamente ao valor final de tensão (registado após um tempo de repouso de 90 minutos), verifica-se que correntes de carga inferiores conduzem a valores finais de tensão superiores, enquanto correntes de descarga inferiores deixam a bateria com uma tensão inferior.

Tal acontece em virtude da tensão em vazio depender do estado de carga da bateria (veja-se subcapítulo 3.2.5). De acordo com os dados do subcapítulo 5.3.4, a carga da bateria é menor quando esta é carregada com uma corrente mais elevada. Da mesma forma, a carga remanescente da bateria aumenta para correntes de descarga superiores.

Conclui-se que, uma vez que diferentes correntes de carga e de descarga conduzem a diferentes estados de carga (após uma carga ou descarga normal), a tensão em vazio é função corrente de carga e de descarga (conforme se verifica na Figura 5-9).

Neste seguimento, e de acordo com o gráfico da Figura 5-10, no qual se encontram as tensões em vazio registadas após cargas e descargas adicionais, o valor final da tensão em vazio tende para o mesmo valor (13,7 V, após uma carga e 10,3 V, após uma descarga), uma vez que a bateria se considera totalmente carregada ou descarregada, respetivamente após cargas ou descargas adicionais.

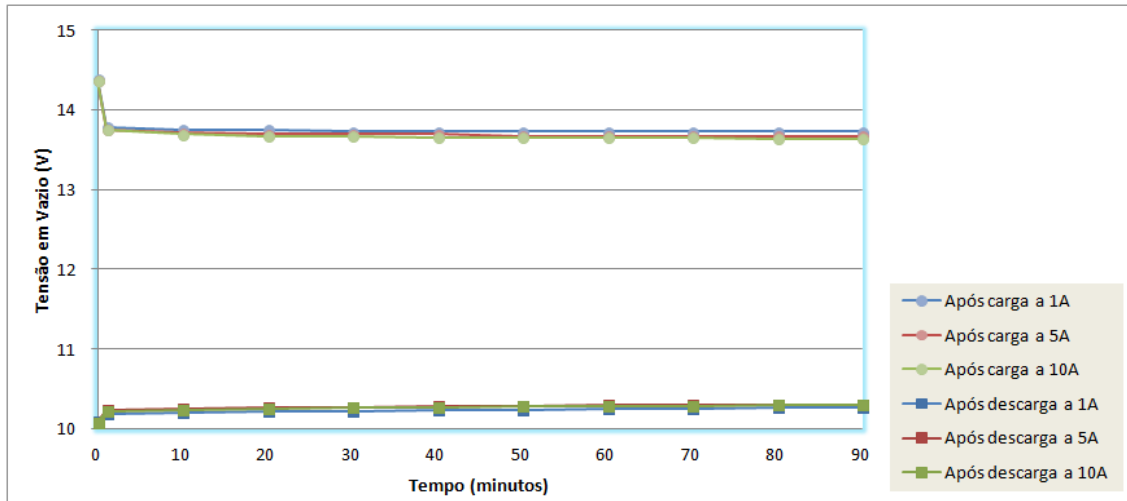


Figura 5-10: Evolução da tensão em vazio, após carga/descarga adicional.

5.3.4 Contagem da carga

Os gráficos da Figura 5-11 e da Figura 5-12 apresentam, respetivamente, a carga (média aritmética dos 3 conjuntos de ensaios) absorvida e fornecida pela bateria. Os resultados individuais de cada um dos conjuntos de ensaios encontram-se ilustrados no Anexo 5.

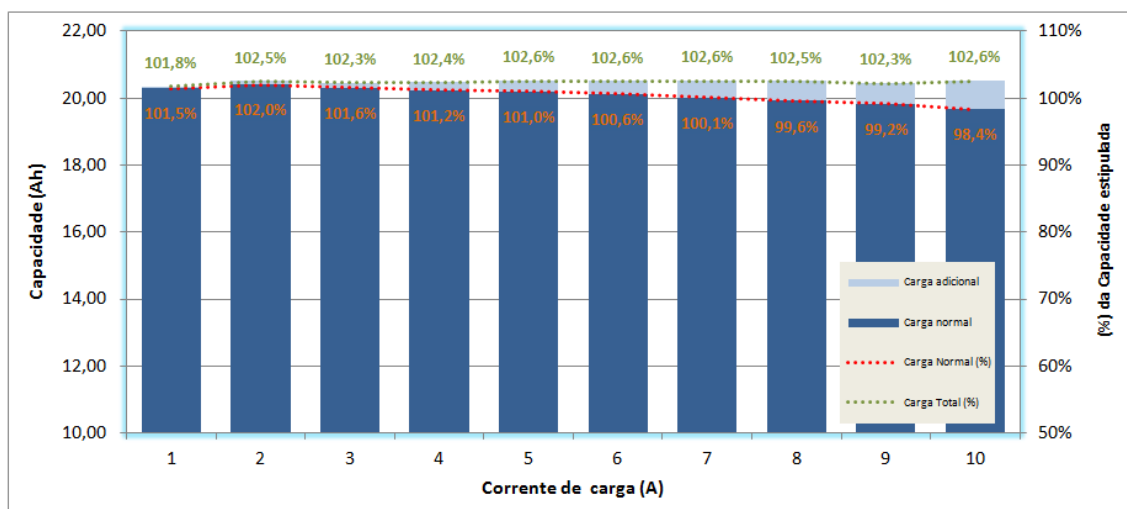


Figura 5-11: Carga média absorvida pela bateria em função da corrente de carga.

O valor médio da carga (carga normal e carga adicional) que foi absorvida pela bateria durante os ensaios foi de 20,48 Ah (102,4% da capacidade estipulada). Note-se que, de acordo com as características da bateria apresentadas no subcapítulo 5.2, a capacidade da bateria pode ser superior à capacidade estipulada, nomeadamente quando utilizada com correntes mais baixas.

Independentemente da corrente de carga, a carga total da bateria é praticamente constante. Contudo, verifica-se que a carga “normal” decresce com o aumento da corrente de carga, pelo que a carga adicional aumenta à medida que a corrente de carga é mais elevada.

Da mesma forma, e considerando que em cada ensaio a bateria se encontra totalmente carregada, verifica-se que a carga total média fornecida pela bateria é praticamente constante (cerca de 20,04 Ah). Quanto maior for a corrente de descarga, menor é a carga normal fornecida. Uma vez que a carga média total é contante, a descarga adicional aumenta proporcionalmente à medida que a corrente de descarga é maior.

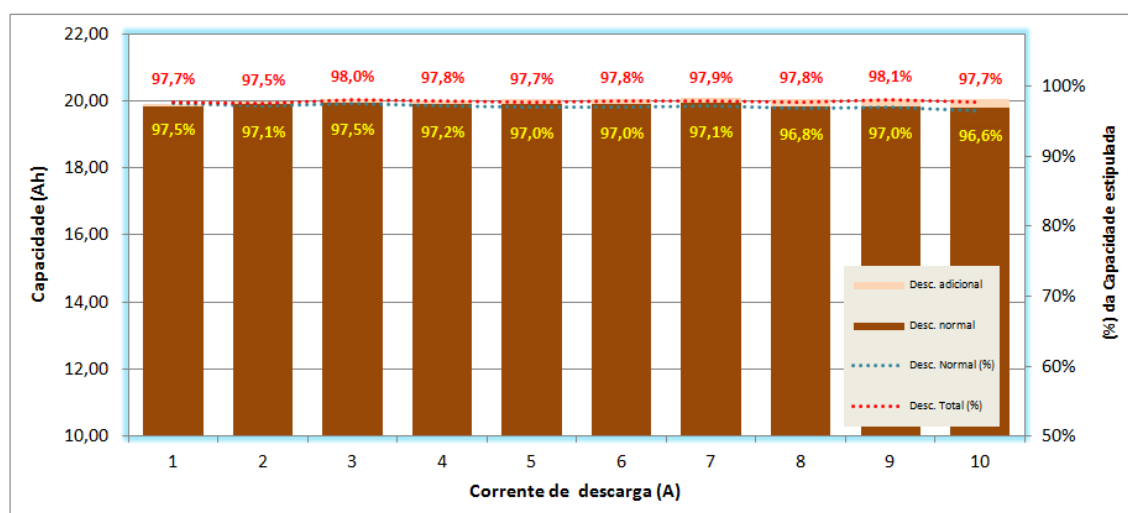


Figura 5-12: Capacidade média fornecida pela bateria em função da corrente de descarga.

5.3.5 Cálculo do rendimento global (em regime estático)

O rendimento médio global da bateria (média aritmética de todos os ensaios), calculado de acordo com a Equação (5-1), é de 97,8%.

$$\eta_{(Ah)} = \frac{Q_{(Fornecida)}}{Q_{(Absorvida)}}, \text{ onde } Q \text{ é a carga em Ah} \quad (5-1)$$

Seria de esperar que o rendimento diminuísse com o aumento da corrente de carga/descarga (devido, nomeadamente, dissipação de energia na resistência interna da bateria). Contudo, de acordo com o gráfico da Figura 5-13, verifica-se que o rendimento da bateria é praticamente

constante em função da corrente de carga/descarga. Tal verifica-se para a gama de correntes ensaiadas (de 0,05C a 0,5C) o que corresponde a apenas 5% da corrente máxima admissível pelas células (10C). De notar que, apesar das células suportarem cargas e descargas a 10C, o fabricante impôs, através do BMS que constitui a bateria, um limite máximo de 0,5C. Desta forma, a variação do rendimento em função da corrente é muito pouco significativa na gama de correntes de carga/descarga estipuladas pelo fabricante da bateria.

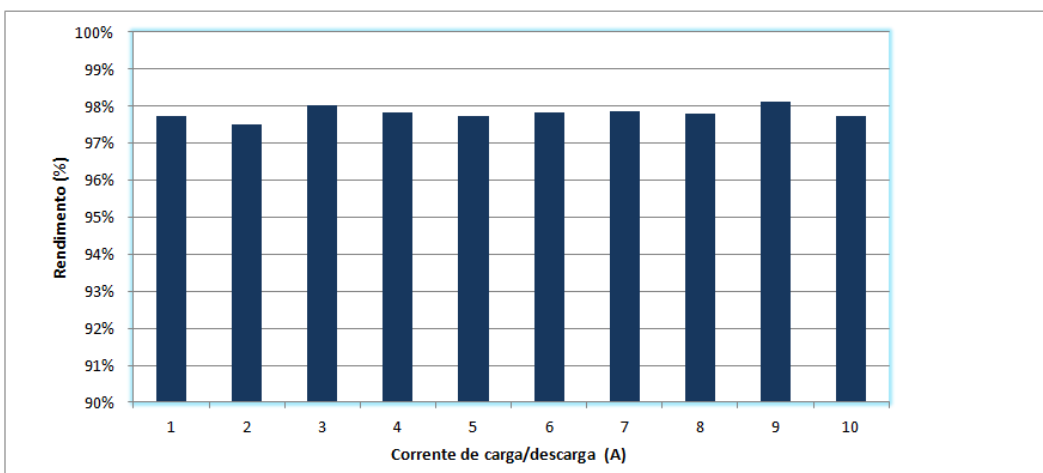


Figura 5-13: Rendimento médio global da bateria em função da corrente.

O rendimento obtido em cada um dos ensaios realizados é ilustrado na Figura 5-14. A variação máxima dos valores obtidos em cada um dos ensaios é inferior a 1% e deve-se, sobretudo, à influência dos erros de medição.

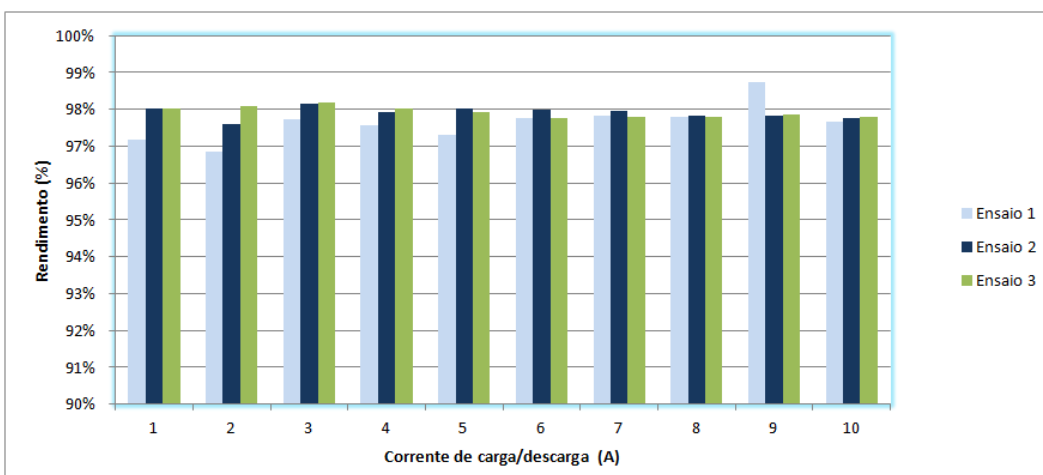


Figura 5-14: Rendimento médio por ensaio em função da corrente.

Comparativamente, a bateria de 40 Ah também testada, apresentou um rendimento médio global de 98,2%.

5.4 Ensaio dinâmicos (corrente variável)

Foram realizados 5 ensaios com perfis de carga/descarga dinâmicos. As correntes de carga e de descarga foram parametrizadas por forma a permitirem testar a bateria em condições adversas de utilização, ou seja, aumentos ou diminuições graduais ou repentinas da corrente de carga e de descarga e transições bruscas entre regimes de carga e de descarga.

5.4.1 Perfil dinâmico de carga/descarga

Os gráficos⁵ da Figura 5-15, Figura 5-16 e Figura 5-17, apresentam os perfis de corrente de carga/descarga (curva magenta, cuja escala se representa à direita) e a evolução da tensão da bateria (curva a azul, com escala do lado esquerdo).

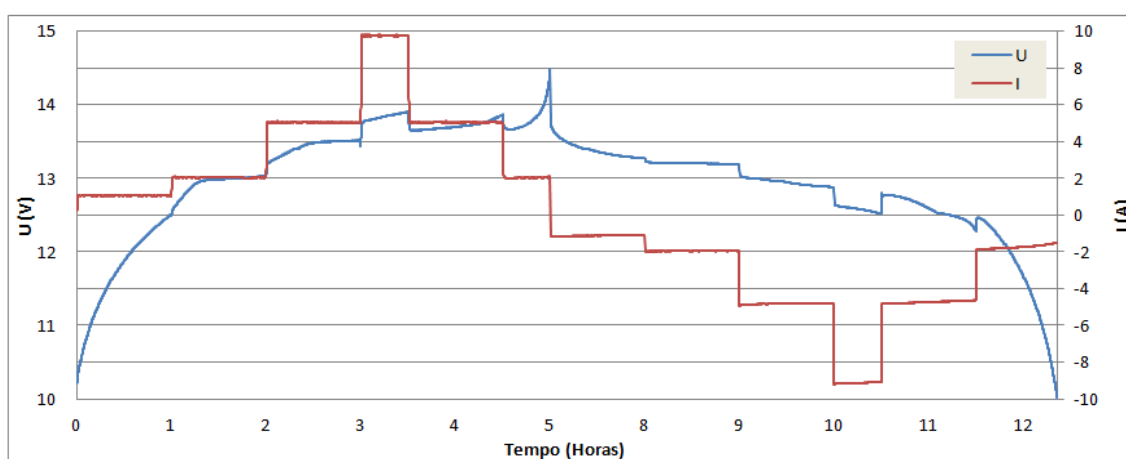


Figura 5-15: Ensaio dinâmico 1 - Tensão e perfil de corrente, em função do tempo.

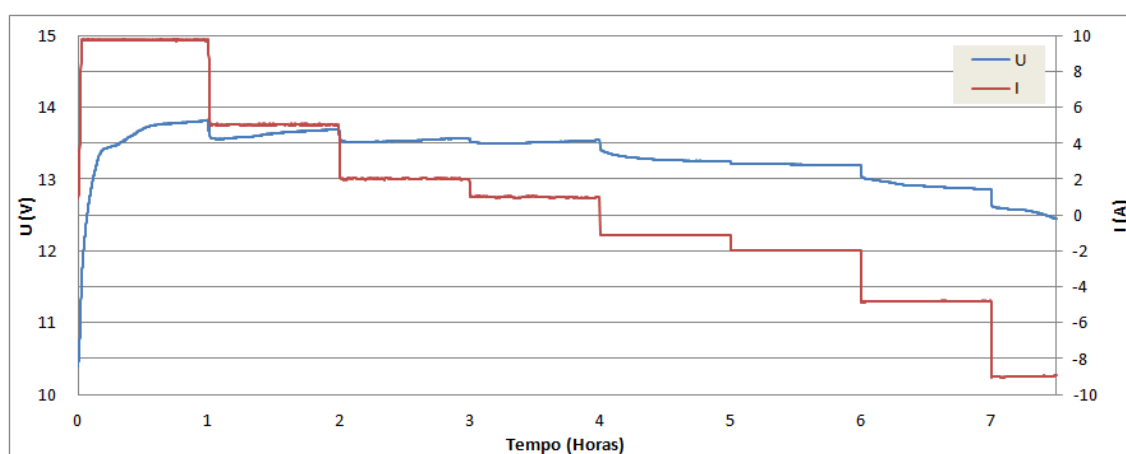


Figura 5-16: Ensaio dinâmico 2 - Tensão e perfil de corrente, em função do tempo.

⁵ Os valores negativos dos eixos correspondentes às correntes são meramente indicativos do sentido da corrente. Valores positivos representam a corrente no sentido do carregamento; Valores negativos representam a corrente no sentido da descarga.

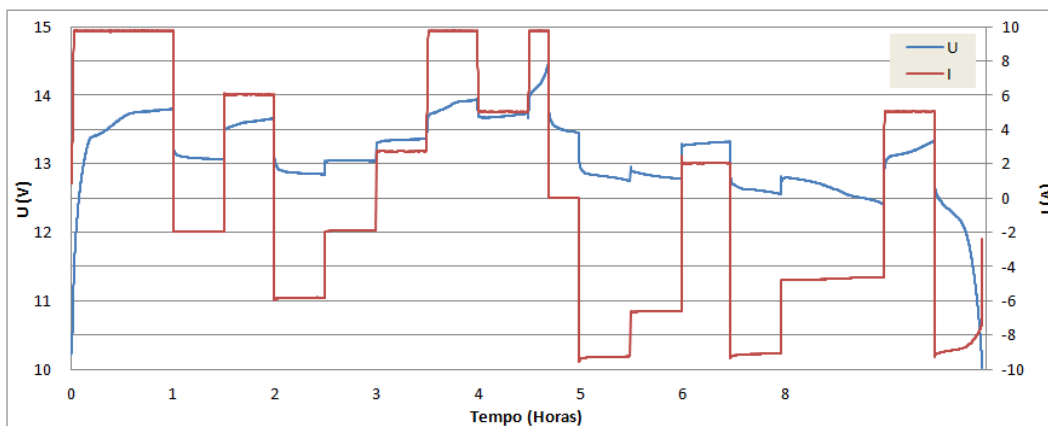


Figura 5-17: Ensaio dinâmico 3 - Tensão e perfil de corrente, em função do tempo.

As figuras mostram que a curva de tensão acompanha o perfil de corrente, à semelhança dos perfis de carga e descarga observados nos ensaios estáticos (vejam-se subcapítulos 5.3.1 e 5.3.2), no sentido em que a tensão aumenta à medida que a bateria carrega e diminui à medida que a bateria descarrega.

Com o 4º e 5º ensaio, cujos gráficos do perfil de carga e descarga se esquematizam, respetivamente, na Figura 5-18 e na Figura 5-19, pretendeu-se avaliar a influência profundidade da descarga no rendimento da bateria. Como tal, a bateria foi carregada/descarregada de 0 a 20% da capacidade estipulada (ensaio 4) e carregada/descarregada de 80 a 100% (ensaio 5).

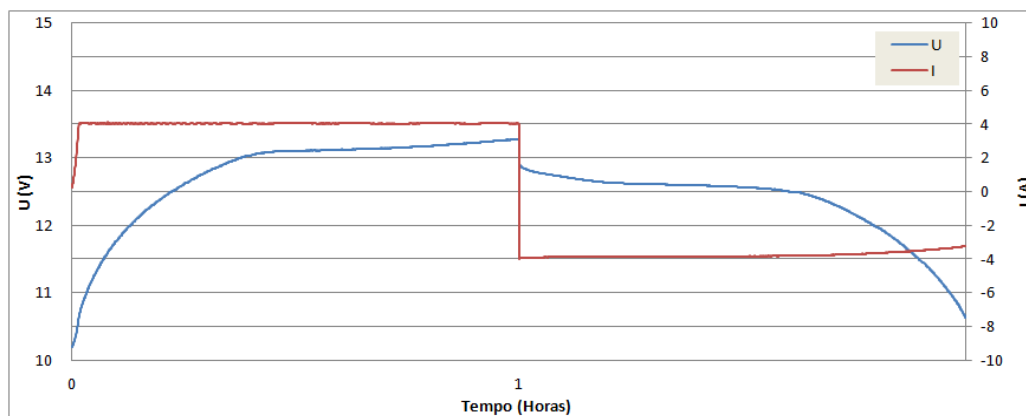


Figura 5-18: Ensaio dinâmico 4 - Tensão e perfil de corrente, em função do tempo.

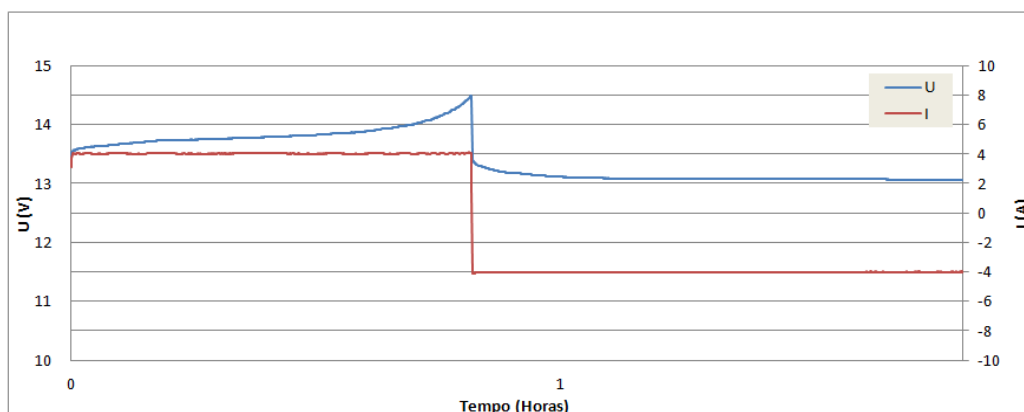


Figura 5-19: Ensaio dinâmico 5 - Tensão e perfil de corrente, em função do tempo.

A evolução da capacidade (em cada um dos ensaios) em função do tempo é ilustrada no gráfico da Figura 5-20.

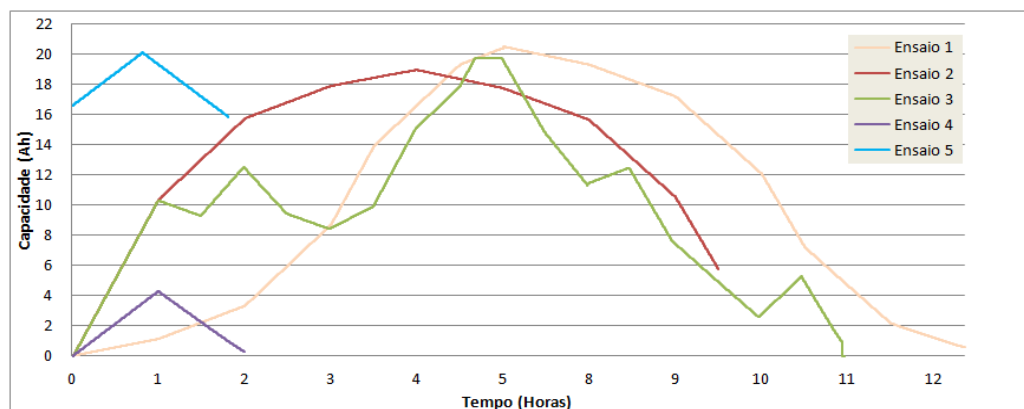


Figura 5-20: Evolução da capacidade em função do tempo, por ensaio.

5.4.2 Contagem da carga e rendimento em regime dinâmico

O Quadro 5-5 resume a contagem da carga efetivamente absorvida e fornecida pela bateria, em cada um dos ensaios. O rendimento foi calculado de acordo com a Equação (5-1), ou seja, o rácio entre a carga fornecida (somatório de todos os ciclos de descarga) e a carga absorvida (somatório de todos os ciclos de carga).

Quadro 5-5: Resumo da contagem da carga e do rendimento, por ensaio.

Ensaio nº	1	2	3	4	5
Carga absorvida (Ah)	20,50	18,95	28,76	4,29	20,10
Carga fornecida (Ah)	20,05	18,48	28,11	4,19	19,55
Rendimento (%)	97,8	97,5	97,7	97,8	97,3

Os resultados obtidos mostram que o rendimento da bateria não varia significativamente quando sujeita a perfis de carga/descarga com correntes variáveis, nomeadamente, variações bruscas entre regimes de carga e de descarga. Verifica-se, de igual forma, que o rendimento não é influenciado pela profundidade da descarga, ou seja, o rendimento não varia entre cargas/descargas completas (0 a 100%) e cargas/descarga parciais (0 a 20%) e (80 a 100%).

5.5 Discussão de resultados

Os resultados observados são consistentes com os pressupostos teorizados e testados pelos demais investigadores (Veja-se Capítulo 3.2), nomeadamente os perfis de carga/descarga e o rendimento médio global da bateria: 97,8%. Os perfis de carga e descarga obtidos, bem como a evolução da tensão em vazio, apresentam comportamento semelhante em ambas as baterias testadas (a bateria de 20 Ah e a bateria usada para os ensaios iniciais, de 40 Ah).

As curvas de tensão em carga são praticamente constantes, nomeadamente na gama compreendida entre os 10% e os 90% do SoC, embora os valores obtidos dependam da corrente de carga ou de descarga aplicada (como era de esperar).

A avaliação do comportamento da tensão em vazio revelou que, para além do tempo necessário à sua estabilização após um processo de carga ou descarga, não é um parâmetro adequado para indicação SoC da bateria, uma vez que depende do histórico do perfil de carga ou descarga. A estimativa do SoC de uma bateria LiFePO₄, através da medição da tensão (tanto em carga, como em vazio), revela-se, portanto, uma técnica muito pouco eficaz.

Quanto ao rendimento global da bateria, constatou-se que para as correntes testadas (de 0,05C a 0,5C), não existem variações significativas deste parâmetro (< 1%), mesmo nas situações em que se verificam variações bruscas entre cargas e descargas.

6. Ensaio realizados ao algoritmo de estimativa do SoC e do SoH

6.1 Sistema de teste

Com o objetivo de testar o desempenho do algoritmo de estimativa do SoC e do SoH implementado, considerou-se um sistema autónomo dotado de um gerador fotovoltaico e de um sistema de armazenamento constituído por baterias LiFePO₄, tal como se ilustra na Figura 6-1. Importa frisar que o sistema autónomo apresentado não foi otimizado, assunto que está fora do âmbito desta dissertação. Consequentemente, o critério que foi considerado na definição do sistema de teste foi o de garantir que a produção diária de eletricidade no gerador fotovoltaico é igual ou superior ao consumo diário típico.

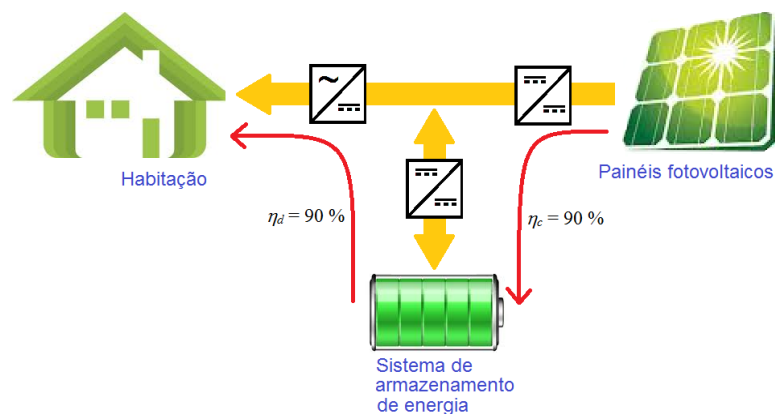


Figura 6-1: Sistema de teste adotado.

O funcionamento deste sistema é, portanto, baseado num ciclo de 24 horas, durante as quais o sistema armazena a energia proveniente da fonte renovável (quando produzida em excesso face ao consumo), libertando-a ao longo das horas em que a produção é insuficiente para satisfação do consumo.

Considerou-se uma potência máxima simultânea (na habitação) de 3,45 kVA e um consumo típico anual⁶ de 3672 kWh.

Para efeitos da definição do comportamento típico do consumo de eletricidade, adotou-se o perfil de consumo (BTN-C) para 2012 fornecido pela ERSE⁷ [40], ilustrado na Figura 6-2.

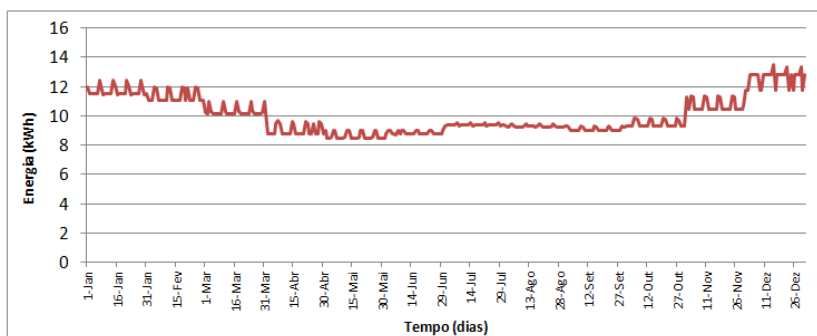


Figura 6-2: Perfil anual do consumo de energia.

Segundo este perfil, Dezembro é o mês que regista o maior consumo de energia, nomeadamente aos Sábados, em que o consumo típico de energia é de 13,3 kWh.

De acordo com a configuração de sistema autónomo, a produção mínima diária do sistema fotovoltaico (PV) deverá ser superior a 14,8 kWh, admitindo um rendimento médio do sistema (conversão e armazenamento de energia) de 90%.

Para satisfazer o consumo de energia do sistema doméstico considerado, adotou-se um gerador PV composto por um *array* fotovoltaico de 5 kW_p⁸ de silício cristalino instalado num sistema de eixo vertical com uma inclinação⁹ de 54°, localizado na zona de Viseu, e cujas perdas combinadas (efeito da temperatura, refletância) são da ordem dos 12,9%. O perfil de produção média anual, de acordo com o simulador PVGIS¹⁰ [41], representa-se no gráfico da Figura 6-3. A produção média diária no mês de Dezembro é de 15,6 kWh e a produção anual de energia é de cerca de 10600 kWh.

⁶ Segundo dados do INE, em 2010, o consumo médio anual de eletricidade, por habitação, foi de 3672 kWh.

⁷ ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos.

⁸ Watt de pico.

⁹ Tendo em vista a otimização da produção no mês de Dezembro.

¹⁰ PVGIS é um simulador *online* destinado ao cálculo e simulação de sistemas fotovoltaicos.

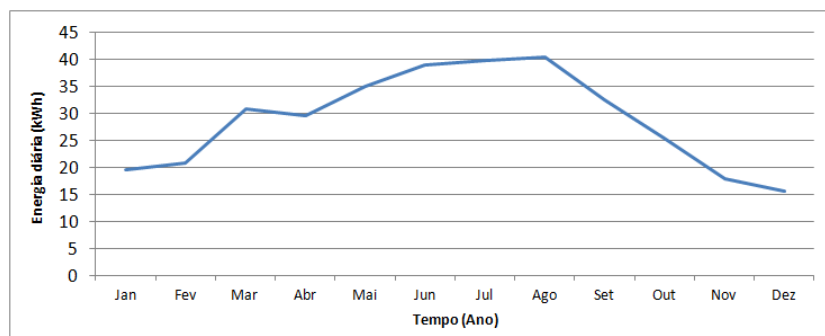


Figura 6-3: Perfil anual de produção PV simulado no PVGIS.

Os gráficos da Figura 6-4 e da Figura 6-5 representam, respetivamente, os perfis de consumo e produção para um dia típico de Dezembro e de Agosto. Do ponto de vista de um sistema autónomo, Dezembro é o mês mais desfavorável e Agosto é o mês mais favorável (produção face ao consumo).

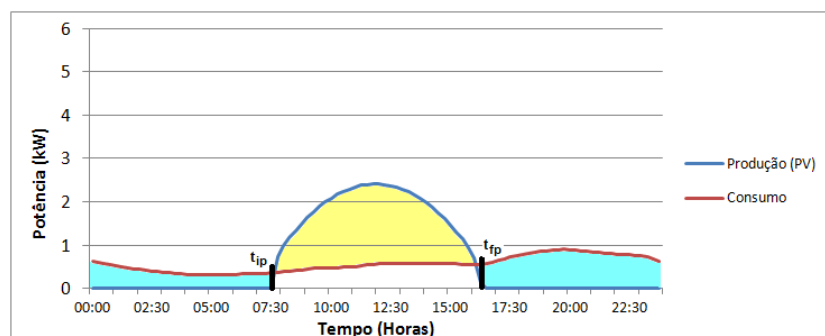


Figura 6-4: Perfil de consumo e produção de energia num dia típico do mês de Dezembro.

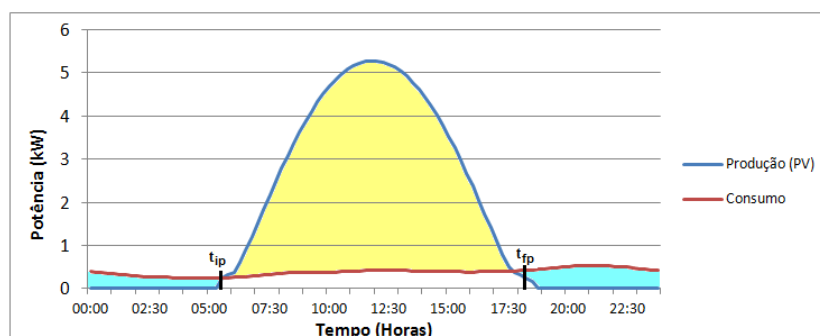


Figura 6-5: Perfil de consumo e produção de energia num dia típico do mês de Agosto.

A energia é produzida no intervalo compreendido entre o tempo de início (t_{ip}) e de fim (t_{fp}) de produção. As áreas sombreadas a azul e amarelo representam, respetivamente, a energia consumida fora das horas de produção e a energia armazenável (diferença entre a energia produzida e a energia consumida, no intervalo de tempo compreendido entre “ t_{ip} ” e “ t_{fp} ”).

A energia armazenável “ $E_{Armaz.}$ ”, calculada de acordo com a equação (6-1), é superior à energia consumida fora das horas de produção “ $E_{Cons.}$ ”. Durante o mês mais desfavorável do ano, a energia armazenável é de cerca de 11,2 kWh (10 kWh, considerando que o rendimento de carga¹¹ “ η_c ” é de 90%) e a energia consumida fora das horas de produção é de 9 kWh.

$$E_{Armaz.} \geq E_{Cons.} \Leftrightarrow \int_{t_{ip}}^{t_{fp}} (P_{Prod.} - P_{Cons.})dt \geq \int_{t_{fp}}^{t_{ip}} P_{Cons.}dt \quad (6-1)$$

Assume-se que o excedente de energia, nomeadamente nos meses de maior produção, será dissipado em resistências (aquecimento de águas sanitárias, piscina, etc.) ou eventualmente fornecido à rede.

Do ponto de vista do dimensionamento do sistema de armazenamento, uma vez que parte da energia produzida é consumida diretamente, a capacidade mínima do sistema de armazenamento “ E ” corresponde à energia consumida fora das horas de produção e estima-se de acordo com a equação (6-2).

$$E = \int_0^{t_{ip}} P_{Cons.}dt + \int_{t_{fp}}^{24} P_{Cons.}dt \quad (6-2)$$

Considerando que o rendimento médio de descarga¹² “ η_d ” é de 90% e que a energia consumida fora das horas de produção é de 9 kWh, a capacidade mínima do sistema de armazenamento “ E ” é de 10 kWh.

Contudo, é desejável que a capacidade de armazenamento seja sobredimensionada em virtude da perda da capacidade associada ao efeito do envelhecimento das baterias de LiFePO₄. Note-se que o sobredimensionamento do sistema permite ainda o aumento da vida útil das baterias, uma vez que daí advêm profundidades de descarga mais reduzidas.

Desta forma, projetou-se um sistema de armazenamento com capacidade para armazenar 12 kWh (sobredimensionamento de 20%). O sistema, ilustrado na Figura 6-6, é constituído por 48 baterias LiFePO₄ (12 ramos em paralelo com 4 baterias em série), cujas características figuram no subcapítulo 5.2. A tensão estipulada do banco é, portanto, de 48 V, sendo que pode variar entre os 40 V e os 58 V, respetivamente, quando as baterias se encontram totalmente descarregadas ou carregadas.

¹¹ O rendimento médio de carga “ η_c ” inclui o rendimento dos conversores de potência e o rendimento de carga da bateria, conforme representado na Figura 6-1.

¹² O rendimento médio de descarga “ η_d ” inclui o rendimento de descarga da bateria e dos conversores de potência (DC-DC e inversor) – veja-se a Figura 6-1.

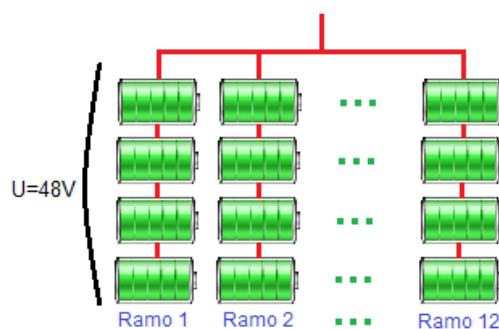


Figura 6-6: Esquema unifilar do banco de baterias (48 V).

A corrente máxima (de carga e descarga) admitida pelo banco de baterias, é de 120 A (limite de 10 A por ramo).

A potência máxima que o banco de baterias pode fornecer/absorver é de 5,76 kW (considerando uma tensão estipulada de 12 V por bateria e logo, 48 V para o banco de baterias), tal como evidenciado na equação (6-3).

$$P = U \cdot I = 48 \cdot 120 = 5,76 \text{ kW} \quad (6-3)$$

6.2 Perfil adotado para realização dos ensaios

A validação do algoritmo de estimativa do SoC e do SoH descrito no subcapítulo 4.6 foi baseada no perfil típico da corrente de carga/descarga de um dia típico de Dezembro ilustrado no gráfico da Figura 6-7, no qual a curva a verde representa a corrente fornecida (valores positivos) ou consumida (valores negativos) por uma fila/bateria.

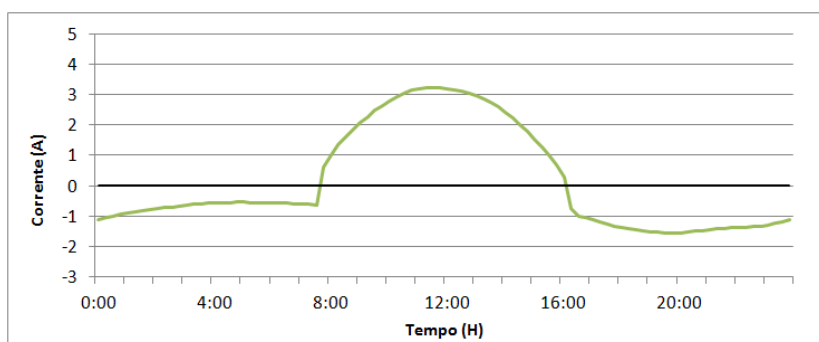


Figura 6-7: Perfil típico da corrente aplicada a uma bateria.

Com o objetivo de possibilitar ensaios que permitissem um período temporal suficiente para avaliar o desempenho do algoritmo de estimativa do estado de carga, foi considerado o perfil de teste ilustrado na Figura 6-8. Relativamente ao perfil típico ilustrado na Figura 6-7, o perfil de teste adaptado é realizado num período de tempo mais curto (1/4 do tempo). Consequentemente, de forma a manter a razão de carga e de descarga da bateria, a corrente de carga/descarga do perfil de teste foi aumentada 4 vezes relativamente à corrente determinada no perfil de carga/descarga típico.

Devido à especificação da plataforma de ensaios (cuja corrente de carga e de descarga se pode parametrizar entre 1 e 10 A, com discretização de 1 A) foi realizada a discretização do perfil de carga/descarga, conforme se esquematiza no gráfico da Figura 6-8. As áreas a sombreado correspondem ao valor da corrente de carga (valores positivos) e descarga (valores negativos) programada para a realização dos ensaios.

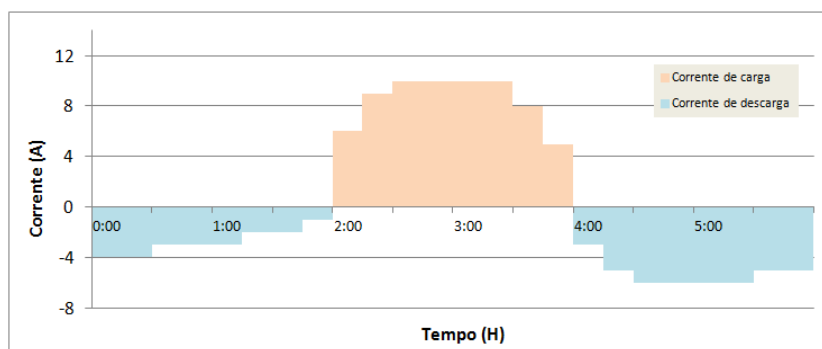


Figura 6-8: Perfil de teste da corrente aplicada a uma bateria.

Assume-se que, para efeitos dos ensaios ao algoritmo de estimativa do SoC e do SoH, o perfil de teste adotado (dia típico de Dezembro) é representativo de um dia típico aplicável a todos os dias do ano.

A contagem do estado de carga foi realizada sobre uma única bateria de LiFePO_4 , representativa do sistema de armazenamento adotado (na ordem de 1/48 da capacidade estipulada). Assume-se que as restantes baterias que constituem o banco de baterias partilham do mesmo estado de carga da bateria em teste, uma vez que são sujeitas às mesmas condições de carga/descarga e ao processo de equalização realizado pelo sistema de gestão de baterias.

6.3 Descrição dos ensaios realizados

Conforme foi descrito no subcapítulo 4.6, o algoritmo desenvolvido para estimar o estado de carga (SoC) e de saúde (SoH) de uma bateria LiFePO_4 , pretende ser genérico e dinâmico. Com o intuito de aferir o desempenho deste algoritmo, foi realizado o conjunto de ensaios descritos no Quadro 6-1.

Quadro 6-1: Resumo dos ensaios realizados ao algoritmo de estimativa do SoC e SoH¹³.

Ensaio	Descrição do ensaio	Resultados a observar
1	Ensaio 30 dias de funcionamento típico do sistema de armazenamento de energia, em regime autónomo;	Evolução do SoC e do SoH (e respetivas saídas em tensão) e do fator de correção da carga (FCC); Convergência do FCC em torno de um valor médio; Comparação do SoC estimado com a carga medida após o ensaio;
2	Ensaio 11 dias, entre os quais existe um período em que a bateria não carrega totalmente (entre o 3º e o 6º dia);	Testar a capacidade de reajuste do algoritmo após o período de funcionamento atípico (sem possibilidade de autoajuste); Convergência do FCC em torno de um valor médio, após o período de funcionamento atípico;
3	Semelhante ao ensaio 2, no qual o ensaio é parado após o 6º dia;	Erro existente após 3 dias em que não ocorre autoajuste do algoritmo;
4	Ensaio o algoritmo durante 15 dias com um perfil de carga/descarga atípico (maior variação da corrente). O algoritmo realiza autoajuste apenas nos primeiros 5 dias do ensaio;	Convergência do FCC nos primeiros 5 dias; Erro existente após 15 dias de funcionamento dinâmico (dos quais, nos últimos 10 dias, não ocorre autoajuste do algoritmo).

Naturalmente que um dos principais objetivos dos ensaios é a comparação entre a carga medida e a carga estimada pelo algoritmo. Como tal, após a realização de cada um dos ensaios, a bateria foi totalmente descarregada e a carga fornecida foi contada e registada. A comparação entre a carga medida e a carga estimada será exposta no Quadro 6-2.

O ensaio 1 pretende mostrar a evolução do SoC e do SoH da bateria (estimado pelo algoritmo), dos sinais em tensão (cujo valor é proporcional ao SoC estimado) e do fator de correção da carga (FCC) ao longo de 30 dias de funcionamento típico do sistema adotado. Desta forma, programou-se o algoritmo para repetir 30 vezes o perfil de carga/descarga ilustrado na Figura 6-8. Os resultados deste ensaio ilustram-se no gráfico da Figura 6-9.

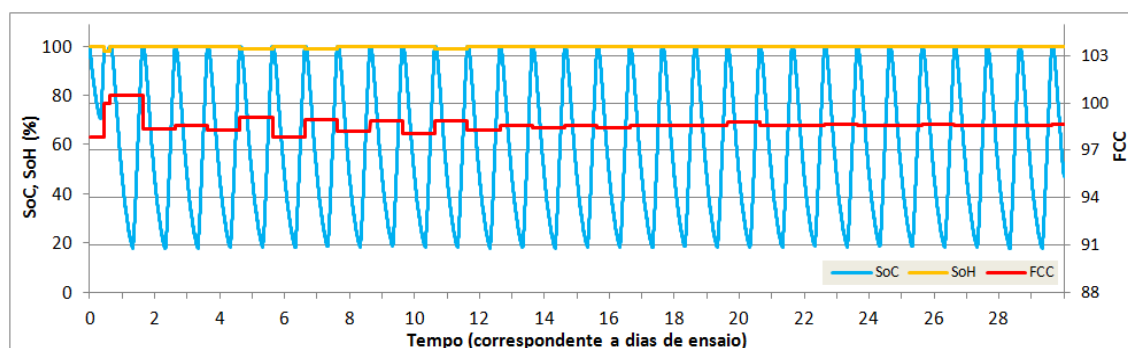


Figura 6-9: Evolução do SoC, SoH e FCC em função do tempo – ensaio 1.

¹³ A perda de capacidade da bateria será simulada no subcapítulo 6.4.

O SoC é apresentado em percentagem da carga estipulada da bateria e varia diariamente entre cerca de 20 e 100%. A carga mínima da ordem dos 20% deve-se ao sobredimensionamento do sistema de armazenamento a que anteriormente se aludiu.

O FCC inicia em 97,8% (valor parametrizável ao qual foi atribuído o rendimento típico esperado para a bateria) e é atualizado diariamente no momento em que a carga máxima da bateria é atingida, verificando-se portanto, o autoajuste do algoritmo. Nos primeiros dias de teste, o FCC oscila alternadamente em torno do valor parametrizado e tende a convergir em torno de um valor médio final de cerca de 98,5%.

O SoH mantém-se praticamente constante (variação de 2% no 1º dia e 1% no 5º, 7º e 11º dia) e igual a 100% ao longo de todo o ensaio (uma vez que a bateria é nova, o SoH é igual a 100%).

A evolução dos sinais (em tensão) de saída do controlador, cujos valores são proporcionais ao SoC e ao SoH são representados no gráfico da Figura 6-10. O sinal correspondente ao SoC varia entre cerca de 1,8 V (20% do SoC) e 5 V (100% do SoC) e o sinal correspondente ao SoH é praticamente constante e igual a 5 V (SoH igual a 100%).

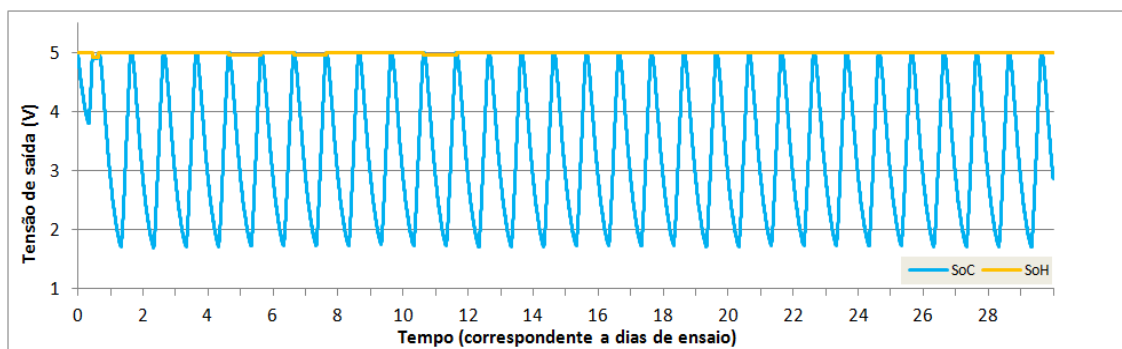


Figura 6-10: Evolução da tensão de saída em função do tempo – ensaio 1.

O ensaio 2, cuja duração foi de 11 dias, consistiu num período inicial de 3 dias de funcionamento típico seguido de 3 dias em que o consumo foi aumentado para que a bateria não carregasse totalmente nesse período. Após o 6º dia de ensaio, o perfil típico foi repostado, permitindo-se que a bateria fosse carregada totalmente no final de cada dia. O ensaio 3 partilhou o mesmo perfil de carga/descarga do ensaio 2, contudo, foi parado após o 6º dia.

A evolução do SoC, bem como do FCC e do SoH são ilustrados nos gráficos da Figura 6-11 e da Figura 6-12, respetivamente para o ensaio 2 e 3.

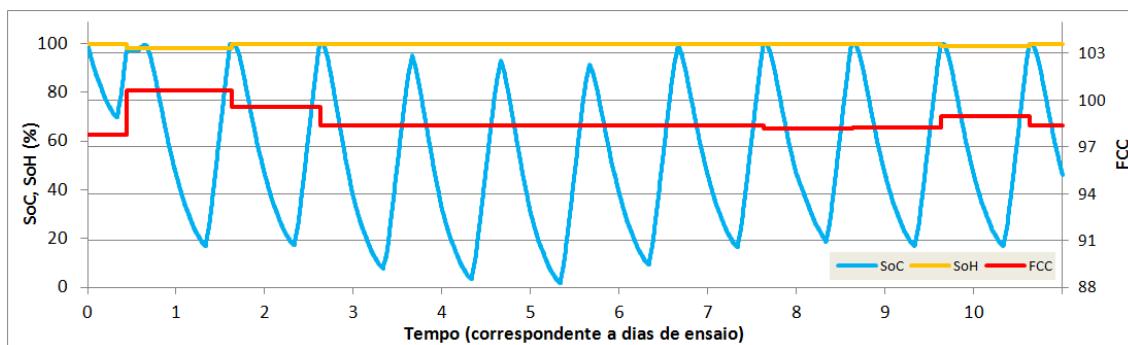


Figura 6-11: Evolução do SoC, SoH e FCC em função do tempo – ensaio 2.

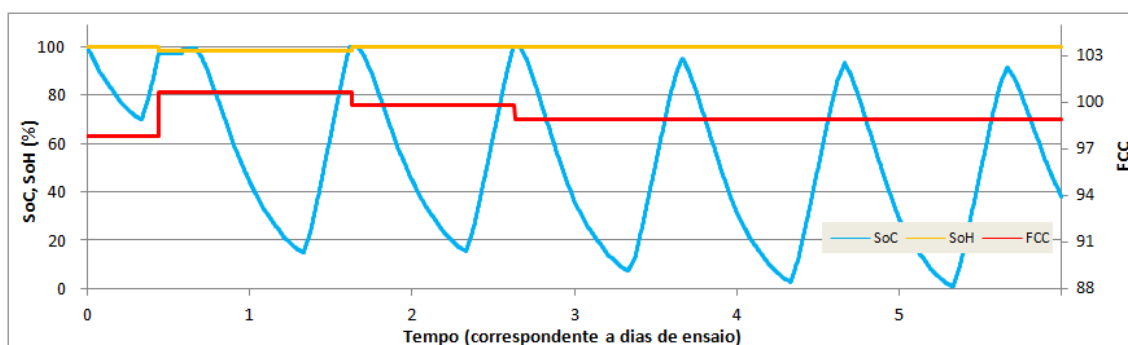


Figura 6-12: Evolução do SoC, SoH e FCC em função do tempo – ensaio 3.

O FCC, que evoluiu de forma semelhante nos 2 ensaios, foi atualizado nos 3 primeiros dias do ensaio, mantendo-se constante entre o 3º e o 6º dia em virtude da bateria não carregar totalmente nesse período. A partir do 6º dia (ensaio 2) verifica-se a atualização do FCC e a convergência do mesmo para um valor médio de cerca de 98,4%. O SoH teve uma pequena oscilação inicial (2%), contudo, convergiu para 100% a partir do 2º dia de ensaio.

Os sinais de saída do controlador (em tensão) são ilustrados nos gráficos da Figura 6-13 (ensaio 2) e da Figura 6-14 (ensaio 3).

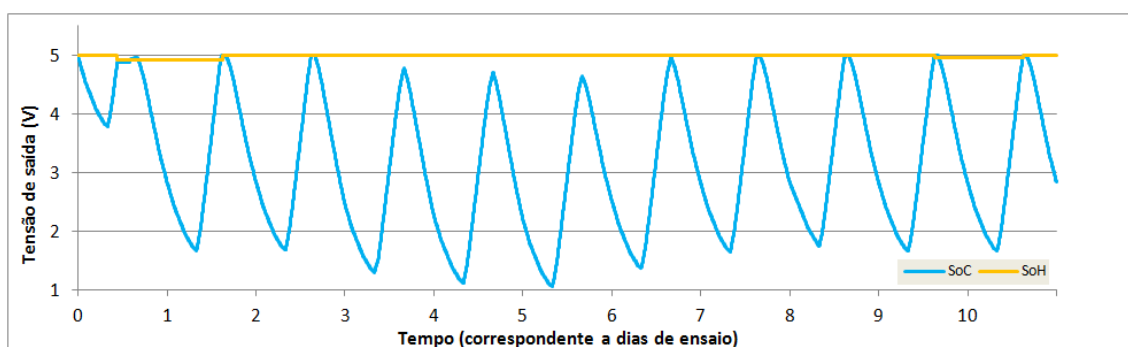


Figura 6-13: Evolução da tensão de saída em função do tempo – ensaio 2.

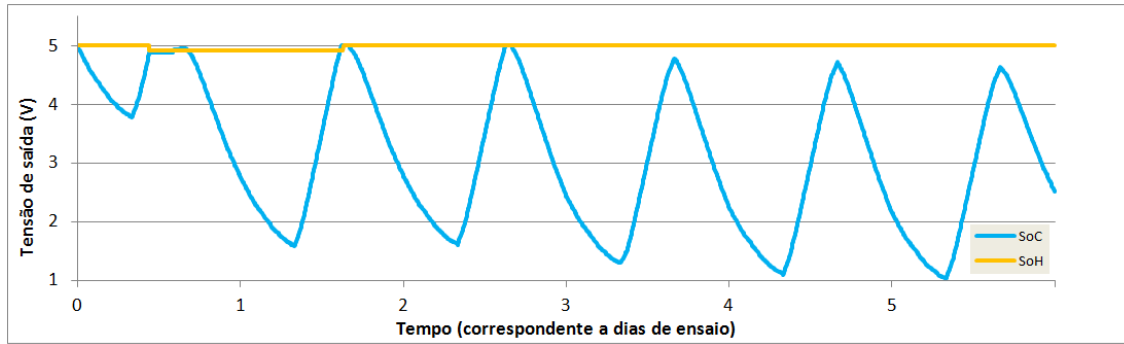


Figura 6-14: Evolução da tensão de saída em função do tempo – ensaio 3.

Com o intuito de testar o desempenho do algoritmo quando sujeito a um perfil de carga/descarga mais irregular e dinâmico, foi considerado para realização do ensaio 4, o perfil de carga/descarga ilustrado no gráfico da Figura 6-15.

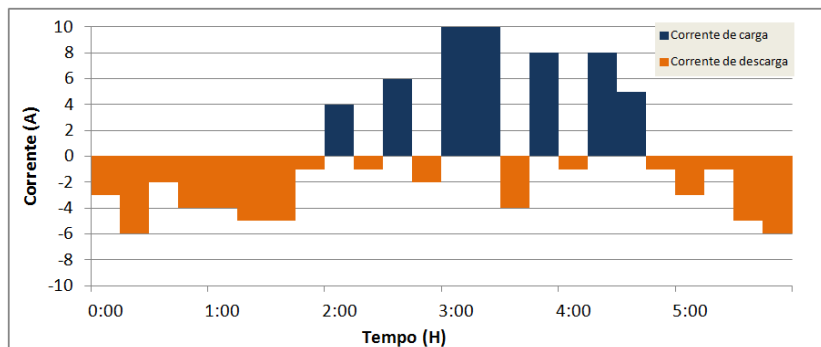


Figura 6-15: Perfil de teste adotado para o ensaio 4.

Este perfil contém uma maior irregularidade no que respeita ao perfil de consumo. Considerando este perfil, os resultados do ensaio 4 representam-se no gráfico da Figura 6-16.

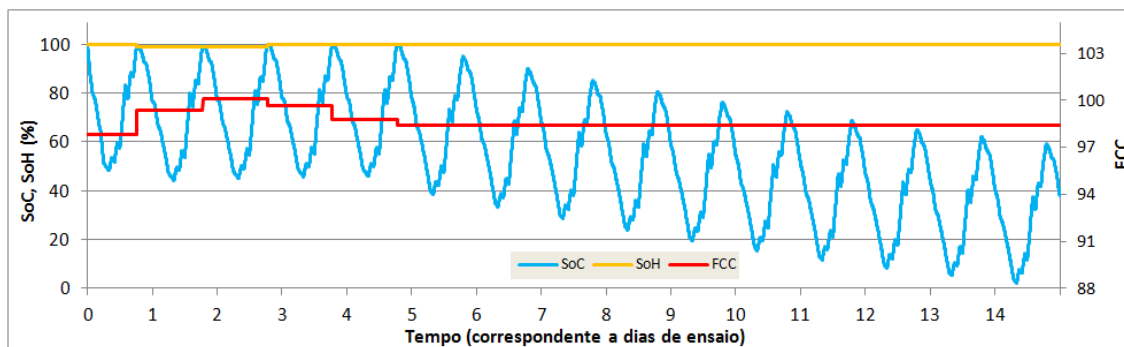


Figura 6-16: Evolução do SoC, SoH e FCC em função do tempo – ensaio 4.

Note-se que a carga média da bateria diminuiu gradualmente, nomeadamente a partir do 5º dia de ensaio, após o qual a bateria não voltou a ser carregada totalmente. Note-se a convergência do FCC até ao 5º dia de ensaio, após o qual não voltou a ser atualizado. O valor final do FCC foi de 98,4%.

Quanto ao SoH, e conforme esperado, este manteve-se constante e igual a 100% ao longo de praticamente todo o ensaio.

As saídas em tensão (SoC e SoH), esquematizam-se no gráfico da Figura 6-17.

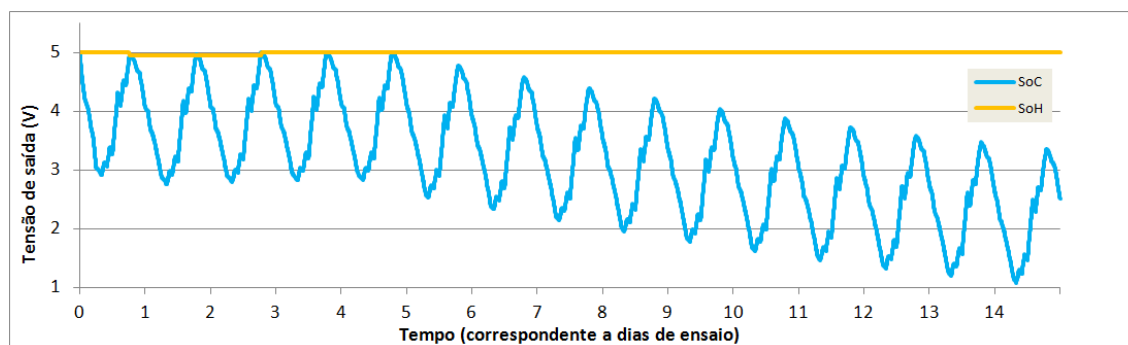


Figura 6-17: Evolução da tensão de saída em função do tempo – ensaio 4.

6.4 Simulação do envelhecimento da bateria

Conforme se aludiu no subcapítulo 3.2.7, uma bateria de LiFePO_4 suporta algumas centenas de ciclos sem perda significativa da capacidade de armazenamento. Com efeito, para testar o algoritmo quanto à estimativa do estado de saúde (SoH), teria que se realizar um conjunto de ensaios¹⁴ que permitisse avaliar tal parâmetro. Face à dificuldade em realizar tal conjunto de ensaios, a perda de capacidade da bateria foi simulada através do método que a seguir se descreve:

- A simulação (ensaio 5) foi realizada de acordo com o perfil típico de carga/descarga descrito no subcapítulo 6.2;
- A duração do ensaio foi de 20 dias, durante os quais se simulou uma perda de capacidade de 20% em dez dias (do 4º ao 14º dia, simulou-se uma perda de capacidade diária de 2%);
- Para efeitos da simulação de perda da capacidade da bateria, a cada ciclo do programa, a carga absorvida ou fornecida pela bateria foi multiplicada por um fator correspondente à perda de capacidade que se pretendeu simular, ou seja, 100% nos primeiros 4 dias, 98% no 5º dia, etc.

Os resultados do ensaio que foi realizado (ensaio 5) com o intuito de simular a perda de capacidade (envelhecimento) da bateria encontram-se ilustrados no gráfico da Figura 6-18.

¹⁴ Estima-se que seriam necessários mais de 2000 ciclos de carga/descarga para que a bateria apresentasse uma perda de capacidade de apenas 20%.

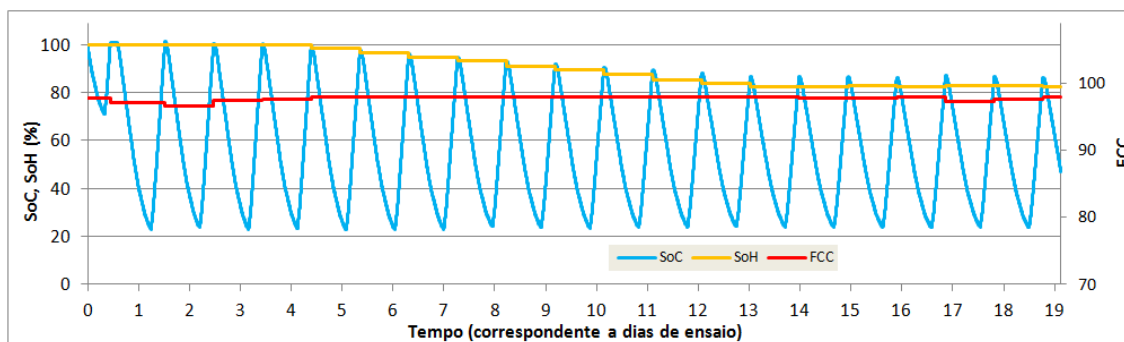


Figura 6-18: Evolução do SoC, SoH e FCC em função do tempo – ensaio 5.

As saídas em tensão respectivas esquematizam-se no gráfico da Figura 6-19.

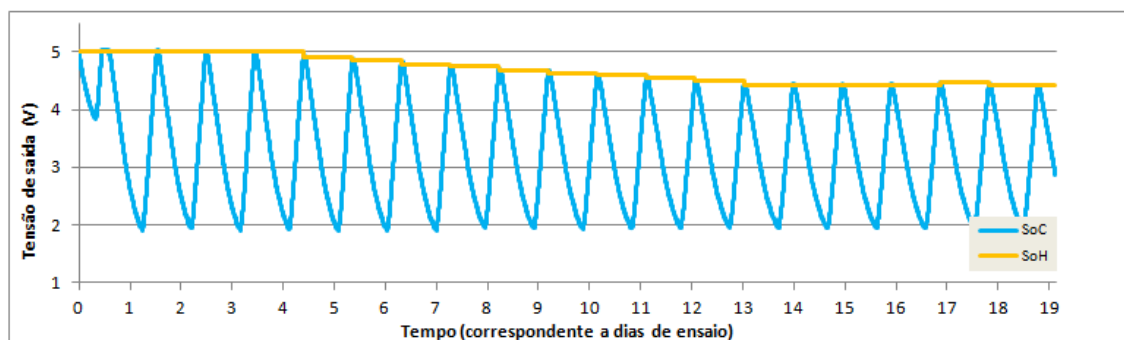


Figura 6-19: Evolução da tensão de saída em função do tempo – ensaio 5.

De acordo com os gráficos da Figura 6-18 e da Figura 6-19 verifica-se que, a partir do 4º dia do ensaio, o SoH diminui gradualmente à razão de cerca de 2% por dia, permanecendo praticamente constante e igual a cerca de 82% a partir do 14º dia de ensaio. Note-se que esta diminuição se deve à perda de capacidade que foi simulada.

O ensaio 5 permite ainda verificar que o máximo valor que o SoC pode assumir ao longo do tempo (dias para efeito de simulação mas que tenderá a ser anos quando em aplicação real) diminui na mesma razão do SoH. Efetivamente, quando a bateria atinge a carga máxima admissível (valor que diminui ao longo do tempo) o valor do SoC é coincidente com o valor do SoH (estimado apenas nestes momentos, ou seja quando a bateria atinge a carga admissível máxima, determinada por máximo de tensão). Conforme se evidenciou no subcapítulo 4.6, o SoC representa a percentagem da carga estipulada que a bateria efetivamente pode fornecer relativamente à carga estipulada. Por sua vez, o SoH representa a relação percentual entre a carga máxima que a bateria efetivamente aceita num dado momento da sua vida útil e a respetiva carga estipulada.

6.5 Discussão de resultados

Os ensaios descritos nos subcapítulos 6.3 e 6.4 foram realizados com o intuito de aferir o algoritmo de estimativa do SoC e do SoH, nomeadamente quanto à capacidade de autoajuste e ao erro máximo do SoC e do SoH estimado.

Para cada um dos ensaios, uma vez que o algoritmo não possui capacidade de estimar a carga inicial de uma bateria, procedeu-se à carga total e à respetiva parametrização da carga inicial (72000000 mAs). Note-se que se poderia ter atribuído um qualquer valor arbitrário de carga inicial, uma vez que o algoritmo iria convergir para o valor efetivo de carga. Contudo, isso pode implicar que o algoritmo consuma um tempo significativo até convergir para o valor de FCC real, pelo que é desejável que a carga inicial seja adequadamente parametrizada.

Após a realização de cada um dos ensaios (vejam-se os subcapítulos 6.3 e 6.4) foi efetuada uma descarga completa à bateria. A carga retirada foi contada e registada, permitindo-se a comparação da mesma com a carga estimada pelo algoritmo, conforme se mostra no Quadro 6-2.

Quadro 6-2: Comparação entre a carga medida e a carga estimada.

Ensaio	Carga medida (Ah)	Carga estimada (Ah)	Diferença (Ah)	Diferença (%)
1	9,07	8,87	0,20	1,0
2	8,85	8,72	0,13	0,6
3	6,90	7,19	0,29	1,5
4	7,00	7,15	0,15	0,8
5	9,23	9,01	0,22	1,1

De acordo com os resultados que se ilustram no Quadro 6-2, a diferença máxima entre a carga que a bateria pode fornecer (carga medida) e a carga estimada pelo algoritmo é de 1,5%, correspondendo a 0,29 Ah (ensaio 3) e a diferença média é de 1%. De notar que o erro da estimativa do SoC não é afetado em função do SoH da bateria, ou seja, para diferentes SoH a margem de erro do SoC é a mesma (no ensaio 5, cujo SoH final é 80%, o erro associado à estimativa do SoC é de 1,1%).

Ao longo dos 4 primeiros ensaios, o SoH manteve-se praticamente constante e igual a 100% em virtude da bateria ser nova (foi sujeita a apenas algumas dezenas de ciclos de carga/descarga).

Quanto à simulação da perda da capacidade da bateria (envelhecimento) realizada no 5º ensaio, verifica-se que SoH estimado acompanhou gradualmente a perda de capacidade que se simulou. O Quadro 6-3 apresenta, para cada dia ensaiado, a diferença entre o SoH estimado e o SoH teórico (simulado).

Quadro 6-3: Comparação entre o SoH teórico e o SoH estimado.

Dia (Ensaio 5)	SoH teórico (%)	SoH estimado (%)	Diferença (%)
1	100,0	100,0	0,0
2	100,0	100,0	0,0
3	100,0	100,0	0,0
4	100,0	100,0	0,0
5	98,0	98,2	0,2
6	96,0	96,3	0,3
7	94,0	94,5	0,5
8	92,0	93,1	1,1
9	90,0	90,8	0,8
10	88,0	89,2	1,2
11	86,0	87,3	1,3
12	84,0	85,2	1,2
13	82,0	83,6	1,6
14	80,0	82,4	2,4
15	80,0	82,5	2,5
16	80,0	82,6	2,6
17	80,0	82,3	2,3
18	80,0	83,0	3,0
19	80,0	82,7	2,7
20	80,0	82,2	2,2

De acordo com os resultados descritos no Quadro 6-3, a diferença máxima entre o SoH estimado e o SoH teórico é de 3% (ensaio 5). Note-se, contudo, que a diferença entre o SoC estimado e a carga que a bateria pode fornecer é de apenas 1,1% (veja-se o Quadro 6-2). Significa isto que o algoritmo mantém a capacidade de autoajuste (FCC) quando a capacidade da bateria é inferior à capacidade estipulada. Importa referir que a diferença entre o SoH estimado e o SoH real tende a aumentar com o envelhecimento da bateria (quanto maior a perda de capacidade de armazenamento, maior a diferença entre o SoH estimado e o SoH real), embora permaneça em valores aceitáveis para a maioria das aplicações. Note-se que a estimativa do SoH foi avaliada para uma perda de capacidade máxima de 20% (o SoH variou entre 100% e 80%). Atendendo a que o erro de estimativa do SoH é cumulativo e tende a aumentar em função da perda de capacidade da bateria, estima-se que o erro aumente para valores de SoH mais baixos.

7. Conclusões

Os impactos ambientais causados pela produção em massa da eletricidade a partir de combustíveis fósseis e os problemas originados pelo congestionamento das redes de transporte e distribuição nas horas de maior procura de energia têm vindo a alterar significativamente a forma de operação das redes e dos próprios mercados de energia (conforme se evidenciou no capítulo 1). Espera-se que o desenvolvimento tecnológico em curso venha a contribuir para uma mais significativa resposta dos consumidores aos preços da eletricidade bem como para o desenvolvimento e reforço das tecnologias de microprodução, microrredes e redes inteligentes. Estes conceitos e tecnologias tenderão a reforçar a tendência de mudança nas formas de operação técnico-económica dos sistemas eléctricos, tornando estes sistemas em entidades mais ativas, responsivas, seguras e eficientes.

O armazenamento de energia em pequena e média escala tem vindo a ser referido como um dos pilares para o sucesso da implementação das tecnologias e conceitos referidos. Com efeito o armazenamento de energia permitirá flexibilizar os consumos de eletricidade (em termos de momento e quantidade) bem como criar condições de resposta em tempo real às variações do preço da energia (que futuramente se estima refletir, em tempo real, na fatura). Ademais, o armazenamento poderá suportar a implementação de mecanismos para apoio à operação das redes eléctricas, nomeadamente através do fornecimento de serviços de rede.

Naturalmente, a utilização de um sistema de armazenamento de energia implica que este apresente características que determinem um desempenho adequado ao fim a que se destina. As baterias LiFePO_4 são, no contexto de sistemas de armazenamento de pequena/média escala, uma das mais promissoras tecnologias de armazenamento da atualidade. Para tal contribui o facto de estas baterias serem fiáveis, possuírem uma reduzida taxa de autodescarga, apresentarem-se como uma das tecnologias mais seguras, possuírem o

rendimento mais elevado da sua classe, serem a tecnologia mais durável (quantidade de ciclos) e apresentarem excelentes características de carga e de descarga (*C-rate* elevado).

Nesta dissertação procurou-se contribuir para um melhor conhecimento do comportamento das baterias LiFePO₄. Para o efeito foi desenvolvida uma plataforma que serviu de base à avaliação do comportamento de duas baterias de diferentes fabricantes, nomeadamente no que se refere ao comportamento da tensão em vazio e durante os processos de carga e descarga das baterias. Estudou-se ainda o rendimento das baterias, entendido como o quociente entre a carga fornecida pela bateria e a carga que esta previamente havia absorvido. O efeito produzido pela amplitude das correntes de carga e descarga sobre a carga absorvida ou fornecida pelas baterias foi também avaliado.

Os testes efetuados, com correntes de carga e descarga entre 1 e 10 A (0,05C a 0,5C), revelaram que:

- i. O rendimento médio global da bateria (média aritmética dos resultados dos ensaios realizados no subcapítulo 5.3) é de 97,8%;
- ii. O rendimento da bateria não varia significativamente (variação inferior a 1%) em função da corrente de carga/descarga, nomeadamente quando existem variações bruscas da corrente (em regime dinâmico);
- iii. As curvas de tensão em carga são praticamente constantes, nomeadamente na gama compreendida entre os 10% e os 90% do SoC e os valores obtidos dependem da corrente de carga ou de descarga aplicada;
- iv. A carga que a bateria pode absorver ou fornecer não varia significativamente em função da corrente de carga ou de descarga (variação de cerca de 3% na carga e inferior a 1% na descarga).

A plataforma desenvolvida para o teste de baterias serviu, posteriormente, para suportar o desenvolvimento de um sistema capaz de estimar o estado de carga (SoC) e o estado de saúde (SoH) de uma bateria LiFePO₄ (ou, com as adaptações necessárias, de um banco de baterias). Este sistema foi desenvolvido tendo em consideração três requisitos principais, a saber:

- i. Ter baixo custo de implementação, o que se conseguiu utilizando uma plataforma em que o “cérebro” é um controlador Arduino;
- ii. Apresentar dimensões reduzidas;
- iii. Ser facilmente integrável num sistema de gestão de energia doméstico (*power box*), o que se conseguiu utilizando saídas analógicas do controlador Arduino para o fornecimento de informação em tempo real sobre o SoC e o SoH.

O algoritmo implementado para avaliação do SoC e do SoH baseia-se na utilização do método da contagem de *Coulomb*. A opção por esta metodologia em detrimento de outras existentes justifica-se pelo facto de se tratar de uma técnica que dispensa modelizações complexas das baterias bem como longos históricos de dados, resultando numa relativamente baixa complexidade computacional. Adicionalmente, a contagem de *Coulomb* permite a estimação do SoC e do SoH em tempo real (*on-line*), sem necessidade de parar o sistema ou de o forçar a cargas e/ou descargas completas. O principal inconveniente desta técnica, relacionado com a necessidade da calibração periódica do contador devido aos erros de medição/contagem que se podem acumular, foi atenuado com a integração de código que permite o autoajuste dinâmico do algoritmo (que não implica a reinicialização do sistema).

A técnica desenvolvida para permitir o autoajuste dinâmico do algoritmo consiste na utilização de um fator de correção da carga “FCC” que é calculado e atualizado em cada ciclo (sempre que a bateria se encontra totalmente carregada) em função do erro estimado no ciclo anterior. Note-se que o algoritmo considera a bateria totalmente carregada, quando a tensão aos seus terminais atinge o valor máximo admissível. Esta funcionalidade apresenta as seguintes vantagens face aos sistemas tradicionais de estimação de carga com base na contagem de *Coulomb*:

- i. A calibração do sistema realiza-se sempre que a bateria é totalmente carregada;
- ii. Não existe perda de energia e de tempo no processo de calibração;
- iii. O sistema não é reiniciado no momento da calibração;
- iv. O erro da estimativa do SoC tende a diminuir em função do tempo (ao contrário da acumulação do erro que é típica dos sistemas convencionais);
- v. O sistema responde dinamicamente às alterações do comportamento da bateria (nomeadamente pela alteração dos perfis de carga/descarga, envelhecimento, etc);
- vi. O sistema reage à variação dos erros de medição da corrente.

O algoritmo de estimação do SoC e do SoH foi testado através da realização de um conjunto alargado de ensaios (5 ensaios) caracterizados por diversos perfis de carga e descarga da bateria. A gama de correntes utilizada nos processos de carga e descarga foi de 1 a 10 A, correspondendo respetivamente a 0,05C e 0,5C. Alguns ensaios contemplaram a impossibilidade do algoritmo realizar a função de autoajuste, uma vez que, intencionalmente, se definiram situações em que a bateria se encontrava vários dias sem atingir a carga máxima (e o correspondente valor de tensão).

Os resultados obtidos nos ensaios mostram que o algoritmo desenvolvido permitiu estimar o estado de carga de uma bateria LiFePO₄ com um erro máximo de 1,5% (erro médio de todos os ensaios de 1%).

A estimativa do SoH pelo algoritmo desenvolvido, conseguida através da comparação entre a capacidade máxima real da bateria (carga máxima acumulada na bateria (Ah) quando se atinge a tensão correspondente à máxima tensão admissível) e a capacidade estipulada da bateria, foi também avaliada. Os ensaios revelaram erros inferiores a 3% para a estimativa deste parâmetro que, apesar de ligeiramente superiores aos verificados na estimativa do SoC, são aceitáveis para a aplicação a que o sistema se destina.

Importa referir que o erro da estimativa do SoC e do SoH tende a aumentar para regimes de carga/descarga mais severos, sendo contudo espectável que o autoajuste do algoritmo atue na mitigação do erro. Por outro lado, as limitações às correntes de carga e descarga impostas pelos sistemas de gestão das baterias atenuam a dimensão destes erros.

7.1 Proposta para melhorias e trabalho futuro

O objetivo principal deste trabalho foi o de desenvolver e testar um sistema (*hardware e software* - algoritmo de controlo e de aquisição e processamento de informação) capaz de estimar o SoC e o SoH de uma bateria LiFePO₄ (adaptável a um banco de baterias). Os ensaios realizados ao sistema revelaram que este tem potencialidades para funcionar numa situação real e, eventualmente, evoluir para um produto que possa ser comercializado.

Naturalmente, apesar do trabalho feito, algumas melhorias podem ser introduzidas, permitindo melhorar o produto final, nomeadamente:

- Estudar (e eventualmente corrigir) os efeitos da temperatura, nomeadamente através da integração de sensores e realização de ensaios a diferentes temperaturas de funcionamento;
- Estudar os efeitos de regimes de carga e descarga mais severos (*C-rate* mais elevados);
- Integrar um *display* para apresentação dos valores estimados, alarmes, etc;
- Realizar ensaios reais de estimativa do SoH (ensaios destrutivos);
- Integrar um método automatizado para determinar a carga inicial da bateria (no arranque do sistema);
- Testar o sistema quando aplicado a um banco de baterias;
- Integrar um sistema de autocalibração do SoH com o intuito de reduzir a margem de erro;
- Desenvolver a comunicação física entre o controlador e um dispositivo automatizado de gestão de energia externo (*power box*);
- Testar o algoritmo para outras finalidades (perfil de carga de um veículo elétrico, aplicações industriais, etc).

- Não obstante das conclusões tiradas acerca da viabilidade técnica das baterias LiFePO_4 (no contexto do armazenamento em pequena escala) e de se crer que, apesar de ainda possuírem um custo de aquisição relativamente elevado, estas baterias são uma alternativa economicamente atrativa, um dos possíveis trabalhos futuros será o estudo da viabilidade económica desta tecnologia.

REFERÊNCIAS

- [1] AMERICAN PHYSICAL SOCIETY, “This Month in Physics History: March 20, 1800: Volta describes the electric battery,” *AMERICAN PHYSICAL SOCIETY*, 2012. [Online]. Available: <http://www.aps.org/publications/apsnews/200603/history.cfm>. [Accessed: 12-Sep-2012].
- [2] “Electricity Storage Association,” *ESA*, 2011. [Online]. Available: <http://www.electricitystorage.org>. [Accessed: 12-Mar-2012].
- [3] J. Eyer and G. Corey, “Energy Storage for the Electricity Grid : Benefits and Market Potential Assessment Guide - A Study for the DOE Energy Storage Systems Program,” *Sandia National Laboratories*, 2010.
- [4] M. Thiele, “Smart Grid & The Cloud: Why are they linked?,” *Data Center Pulse*, 2011. [Online]. Available: <http://www.infowars.com/smart-grid-the-cloud-why-are-they-linked/>. [Accessed: 18-Jul-2013].
- [5] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, and Y. Ding, “Progress in electrical energy storage system: A critical review,” *Progress in Natural Science*, vol. 19, no. 3, pp. 291–312, Mar. 2009.
- [6] J. I. . S. Martín, I. Zamora, J. J. S. Martín, V. Aperribay, and P. Eguía, “Energy Storage Technologies for Electric Applications,” *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, no. 2, 2011.
- [7] D. Connolly, *A Review of Energy Storage Technologies*, 3rd ed. University of Limerick, 2009.
- [8] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas, and V. Efthimiou, “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 6–7, pp. 1513–1522, Aug. 2009.
- [9] H. Ibrahim, A. Ilinca, and J. Perron, “Energy storage systems—Characteristics and comparisons,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 5, pp. 1221–1250, Jun. 2008.
- [10] G. Coppez, S. Chowdhury, and S. P. Chowdhury, “Review of battery storage optimisation in Distributed Generation,” in *2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India*, 2010, pp. 1–6.
- [11] M. Pedram, N. Chang, Y. Kim, and Y. Wang, “Hybrid electrical energy storage systems,” *Proceedings of the 16th ACM/IEEE international symposium on Low power electronics and design - ISLPED '10*, p. 363, 2010.
- [12] A. Khaligh, “Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of

REFERÊNCIAS

- the Art,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 6, pp. 2806–2814, Jul. 2010.
- [13] S. Vazquez, S. Lukic, E. Galvan, L. Franquelo, and J. Carrasco, “Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 12, pp. 3881–3895, Dec. 2010.
- [14] L. Ran, W. Junfeng, W. Haiying, and L. Gechen, “Prediction of state of charge of Lithium-ion rechargeable battery with electrochemical impedance spectroscopy theory,” in *2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2010, pp. 684–688.
- [15] P. F. Ribeiro, B. K. Johnson, M. L. Crow, A. Arsoy, and Y. Liu, “Energy storage systems for advanced power applications,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no. 12, pp. 1744–1756, 2001.
- [16] A. C. Hua and B. Z. Syue, “Charge and discharge characteristics of lead-acid battery and LiFePO₄ battery,” in *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA -*, 2010, pp. 1478–1483.
- [17] K. C. Divya and J. Østergaard, “Battery energy storage technology for power systems—An overview,” *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 4, pp. 511–520, Apr. 2009.
- [18] L. Lam, “A Practical Circuit based Model for State of Health Estimation of Li ion Battery Cells in Electric Vehicles,” University of Technology Delft, 2011.
- [19] J. Wang, Z. Sun, and X. Wei, “Performance and characteristic research in LiFePO₄ battery for electric vehicle applications,” in *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2009, pp. 1657–1661.
- [20] M. A. Roscher, J. Assfalg, and O. S. Bohlen, “Detection of Utilizable Capacity Deterioration in Battery Systems,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 1, pp. 98–103, Jan. 2011.
- [21] A. Marongiu, A. Damiano, and M. Heuer, “Experimental analysis of lithium iron phosphate battery performances,” in *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2010, pp. 3420–3424.
- [22] “How cells work,” *Axeon*, 2012. [Online]. Available: <http://www.axeon.com/Technology/Cells/How-cells-work.aspx>. [Accessed: 02-Feb-2012].
- [23] “Promising lithium batteries for electric cars,” *CNRS*, 2008. [Online]. Available: <http://www2.cnrs.fr/en/1281.htm>. [Accessed: 02-Feb-2012].
- [24] B. Cooke, “Li-ion Battery and Pack Supplier Valence Technology,” *Green Car Congress*, 2009. [Online]. Available:

- <http://www.greencarcongress.com/2009/03/profile-liion-battery-and-pack-supplier-valence-technology.html>. [Accessed: 05-Feb-2012].
- [25] A. S. Andersson and J. O. Thomas, “The source of first-cycle capacity loss in LiFePO₄,” *Journal of Power Sources*, vol. 97–98, pp. 498–502, Jul. 2001.
- [26] J. Kim and B. H. Cho, “State-of-Charge Estimation and State-of-Health Prediction of a Li-Ion Degraded Battery Based on an EKF Combined With a Per-Unit System,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 9, pp. 4249–4260, Nov. 2011.
- [27] Y. Hsieh, C. Moo, T. Tsai, and K. Ng, “High-frequency discharging characteristics of LiFePO₄ battery,” in *2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2011, pp. 953–957.
- [28] K. Nunotani, F. Yoshida, Y. Kamiya, Y. Daisho, K. Abe, M. Kono, and H. Matsuo, “Development and performance evaluation of lithium iron phosphate battery with superior rapid charging performance — Second report: Evaluation of battery capacity loss characteristics,” in *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2011, pp. 1–4.
- [29] T. Stephan, M. Stieneker, and R. Doncker, “Development of a modular high-power converter system for battery energy storage systems,” *IEEE Power Electronics and Applications*, pp. 1–10, 2011.
- [30] H. Qian, J. Zhang, and J. Lai, “A grid-tie battery energy storage system,” in *2010 IEEE 12th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, 2010, pp. 1–5.
- [31] F. Codeca, S. M. Savaresi, and G. Rizzoni, “On battery State of Charge estimation: A new mixed algorithm,” in *2008 IEEE International Conference on Control Applications*, 2008, pp. 102–107.
- [32] H. Qian, J. Zhang, J. Lai, and W. Yu, “A High-Efficiency Grid-Tie Battery Energy Storage System,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 3, pp. 886–896, Mar. 2011.
- [33] “Arduino Uno.” [Online]. Available: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>. [Accessed: 23-May-2012].
- [34] “LEM DataSheets,” *LEM*, 2012. [Online]. Available: http://www.lem.com/hq/en/component/option,com_catalog/task,displaymodel/id,64.74.25.000.0/. [Accessed: 02-May-2012].
- [35] “International Rectifier DataSheets,” *IR*, 2001. [Online]. Available: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfz44n.pdf>. [Accessed: 27-Apr-2012].
- [36] Ahmad Ayar, “Simple PWM Modulator Allows DC Control Signal To Drive LEDs,” *Electronic Design*, 2008. [Online]. Available:

REFERÊNCIAS

- <http://electronicdesign.com/lighting/simple-pwm-modulator-allows-dc-control-signal-drive-leds>. [Accessed: 04-May-2012].
- [37] “Autosil.” [Online]. Available: <http://www.autosil.pt/>. [Accessed: 20-Jan-2012].
- [38] “Autosil Data Manual,” *Autosil*. [Online]. Available: http://media.wix.com/ugd//a56f3a_c7dbea7b348a9d1e9aaaba85d23e404d.pdf. [Accessed: 20-Jan-2012].
- [39] “Thunder Sky Manual Instruction,” *Thunder Sky company*, 2007. [Online]. Available: <http://www.thunderstruck-ev.com/Manuals/Thundersky Product Manual.pdf>. [Accessed: 24-Jan-2012].
- [40] “Portal ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos,” *ERSE*, 2009. [Online]. Available: <http://www.erse.pt>. [Accessed: 15-Jul-2012].
- [41] “PVGIS - Photovoltaic Geographical Information System,” *European Communities*, 2012. [Online]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=en&map=europe>. [Accessed: 22-Jul-2012].

ANEXO 1

(Código do algoritmo desenvolvido para realização de ensaios)

```
/*-----  
|| Copyright (C) 2012, Nelson Ferraz ||  
||  
|| This program is a free software; you can redistribute it and/or modify it ||  
|| under the terms of the GNU General Public License as published by the ||  
|| Free Software Foundation; either version 2 of the License, or (at your ||  
|| option) any later version. ||  
|| This program is distributed in the hope that it will be useful, but ||  
|| *WITHOUT ANY WARRANTY*; without even the implied warranty of ||  
|| MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the GNU General ||  
|| Public License for more details. ||  
||-----*/  
  
#include <SD.h>  
// < VARIÁVEIS DE ENTRADAS E SAIDAS >  
const int PinIn_Ubat = A0; // Analog IN -> tensão da bat  
const int PinIn_TIC = A1; // Analog IN -> corrente de carga  
const int PinIn_TID = A2; // Analog IN -> corrente de descarga  
const int PinAOut_Ug = 9; // Analog OUT -> Tensão Ug - em PWM  
const int PinDOut_K1 = 2; // Saída Digital K1 - 1A  
const int PinDOut_K2 = 3; // Saída Digital K2 - 2A  
const int PinDOut_K3 = 5; // Saída Digital K3 - 3A  
const int PinDOut_K4 = 7; // Saída Digital K4 - 5A  
const int PinDOut_K5 = 8; // Saída Digital K5 - LED Falha  
const int PinDOut_K6 = 6; // Saída Digital K6 - rel e carga  
  
// < VARIÁVEIS GLOBAIS - CARGA >  
int Ubat = 0; // Tensao bat (0 a 1023)  
int Ubat_V; // Tensao bat (em mV)  
int TIC = 0; // corrente TIC (0 a 1023)  
int TIC_A; // corrente TIC (mA)  
int TI_A;  
int Ug; // Tensao Ug_saida (0 a 255)  
int Ug_temp=100; // Tensao Ug_saida (temporaria)  
int cont = 0; // numero de ciclo no loop (0 e 1)  
int cont_reg = 0; // contador de ciclos para registos  
int t_falha; // guarda o tipo de falha  
int setpoint_carga_mA; // guarda o setpoint de carga  
unsigned long nciclos_c; // guarda o nºciclos de carga  
unsigned long nciclos_n = 0; // guarda n ciclos tempor.  
int carga_completa = 0; // quando carga completa, passa a 1  
unsigned long tempoc_i; // tempo carga inicial  
unsigned long tempoc_ciclo; // tempo de cada ciclo de carga  
unsigned long c_mAs = 0; // carga em mAs em cada ciclo  
unsigned long CARGA_mAs; // carga actual em mAs  
int bat_OK = 0; // passa a 1 quando bat. danificada  
int t_leitura = 10; // delay antes de leitura da porta analogica  
  
// < VARIÁVEIS GLOBAIS - DESCARGA >  
int TID = 0; // corrente TID (0 a 1023)  
int TID_A; // corrente TID(mA)  
unsigned long nciclos_d = 0; // guarda n ciclos tempor.  
unsigned long nciclos_nd = 0; // guarda n ciclos tempor.  
int setpoint_descarga_k; // guarda o setpoint de descarga  
int descarga_completa = 0; // quando descarga completa, passa a 1  
unsigned long tempod_i; // tempo carga inicial  
unsigned long tempod_ciclo; // tempo de cada ciclo de carga  
unsigned long d_mAs = 0; // carga em mAs em cada ciclo
```

ANEXO 1

```

// < VARIÁVEIS DE SETPOINT - CARGA >
const int tensao_cal = 17230; // calibracao tensao bateria
const int corrente_c_cal = 12950; // calibracao corrente de carga
const int Ubat_V_max = 14500; // Tensão max da bateria
const int Ubat_V_min = 10000; // Tensão min da bateria
unsigned long ciclos_1=600; // nº de ciclos 1 (10 min)
unsigned long ciclos_2=1800; // nº de ciclos 2 (30 min)
unsigned long ciclos_3=3600; // nº de ciclos 3 (1 H)
unsigned long ciclos_4=18000; // nº de ciclos 4 (5 H)
unsigned long ciclos_5=36000; // nº de ciclos 5 (10 H)
unsigned long ciclos_6=108000; // nº de ciclos 6 (30 H)
unsigned long ciclos_7=360000; // nº de ciclos 7 (100 H)
int setpoint_carga_mA_1 = 1000; // setpoint corr. carga 1A
int setpoint_carga_mA_2 = 2000; // setpoint corr. carga 2A
int setpoint_carga_mA_3 = 2700; // setpoint corr. carga 3A
int setpoint_carga_mA_4 = 4000; // setpoint corr. carga 4A
int setpoint_carga_mA_5 = 5000; // setpoint corr. carga 5A
int setpoint_carga_mA_6 = 6000; // setpoint corr. carga 6A
int setpoint_carga_mA_7 = 7000; // setpoint corr. carga 7A
int setpoint_carga_mA_8 = 8000; // setpoint corr. carga 8A
int setpoint_carga_mA_9 = 9000; // setpoint corr. carga 9A
int setpoint_carga_mA_10 = 9700; // setpoint corr. carga 10A
int t_act_carga = 1000; // delay entre ajustes de carga
int q_reg = 1; // quantidade de ciclos para fazer registo
unsigned long tempo_c_d; // tempo entre carga e descarga

// < VARIÁVEIS DE SETPOINT - DESCARGA >
int corrente_d_cal = 11850; // calibracao corrente de descarga
int setpoint_descarga_k_1 = 1; // setpoint reles carga 1A - K1
int setpoint_descarga_k_2 = 2; // setpoint reles carga 2A - K2
int setpoint_descarga_k_3 = 3; // setpoint reles carga 3A - K3
int setpoint_descarga_k_4 = 4; // setpoint reles carga 4A - K3+K1
int setpoint_descarga_k_5 = 5; // setpoint reles carga 5A - K4
int setpoint_descarga_k_6 = 6; // setpoint reles carga 6A - K4+K1
int setpoint_descarga_k_7 = 7; // setpoint reles carga 7A - K4+K2
int setpoint_descarga_k_8 = 8; // setpoint reles carga 8A - K4+K3
int setpoint_descarga_k_9 = 9; // setpoint reles carga 9A - K4+K3+K1
int setpoint_descarga_k_10 = 10; // setpoint reles carga 10A - K4+K3+K2
int t_act_descarga = 1000; // delay entre ajustes de descarga

// < VARIÁVEIS CONTROLO SD card >
File myFile;
const int CS_SD = 10; // Chip Select SD
char* nome_soc; // nome ficheiro que guarda o SoC
char* nome_U; // nome ficheiro que guarda tensao de carga
char* nome_I; // nome ficheiro que guarda corrente de carga
char* nome_T; // nome ficheiro que guarda tempo de carga

// ***** ROTINA SETUP *****
// Corre uma vez no inicio do programa - define saldas e inicializacoes
// *****
void setup()
{
  pinMode(PiNDOut_K1, OUTPUT);
  pinMode(PiNDOut_K2, OUTPUT);
  pinMode(PiNDOut_K3, OUTPUT);
  pinMode(PiNDOut_K4, OUTPUT);
  pinMode(PiNDOut_K5, OUTPUT);
  pinMode(PiNDOut_K6, OUTPUT);
  pinMode(CS_SD, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  delay(50);
  if (!SD.begin(CS_SD))
  {
    Serial.println("Erro ao inicializar cartao!");
    t_falha = 1500;
    falha();
  }
  Serial.println("Cartao inicializado!");
}

// ***** ROTINA PRINCIPAL *****
// Rotina principal

```

```

// *****
void loop()
{
  while (cont == 0 && bat_OK == 0)
  {
    cont = 1;

    // * Exemplo para carregar com 7 A, durante 1H *
    CARGA_mAs = 0;
    nome_U = "C_U1.txt";
    nome_I = "C_I1.txt";
    nome_T = "C_T1.txt";
    nci_clos_c = nci_clos_3;
    setpoint_carga_mA = setpoint_carga_mA_7;
    carregabat ();
    finaliza_c();
    nome_soc = "SOC1.txt";
    SD_escrevercarga();
    nome_U = "C_U1_f.txt";
    SD_escreverUf();

    // * Exemplo para carregar com 2 A, durante 1H *
    CARGA_mAs = 0;
    nome_U = "C_U2.txt";
    nome_I = "C_I2.txt";
    nome_T = "C_T2.txt";
    nci_clos_c = nci_clos_3;
    setpoint_carga_mA = setpoint_carga_mA_2;
    carregabat ();
    finaliza_c();
    nome_soc = "SOC2.txt";
    SD_escrevercarga();
    nome_U = "C_U2_f.txt";
    SD_escreverUf();

    // * Exemplo para descarregar com 4 A, durante 100H *
    CARGA_mAs = 200000000;
    nome_U = "D_U1.txt";
    nome_I = "D_I1.txt";
    nome_T = "D_T1.txt";
    nci_clos_d = nci_clos_7;
    setpoint_descarga_k = setpoint_descarga_k_4;
    descarregabat ();
    finaliza_d();
    nome_soc = "SOC3.txt";
    SD_escrevercarga();
    nome_U = "D_U1_f.txt";
    SD_escreverUf();

    // * Exemplo para descarregar com 1 A, durante 10 minutos *
    CARGA_mAs = 200000000;
    nome_U = "D_U2.txt";
    nome_I = "D_I2.txt";
    nome_T = "D_T2.txt";
    nci_clos_d = nci_clos_3;
    setpoint_descarga_k = setpoint_descarga_k_1;
    descarregabat ();
    finaliza_d();
    nome_soc = "SOC4.txt";
    SD_escrevercarga();
    nome_U = "D_U2_f.txt";
    SD_escreverUf();
  }
  digitalWrite(PinDOut_K5, HIGH);
}

// ***** ROTINA FINALIZAR CARGA *****
// Finaliza processo de carga - garante saidas desligadas
// *****
void finaliza_c()
{
  Ug = 0;
  analogWrite(PinAOut_Ug, Ug);
}

```

ANEXO 1

```
digitalWrite(PinDOut_K6, LOW);
Serial.println("FINAL CARGA");
}
// ***** ROTINA FINALIZAR DESCARGA *****
// Finaliza processo de descarga - garante saidas desligadas
// *****
void finaliza_d()
{
digitalWrite(PinDOut_K1, LOW);
digitalWrite(PinDOut_K2, LOW);
digitalWrite(PinDOut_K3, LOW);
digitalWrite(PinDOut_K4, LOW);
digitalWrite(PinDOut_K5, LOW);
Serial.println("FINAL DESCARGA");
}
// ***** ROTINA DE CONTROLO DA CARGA *****
// Controla a carga mediante os setpoints estabelecidos
// *****
void carregabat ()
{
int fator=100;

carga_completa = 0;
ler_tensao();
if((Ubat_V > (Ubat_V_min - 100)) && (Ubat_V < (Ubat_V_max + 100)))
{
tempoc_i = millis();
while (carga_completa == 0 && nciclos_n < nciclos_c)
{
nciclos_n++;
ler_tensao();
ler_corrente_c();

if (Ubat_V <= Ubat_V_max)
{
if (TIC_A < (setpoint_carga_mA - fator))
{
Ug_temp=Ug_temp+1;
}
if (TIC_A > (setpoint_carga_mA + fator))
{
Ug_temp=Ug_temp-1;
}
if (Ug_temp <= 0)
{
Ug_temp = 0;
}
if (Ug_temp >= 255)
{
Ug_temp = 255;
}

digitalWrite(PinDOut_K6, HIGH);
Ug = Ug_temp;
analogWrite(PinAOut_Ug, Ug);
}
else
{
Ug = 0;
analogWrite(PinAOut_Ug, Ug);
digitalWrite(PinDOut_K6, LOW);
carga_completa = 1;
Serial.println(" Carga completa ");
}
delay(t_act_carga);
conta_carga();
}
nciclos_n=0;
}
else
{
bat_danifi cada_tensao();
t_falha = 500;
}
```


ANEXO 1

```
        digitalWrite(Pi nDOut_K4, HIGH);
    }
    if (setpoint_descarga_k == 9)
    {
        digitalWrite(Pi nDOut_K2, LOW);
        digitalWrite(Pi nDOut_K1, HIGH);
        digitalWrite(Pi nDOut_K3, HIGH);
        digitalWrite(Pi nDOut_K4, HIGH);
    }
    if (setpoint_descarga_k == 10)
    {
        digitalWrite(Pi nDOut_K2, HIGH);
        digitalWrite(Pi nDOut_K1, LOW);
        digitalWrite(Pi nDOut_K3, HIGH);
        digitalWrite(Pi nDOut_K4, HIGH);
    }
}
else
{
    digitalWrite(Pi nDOut_K1, LOW);
    digitalWrite(Pi nDOut_K2, LOW);
    digitalWrite(Pi nDOut_K3, LOW);
    digitalWrite(Pi nDOut_K4, LOW);
    digitalWrite(Pi nDOut_K5, LOW);
    descarga_completa = 1;
    Serial.println(" Descarga completa ");
}
delay(t_act_descarga);
conta_descarga();
}
nci clos_nd=0;
}
else
{
    bat_danifi cada_tensao();
    t_fal ha = 500;
    fal ha();
}
}

// ***** ROTINA DE CONTAGEM DA CARGA *****
// Conta a carga (mA.s)
// *****
int conta_carga()
{
    ler_corrente_c();
    tempoc_ciclo = millis() - tempoc_i;
    tempoc_i = millis();
    c_mAs = (TIC_A * tempoc_ciclo)/1000;
    CARGA_mAs = CARGA_mAs + c_mAs;

    cont_reg++;
    TI_A = TIC_A;
    if (cont_reg >= q_reg)
    {
        SD_U();
        SD_I();
        SD_T();
        cont_reg = 0;
    }
    Serial.println(Ubat_V);
    Serial.println(Ug);
    Serial.println(TIC_A);
    Serial.println(CARGA_mAs);
}

// ***** ROTINA DE CONTAGEM DA DESCARGA *****
// Conta a descarga (mA.s)
// *****
int conta_descarga()
{
    ler_corrente_d();
    tempod_ciclo = millis() - tempod_i;
    tempod_i = millis();
}
```

```

d_mAs = (TID_A * tempod_ciclo)/1000;
CARGA_mAs = CARGA_mAs - d_mAs;

cont_reg++;
TI_A = TID_A;
if (cont_reg >= q_reg)
{
  SD_U();
  SD_I();
  SD_T();
  cont_reg = 0;
}
Serial.println(Ubat_V);
Serial.println(TID_A);
Serial.println(CARGA_mAs);
}
// ***** ROTINA LER TENSÃO BATERIA *****
//   Le a tensão da bateria e converte para mV
// *****
void ler_tensao()
{
  delay(t_leitura);
  Ubat = analogRead(PinAn_Ubat);
  Ubat_V = map(Ubat, 0, 1023, 0, tensao_cal);
}
// ***** ROTINA LER CORRENTE DE CARGA *****
//   Le a corrente de carga e converte para mA
// *****
void ler_corrente_c()
{
  delay(t_leitura);
  TIC = analogRead(PinAn_TIC);
  TIC_A = map(TIC, 0, 1023, 0, corrente_c_cal);
}

// ***** ROTINA LER CORRENTE DE DESCARGA *****
//   Le a corrente de descarga e converte para mA
// *****
void ler_corrente_d()
{
  delay(t_leitura);
  TID = analogRead(PinAn_TID);
  TID_A = map(TID, 0, 1023, 0, corrente_d_cal);
}
// ***** ROTINA BATERIA DANIFICADA MIN TENSÃO - CARGA *****
//   Desliga relés e pára ciclo
// *****
void bat_danificada_tensao()
{
  Ug = 0;
  analogWrite(PinAOut_Ug, Ug);
  digitalWrite(PinDOut_K1, LOW);
  digitalWrite(PinDOut_K2, LOW);
  digitalWrite(PinDOut_K3, LOW);
  digitalWrite(PinDOut_K4, LOW);
  digitalWrite(PinDOut_K5, LOW);
  digitalWrite(PinDOut_K6, LOW);
  Serial.println(" BATERIA DANIFICADA - VERIFICAR TENSÃO ");
  bat_OK = 1;
}
// ***** ROTINA FALHA *****
//   Em caso de falha, liga led e para programa (Falha bat- blink 0.5s ; Falha cartão - blink 1.5s)
// *****
void falha()
{
  Ug = 0;
  analogWrite(PinAOut_Ug, Ug);
  digitalWrite(PinDOut_K1, LOW);
  digitalWrite(PinDOut_K2, LOW);
  digitalWrite(PinDOut_K3, LOW);
  digitalWrite(PinDOut_K4, LOW);
  digitalWrite(PinDOut_K5, LOW);
  digitalWrite(PinDOut_K6, LOW);
}

```

ANEXO 1

```
Serial.println(" BATERIA DANIFICADA - VERIFICAR TENSAO ");
bat_OK = 1;

while (t_falha > 0)
{
  Serial.println("FALHA - SISTEMA DESLIGADO");
  digitalWrite(PinDOut_K5, HIGH);
  delay(t_falha);
  digitalWrite(PinDOut_K5, LOW);
  delay(t_falha);
}
}
// ***** ROTINA LER ESTADO DE CARGA *****
// Corre apenas ao inicio e le o estado de carga guardado no SD
// *****
int SD_lercarga()
{
  int arr_int[] = {0,0,0,0,0,0,0,0,0 };
  unsigned long a0,a1,a2,a3,a4,a5,a6,a7,a8;
  int j=0;
  int val_dec;
  int val_int;

  myFile = SD.open(nome_soc);
  if (myFile) {

    while (myFile.available())
    {
      val_dec = (myFile.read());
      if(val_dec==48) val_int = 0;
      if(val_dec==49) val_int = 1;
      if(val_dec==50) val_int = 2;
      if(val_dec==51) val_int = 3;
      if(val_dec==52) val_int = 4;
      if(val_dec==53) val_int = 5;
      if(val_dec==54) val_int = 6;
      if(val_dec==55) val_int = 7;
      if(val_dec==56) val_int = 8;
      if(val_dec==57) val_int = 9;
      arr_int[j]=val_int;
      j++;
    }
    myFile.close();
  }
  else
  {
    Serial.println("Erro de leitura do ficheiro");
    t_falha = 1500;
    falha();
  }
}
a0=arr_int[0];
a1=arr_int[1];
a2=arr_int[2];
a3=arr_int[3];
a4=arr_int[4];
a5=arr_int[5];
a6=arr_int[6];
a7=arr_int[7];
a8=arr_int[8];

CARGA_mAs = a8 + (a7*10) + (a6*100) + (a5*1000) + (a4*10000) + (a3*100000) +
(a2*1000000) + (a1*10000000) + (a0*100000000);
if (j==1) CARGA_mAs = CARGA_mAs/100000000;
if (j==2) CARGA_mAs = CARGA_mAs/10000000;
if (j==3) CARGA_mAs = CARGA_mAs/1000000;
if (j==4) CARGA_mAs = CARGA_mAs/100000;
if (j==5) CARGA_mAs = CARGA_mAs/10000;
if (j==6) CARGA_mAs = CARGA_mAs/1000;
if (j==7) CARGA_mAs = CARGA_mAs/100;
if (j==8) CARGA_mAs = CARGA_mAs/10;
if (j==9) CARGA_mAs = CARGA_mAs/1;

Serial.println("carga actual mAs");
```

```

Serial.println(CARGA_mAs);
}
// ***** ROTINA ESCREVER ESTADO DE CARGA *****
//   Escreve estado de carga no SD, apos ciclo carga/descarga
// *****
int SD_escrevercarga()
{
  int SD_OK = 0;
  int i = 0;

  while (SD_OK == 0 && i <= 3)
  {
    i++;
    myFile = SD.open(nome_soc, FILE_WRITE);
    if (myFile)
    {
      myFile.print(CARGA_mAs);
      myFile.close();
      SD_OK = 1;
    }
  }
  if (SD_OK == 0)
  {
    Serial.println("Erro ao escrever no ficheiro");
    t_falha = 1500;
    falha();
  }
}
// ***** ROTINA ESCREVER TENSÃO - CARGA *****
//   A cada ciclo escreve tensão no SD
// *****
int SD_U()
{
  int SD_OK = 0;
  int i = 0;

  while (SD_OK == 0 && i <= 3)
  {
    i++;
    myFile = SD.open(nome_U, FILE_WRITE);
    if (myFile)
    {
      myFile.println(Ubat_V);
      myFile.close();
      SD_OK = 1;
    }
  }
  if (SD_OK == 0)
  {
    Serial.println("Erro ao escrever no ficheiro");
    t_falha = 1500;
    falha();
  }
}
// ***** ROTINA ESCREVER CORRENTE - CARGA *****
//   A cada ciclo escreve tensão no SD
// *****
int SD_I()
{
  int SD_OK = 0;
  int i = 0;

  while (SD_OK == 0 && i <= 3)
  {
    i++;
    myFile = SD.open(nome_I, FILE_WRITE);
    if (myFile)
    {
      myFile.println(TI_A);
      myFile.close();
      SD_OK = 1;
    }
  }
}
}

```

ANEXO 1

```
if (SD_OK == 0)
{
  Serial.println("Erro ao escrever no ficheiro");
  t_falha = 1500;
  falha();
}
}
// ***** ROTINA ESCREVER TEMPO - CARGA *****
//   A cada ciclo, escreve tensao no SD
// *****
int SD_T()
{
  int SD_OK = 0;
  int i = 0;

  while (SD_OK == 0 && i <= 3)
  {
    i++;
    myFile = SD.open(nome_T, FILE_WRITE);
    if (myFile)
    {
      myFile.println(millis());
      myFile.close();
      SD_OK = 1;
    }
  }
  if (SD_OK == 0)
  {
    Serial.println("Erro ao escrever no ficheiro");
    t_falha = 1500;
    falha();
  }
}
// ***** ROTINA ESCREVER TENSÃO EM VAZIO *****
//   Escrev tensão em vazio, no SD
// *****
void SD_escreverUf()
{
  int i=0;

  while (i < 10)
  {
    ler_tensao();
    delay(600000);
    SD_U();
    i++;
  }
}
```

ANEXO 2

(Código do algoritmo de estimativa do SoC e SoH)

```
/*-----  
|| Copyright (C) 2012, Nelson Ferraz ||  
||  
|| This program is a free software; you can redistribute it and/or modify it ||  
|| under the terms of the GNU General Public License as published by the ||  
|| Free Software Foundation; either version 2 of the License, or (at your ||  
|| option) any later version. ||  
|| This program is distributed in the hope that it will be useful, but ||  
|| *WITHOUT ANY WARRANTY*; without even the implied warranty of ||  
|| MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the GNU General ||  
|| Public License for more details. ||  
||-----*/  
  
#include <SD.h>  
  
// < VARIÁVEIS DE ENTRADAS E SAIDAS >  
const int PinAIn_Ubat = A0; // Analog IN -> tensão da bat  
const int PinAIn_TIC = A1; // Analog IN -> corrente de carga  
const int PinAIn_TID = A2; // Analog IN -> corrente de descarga  
const int PinAOut_Ug = 9; // Analog OUT -> Tensão Ug - em PWM  
const int PinDOut_K1 = 2; // Saída Digital K1 - 1A  
const int PinDOut_K2 = 3; // Saída Digital K2 - 2A  
const int PinDOut_K3 = 5; // Saída Digital K3 - 3A  
const int PinDOut_K4 = 7; // Saída Digital K4 - 5A  
const int PinDOut_K5 = 8; // Saída Digital K5 - LED  
const int PinDOut_K6 = 6; // Saída Digital K6 - relé de carga  
const int PinDOut_SoH = 15; // Saída Digital - SoH baixo  
const int PinDOut_A1 = 16; // Saída Digital - Alarma bateria baixa - nível 1  
const int PinDOut_A2 = 17; // Saída Digital - Alarma bateria baixa - nível 2  
// < VARIÁVEIS GLOBAIS - CARGA >  
int Ubat = 0; // Tensão bat (0 a 1023)  
int Ubat_V; // Tensão bat (em mV)  
int TIC = 0; // corrente TIC (0 a 1023)  
int TIC_A; // corrente TIC (mA)  
int Ug; // Tensão Ug_saida (0 a 255)  
int Ug_temp=100; // Tensão Ug_saida (temporária)  
int cont = 1; // número de ciclos no loop  
int t_falha; // guarda o tipo de falha  
int setpoint_carga_mA; // guarda o setpoint de carga  
long nciclos_c; // guarda o nº ciclos de carga  
long nciclos_n = 0; // guarda n ciclos tempor.  
int carga_completa = 0; // quando carga completa, passa a 1  
unsigned long tempoc_i; // tempo carga inicial  
unsigned long tempoc_ciclo; // tempo de cada ciclo de carga  
long c_mAs = 0; // carga em mAs em cada ciclo  
long CARGA_mAs; // carga actual em mAs  
int bat_OK = 0; // passa a 1 quando bat. danificada  
int t_leitura = 10; // delay antes de leitura da porta analógica  
int cont_reg = 0; // contador de ciclos para registos  
// < VARIÁVEIS GLOBAIS - DESCARGA >  
int TID = 0; // corrente TID (0 a 1023)  
int TID_A; // corrente TID(mA)  
long nciclos_d = 0; // guarda n ciclos tempor.  
long nciclos_nd = 0; // guarda n ciclos tempor.  
int setpoint_descarga_k; // guarda o setpoint de descarga  
int descarga_completa = 0; // quando descarga completa, passa a 1  
int carga_ad = 0; // carga adicional  
unsigned long tempod_i; // tempo carga inicial  
unsigned long tempod_ciclo; // tempo de cada ciclo de carga
```

ANEXO 2

```

long d_mAs = 0; // carga em mAs em cada ciclo
// < VARIÁVEIS DE SETPOINT - CARGA >
const int tensao_cal = 17230; // calibracao tensao bateria
const int corrente_c_cal = 13000; // calibracao corrente de carga
long nciclos_1=900; // nº de ciclos 1 (15 min)
long nciclos_2=1800; // nº de ciclos 2 (30 min)
long nciclos_3=2700; // nº de ciclos 3 (45 H)
long nciclos_4=3600; // nº de ciclos 4 (1 H)
long nciclos_5=36000; // nº de ciclos 5 (10 H)
int setpoint_carga_mA_1 = 1000; // setpoint corr. carga 1A
int setpoint_carga_mA_2 = 2000; // setpoint corr. carga 2A
int setpoint_carga_mA_3 = 2700; // setpoint corr. carga 3A
int setpoint_carga_mA_4 = 4000; // setpoint corr. carga 4A
int setpoint_carga_mA_5 = 5000; // setpoint corr. carga 5A
int setpoint_carga_mA_6 = 6000; // setpoint corr. carga 6A
int setpoint_carga_mA_7 = 7000; // setpoint corr. carga 7A
int setpoint_carga_mA_8 = 8000; // setpoint corr. carga 8A
int setpoint_carga_mA_9 = 9000; // setpoint corr. carga 9A
int setpoint_carga_mA_10 = 9700; // setpoint corr. carga 10A
int t_act_carga = 1000; // delay entre ajustes de carga
int q_reg = 60; // quantidade de ciclos para fazer registo
long tempo_c_d; // tempo entre carga e descarga
// < VARIÁVEIS DE SETPOINT - DESCARGA >
int corrente_d_cal = 11150; // calibracao corrente de descarga
int setpoint_descarga_k_1 = 1; // setpoint reles carga 1A - K1
int setpoint_descarga_k_2 = 2; // setpoint reles carga 2A - K2
int setpoint_descarga_k_3 = 3; // setpoint reles carga 3A - K3
int setpoint_descarga_k_4 = 4; // setpoint reles carga 4A - K3+K1
int setpoint_descarga_k_5 = 5; // setpoint reles carga 5A - K4
int setpoint_descarga_k_6 = 6; // setpoint reles carga 6A - K4+K1
int setpoint_descarga_k_7 = 7; // setpoint reles carga 7A - K4+K2
int setpoint_descarga_k_8 = 8; // setpoint reles carga 8A - K4+K3
int setpoint_descarga_k_9 = 9; // setpoint reles carga 9A - K4+K3+K1
int setpoint_descarga_k_10 = 10; // setpoint reles carga 10A - K4+K3+K2
int t_act_descarga = 1000; // delay entre ajustes de descarga
// < VARIÁVEIS CONTROLO SD card >
File myFile; // Define o ficheiro
const int CS_SD = 10; // Chip Select SD
char* nome_FCC = "FCC.txt"; // Guarda nome do ficheiro de registo
char* nome_SOH = "SOH.txt"; // Guarda nome do ficheiro de registo
char* nome_S_SOC = "U_SOC.txt"; // Guarda nome do ficheiro de registo
char* nome_S_SOH = "U_SOH.txt"; // Guarda nome do ficheiro de registo
char* nome_CARGA = "CARGA.TXT"; // Guarda nome do ficheiro de registo da carga
// < VARIÁVEIS rotina FCC >
int aj = 0; // controlo da rotina de calculo FCC e FEB
float SOH = 100.00; // FEB
int SOHi; // FEB (inteiro)
long CARGA_full; // Valor da carga máxima (bateria totalmente carregada)
long CARGA_est_i; // Carga estipulada/1000
long CARGA_dif = 0; // guarda diferenca de carga
long CARGA_As; // Carga em As
long Saida_SoC; // Saida em tensão - SoC (entre 1 e 5V)
long Saida_SoH; // Saida em tensão - SoH (entre 1 e 5V)

// < PARAMETROS >
int Ubat_V_min = 10000; // Tensão min da bateria
int Ubat_V_max = 14500; // Tensão max da bateria
long CARGA_est = 72000000; // Valor carga estipulada (mAs) da bateria
float FCC = 97.80; // FCC inicial
float FCC_m = 98.00; // FCC maximo
long SoC_AI1 = 7200000; // SoC minimo - Alarme 1 (10%)
long SoC_AI2 = 3600000; // SoC minimo - Alarme 2 (5%)
int SoH_m = 80; // Valor minimo do SoH (Alarme)

// ***** ROTINA SETUP *****
// Corre uma vez no inicio do programa - define saidas e inicializações
// *****
void setup()
{
    int i = 0;
    CARGA_mAs = CARGA_est;
    CARGA_full = CARGA_est;
    pinMode(PiNDOut_K1, OUTPUT);

```

```

pinMode(PinDOut_K2, OUTPUT);
pinMode(PinDOut_K3, OUTPUT);
pinMode(PinDOut_K4, OUTPUT);
pinMode(PinDOut_K5, OUTPUT);
pinMode(PinDOut_K6, OUTPUT);
pinMode(CS_SD, OUTPUT);
Serial.begin(9600);
delay(50);

while (!SD.begin(CS_SD) && i <= 3)
{
  i++;
  delay(50);
}
if (i >= 3)
{
  Serial.println("Erro ao inicializar cartao!");
  t_falha = 1500;
  falha();
}
Serial.println("Cartao inicializado!");
}
// ***** ROTINA PRINCIPAL *****
// Rotina principal - loop infinito
// *****
void loop()
{
  while (cont <= 1 && bat_OK == 0)
  {
    // Exemplo de descarga a 4A durante 30 minutos
    nci_clos_d = nci_clos_2;
    setpoint_descarga_k = setpoint_descarga_k_4;
    descarregabat ();
    // Exemplo de descarga a 10A durante 15 minutos
    nci_clos_d = nci_clos_1;
    setpoint_descarga_k = setpoint_descarga_k_10;
    descarregabat ();
    // Exemplo de carga a 2A durante 45 minutos
    nci_clos_c = nci_clos_3;
    setpoint_carga_mA = setpoint_carga_mA_2;
    carregabat ();
    // Exemplo de carga a 8A durante 1 hora
    nci_clos_c = nci_clos_4;
    setpoint_carga_mA = setpoint_carga_mA_8;
    carregabat ();

    cont = cont + 1;
  }
  finaliza_cd();
  digitalWrite(PinDOut_K5, HIGH);
}
// ***** ROTINA DE CONTROLO DA CARGA *****
// Controla a carga mediante o setpoint estabelecido
// *****
void carregabat ()
{
  int fator=100;
  carga_completa = 0;
  aj = 0;
  ler_tensao();
  if((Ubat_V > (Ubat_V_min - 100)) && (Ubat_V < (Ubat_V_max + 100)))
  {
    tempoc_i = millis();
    while (nci_clos_n < nci_clos_c)
    {
      nci_clos_n++;
      ler_tensao();
      ler_corrente_c();

      if (carga_completa == 0)
      {
        if (Ubat_V <= Ubat_V_max)
        {

```

ANEXO 2

```
    if (TIC_A < (setpoint_carga_mA - fator))
    {
        Ug_temp=Ug_temp+1;
    }
    if (TIC_A > (setpoint_carga_mA + fator))
    {
        Ug_temp=Ug_temp-1;
    }
    if (Ug_temp <= 0)
    {
        Ug_temp = 0;
    }
    if (Ug_temp >= 255)
    {
        Ug_temp = 255;
    }
    digitalWrite(PinDOut_K6, HIGH);
    Ug = Ug_temp;
    analogWrite(PinAOut_Ug, Ug);
}
else
{
    finaliza_cd();
    carga_completa = 1;
    carga_ad = 1;
}
}
delay(t_act_carga);
conta_carga();
}
nciclos_n=0;
finaliza_cd();
}
else
{
    t_falha = 500;
    falha();
}
}
// ***** ROTINA DE CONTROLO DA DESCARGA *****
// Controla a descarga mediante o setpoint estabelecido
// *****
int descarregabat ()
{
    descarga_completa = 0;
    carga_ad = 0;
    ler_tensao();
    if((Ubat_V > (Ubat_V_min - 100)) && (Ubat_V < (Ubat_V_max + 100)))
    {
        tempod_i = millis();
        while (nciclos_nd < nciclos_d)
        {
            nciclos_nd++;
            ler_tensao();
            if (descarga_completa == 0)
            {
                if (Ubat_V >= Ubat_V_min)
                {
                    if (setpoint_descarga_k == 1)
                    {
                        digitalWrite(PinDOut_K2, LOW);
                        digitalWrite(PinDOut_K3, LOW);
                        digitalWrite(PinDOut_K4, LOW);
                        digitalWrite(PinDOut_K1, HIGH);
                    }
                    if (setpoint_descarga_k == 2)
                    {
                        digitalWrite(PinDOut_K1, LOW);
                        digitalWrite(PinDOut_K3, LOW);
                        digitalWrite(PinDOut_K4, LOW);
                        digitalWrite(PinDOut_K2, HIGH);
                    }
                    if (setpoint_descarga_k == 3)
                }
            }
        }
    }
}
```

```

{
    digi tal Write(Pi nDOut_K1, LOW);
    digi tal Write(Pi nDOut_K2, LOW);
    digi tal Write(Pi nDOut_K4, LOW);
    digi tal Write(Pi nDOut_K3, HI GH);
}
if (setpoi nt_descarga_k == 4)
{
    digi tal Write(Pi nDOut_K2, LOW);
    digi tal Write(Pi nDOut_K4, LOW);
    digi tal Write(Pi nDOut_K1, HI GH);
    digi tal Write(Pi nDOut_K3, HI GH);
}
if (setpoi nt_descarga_k == 5)
{
    digi tal Write(Pi nDOut_K1, LOW);
    digi tal Write(Pi nDOut_K2, LOW);
    digi tal Write(Pi nDOut_K3, LOW);
    digi tal Write(Pi nDOut_K4, HI GH);
}
if (setpoi nt_descarga_k == 6)
{
    digi tal Write(Pi nDOut_K2, LOW);
    digi tal Write(Pi nDOut_K3, LOW);
    digi tal Write(Pi nDOut_K1, HI GH);
    digi tal Write(Pi nDOut_K4, HI GH);
}
if (setpoi nt_descarga_k == 7)
{
    digi tal Write(Pi nDOut_K1, LOW);
    digi tal Write(Pi nDOut_K3, LOW);
    digi tal Write(Pi nDOut_K2, HI GH);
    digi tal Write(Pi nDOut_K4, HI GH);
}
if (setpoi nt_descarga_k == 8)
{
    digi tal Write(Pi nDOut_K1, LOW);
    digi tal Write(Pi nDOut_K2, LOW);
    digi tal Write(Pi nDOut_K3, HI GH);
    digi tal Write(Pi nDOut_K4, HI GH);
}
if (setpoi nt_descarga_k == 9)
{
    digi tal Write(Pi nDOut_K2, LOW);
    digi tal Write(Pi nDOut_K1, HI GH);
    digi tal Write(Pi nDOut_K3, HI GH);
    digi tal Write(Pi nDOut_K4, HI GH);
}
if (setpoi nt_descarga_k == 10)
{
    digi tal Write(Pi nDOut_K2, HI GH);
    digi tal Write(Pi nDOut_K1, LOW);
    digi tal Write(Pi nDOut_K3, HI GH);
    digi tal Write(Pi nDOut_K4, HI GH);
}
}
else
{
    finali za_cd();
    descarga_completa = 1;
}
}
delay(t_act_descarga);
conta_descarga();
}
nci clos_nd=0;
finali za_cd();
}
else
{
    t_fal ha = 500;
    fal ha();
}
}

```

ANEXO 2

```
}
// ***** ROTINA DE CONTAGEM DA CARGA *****
// Conta a carga (mA.s)
// *****
int conta_carga()
{
  ler_corrente_c();
  tempoc_ciclo = millis() - tempoc_i;
  tempoc_i = millis();
  c_mAs = (TIC_A * tempoc_ciclo)/1000;
  c_mAs = (float(c_mAs) * FCC)/100;
  CARGA_mAs = CARGA_mAs + c_mAs;

  if ((carga_completa == 1) && (aj == 0))
  {
    aj_FCC_SoH();
  }
  SAIDA_SoC();
  SAIDA_SoH();

  cont_reg++;
  if (cont_reg >= q_reg)
  {
    SD_escreverFCC();
    SD_escreverSOH();
    SD_escreverU_SoC();
    SD_escreverU_SoH();
    SD_escrevercarga();
    cont_reg = 0;
  }
}
// ***** ROTINA DE CONTAGEM DA DESCARGA *****
// Conta a descarga (mA.s)
// *****
int conta_descarga()
{
  ler_corrente_d();
  tempod_ciclo = millis() - tempod_i;
  tempod_i = millis();
  d_mAs = (TID_A * tempod_ciclo)/1000;
  CARGA_mAs = CARGA_mAs - d_mAs;

  SAIDA_SoC();
  SAIDA_SoH();

  cont_reg++;
  if (cont_reg >= q_reg)
  {
    SD_escreverFCC();
    SD_escreverSOH();
    SD_escreverU_SoC();
    SD_escreverU_SoH();
    SD_escrevercarga();
    cont_reg = 0;
  }
}
// ***** ROTINA FCC e FEB *****
// Atualiza os valores do FCC e do FEB
// *****
int aj_FCC_SoH()
{
  CARGA_diff = CARGA_mAs - CARGA_full;
  CARGA_full = CARGA_mAs;

  FCC = FCC - ((float(CARGA_diff) / float(CARGA_full))*100);
  if (FCC >= FCC_m)
  {
    FCC = FCC_m;
  }
  SOH = ((float(CARGA_full) / float(CARGA_est))*100);
  if(SOH > 100.00)
  {
    SOH = 100.00;
  }
}
```

```

    }
    aj = 1;
}
// ***** ROTINA SAIDA SOC *****
//   Atualiza a saida de acordo com o SoC
// *****
int SAIDA_SoC()
{
    CARGA_As = CARGA_mAs / 1000;
    CARGA_est_i = CARGA_est / 1000;

    Saida_SoC = map (CARGA_As, 0, CARGA_est_i, 51, 255);

    if (CARGA_mAs <= SoC_AI1)
    {
        digitalWrite(PiNDOut_A1, HIGH);
    }
    else
    {
        digitalWrite(PiNDOut_A1, LOW);
    }
    if (CARGA_mAs <= SoC_AI2)
    {
        digitalWrite(PiNDOut_A2, HIGH);
    }
    else
    {
        digitalWrite(PiNDOut_A2, LOW);
    }
}
// ***** ROTINA SAIDA SOH *****
//   Atualiza a saida de acordo com o SoH e liga alarme se SoH inferior ao definido
// *****
int SAIDA_SoH()
{
    SOHi = int(SoH);
    Saida_SoH = map (SOHi, 0, 100, 51, 255);

    if (SOHi <= SoH_m)
    {
        digitalWrite(PiNDOut_SOH, HIGH);
    }
    else
    {
        digitalWrite(PiNDOut_SOH, LOW);
    }
}
// ***** ROTINA LER TENSÃO BATERIA *****
//   Le a tensão da bateria e converte para mV
// *****
void ler_tensao()
{
    delay(t_leitura);
    Ubat = analogRead(PiNAIn_Ubat);
    Ubat_V = map(Ubat, 0, 1023, 0, tensao_cal);
}
// ***** ROTINA LER CORRENTE DE CARGA *****
//   Le a corrente de carga e converte para mA
// *****
void ler_corrente_c()
{
    delay(t_leitura);
    TIC = analogRead(PiNAIn_TIC);
    TIC_A = map(TIC, 0, 1023, 0, corrente_c_cal);
}
// ***** ROTINA LER CORRENTE DE DESCARGA *****
//   Le a corrente de descarga e converte para mA
// *****
void ler_corrente_d()
{
    delay(t_leitura);
    TID = analogRead(PiNAIn_TID);
    TID_A = map(TID, 0, 1023, 0, corrente_d_cal);
}

```

ANEXO 2

```
}
// ***** ROTINA FALHA *****
//   Interrompe programa e liga LED (Falha bat- blink 0.5s ; Falha SD - blink 1.5s)
// *****
void falha()
{
  finaliza_cd();
  bat_OK = 1;

  while (t_falha > 0)
  {
    Serial.println("FALHA - SISTEMA DESLIGADO");
    digitalWrite(PinDOut_K5, HIGH);
    delay(t_falha);
    digitalWrite(PinDOut_K5, LOW);
    delay(t_falha);
  }
}
// ***** ROTINA FINALIZAR CARGA E DESCARGA *****
//   Finaliza processo de carga/descarga - garante saidas desligadas
// *****
void finaliza_cd()
{
  Ug = 0;
  analogWrite(PinAOut_Ug, Ug);
  digitalWrite(PinDOut_K6, LOW);
  digitalWrite(PinDOut_K1, LOW);
  digitalWrite(PinDOut_K2, LOW);
  digitalWrite(PinDOut_K3, LOW);
  digitalWrite(PinDOut_K4, LOW);
  digitalWrite(PinDOut_K5, LOW);
}
// ***** ROTINA ESCREVER FCC *****
//   Escreve o FCC no SD
// *****
int SD_escreverFCC()
{
  int SD_OK = 0;
  int i = 0;

  while (SD_OK == 0 && i <= 3)
  {
    i++;
    myFile = SD.open(nome_FCC, FILE_WRITE);
    if (myFile)
    {
      myFile.println(FCC);
      myFile.close();
      SD_OK = 1;
    }
  }
  if (SD_OK == 0)
  {
    Serial.println("Erro ao escrever no ficheiro");
    t_falha = 1500;
    falha();
  }
}
// ***** ROTINA ESCREVER SOH *****
//   Escreve o SOH no SD
// *****
int SD_escreverSOH()
{
  int SD_OK = 0;
  int i = 0;

  while (SD_OK == 0 && i <= 3)
  {
    i++;
    myFile = SD.open(nome_SOH, FILE_WRITE);
    if (myFile)
    {
      myFile.println(SOH);
    }
  }
}
```

```

        myFile.close();
        SD_OK = 1;
    }
}
if (SD_OK == 0)
{
    Serial.println("Erro ao escrever no ficheiro");
    t_falha = 1500;
    falha();
}
}
// ***** ROTINA ESCREVER SAIDA SOC *****
//     Escreve a SAIDA SOC no SD
// *****
int SD_escreverU_SOC()
{
    int SD_OK = 0;
    int i = 0;

    while (SD_OK == 0 && i <= 3)
    {
        i++;
        myFile = SD.open(nome_S_SOC, FILE_WRITE);
        if (myFile)
        {
            myFile.println(Saida_Soc);
            myFile.close();
            SD_OK = 1;
        }
    }
    if (SD_OK == 0)
    {
        Serial.println("Erro ao escrever no ficheiro");
        t_falha = 1500;
        falha();
    }
}
// ***** ROTINA ESCREVER SAIDA SOH *****
//     Escreve a SAIDA SOH no SD
// *****
int SD_escreverU_SOH()
{
    int SD_OK = 0;
    int i = 0;

    while (SD_OK == 0 && i <= 3)
    {
        i++;
        myFile = SD.open(nome_S_SOH, FILE_WRITE);
        if (myFile)
        {
            myFile.println(Saida_Soh);
            myFile.close();
            SD_OK = 1;
        }
    }
    if (SD_OK == 0)
    {
        Serial.println("Erro ao escrever no ficheiro");
        t_falha = 1500;
        falha();
    }
}
// ***** ROTINA ESCREVER CARGA *****
//     Escreve a CARGA no SD
// *****
int SD_escrevercarga()
{
    int SD_OK = 0;
    int i = 0;

    while (SD_OK == 0 && i <= 3)
    {

```

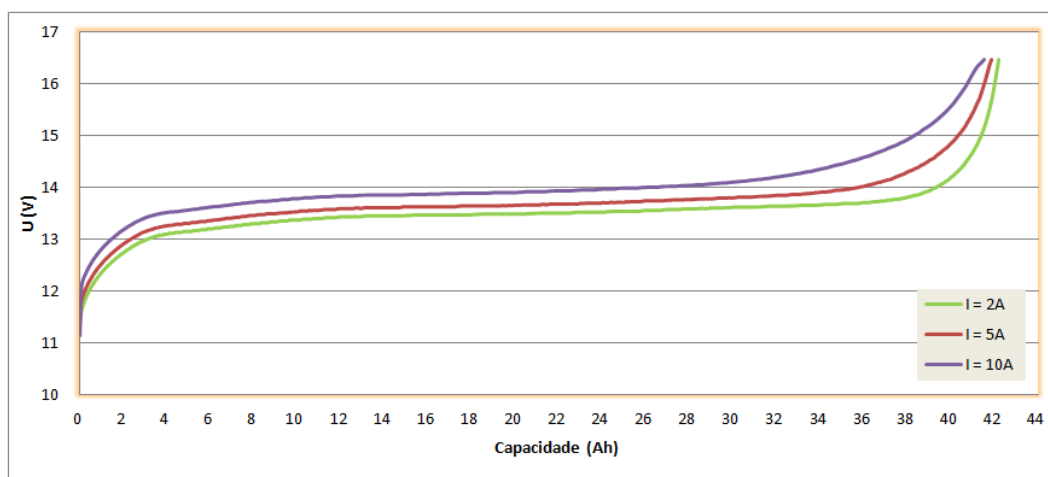
ANEXO 2

```
i++;
myFile = SD.open(nome_CARGA, FILE_WRITE);
if (myFile)
{
  myFile.println(CARGA_mAs);
  myFile.close();
  SD_OK = 1;
}
}
if (SD_OK == 0)
{
  Serial.println("Erro ao escrever no ficheiro");
  t_falha = 1500;
  falha();
}
}
```

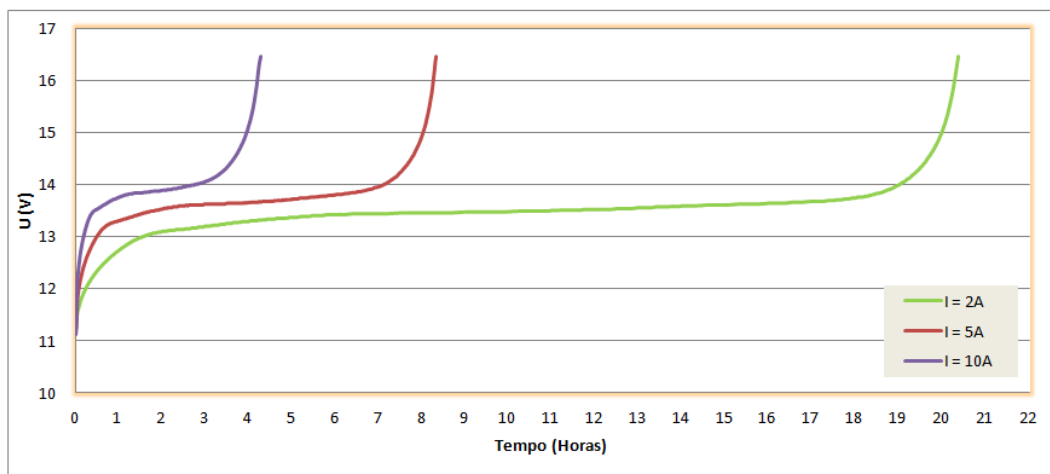
ANEXO 3

(Resultados dos ensaios realizados à bateria de 40Ah)

A. Gráfico do perfil de carga da bateria de 40Ah – Tensão em função da capacidade.

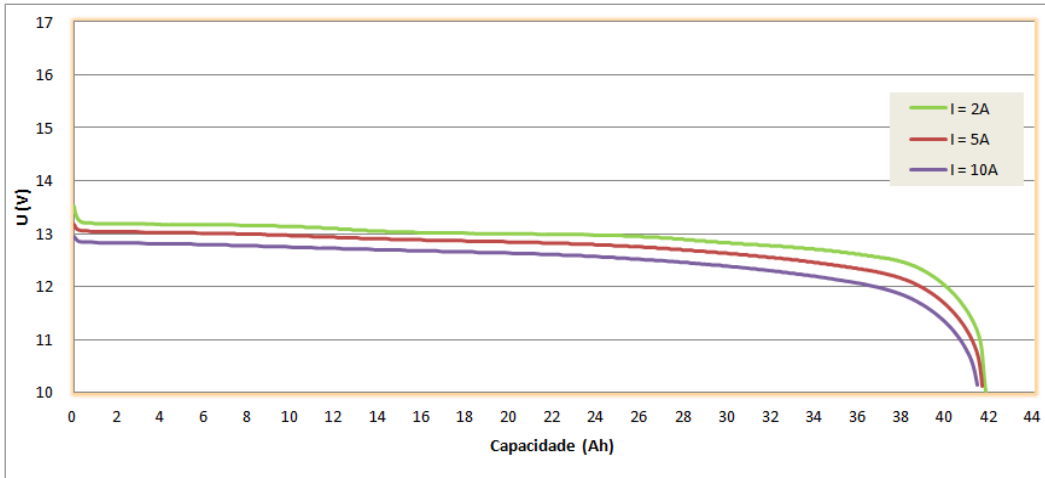


B. Gráfico do perfil de carga da bateria de 40Ah – Tensão em função do tempo.

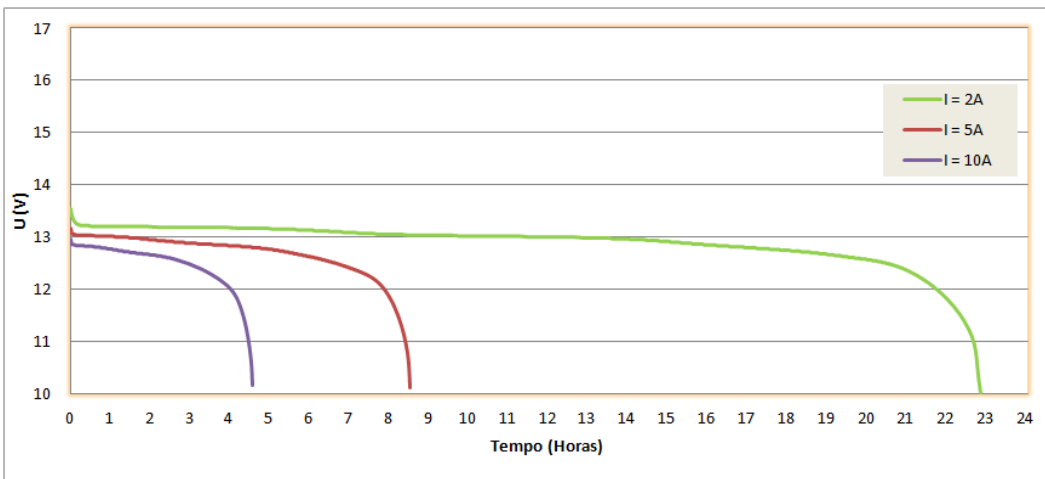


ANEXO 3

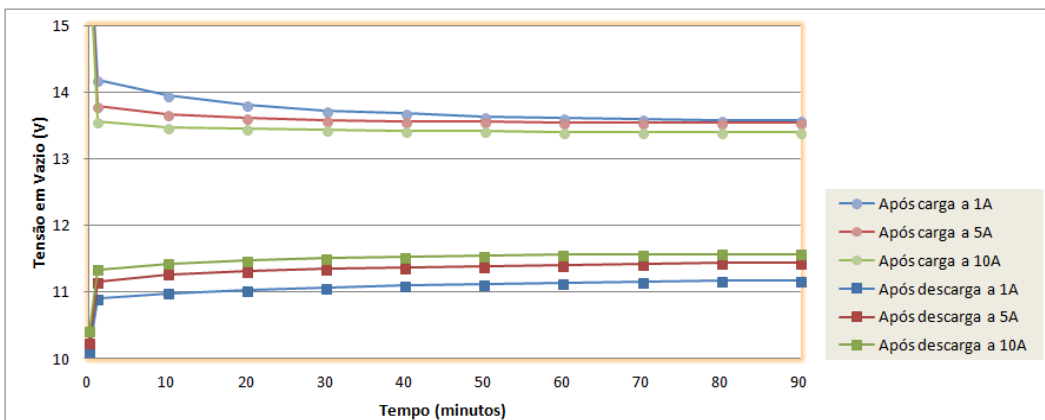
C. Gráfico do perfil de descarga da bateria de 40Ah – Tensão em função da capacidade.



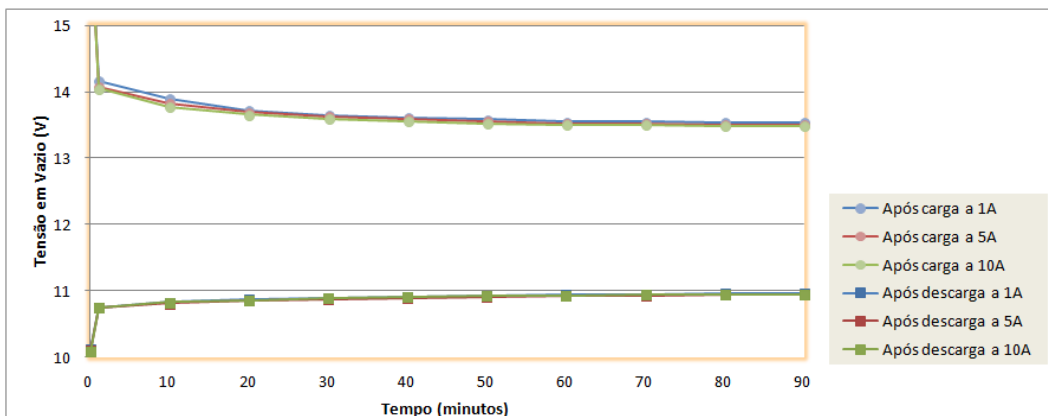
D. Gráfico do perfil de descarga da bateria de 40Ah – Tensão em função do tempo.



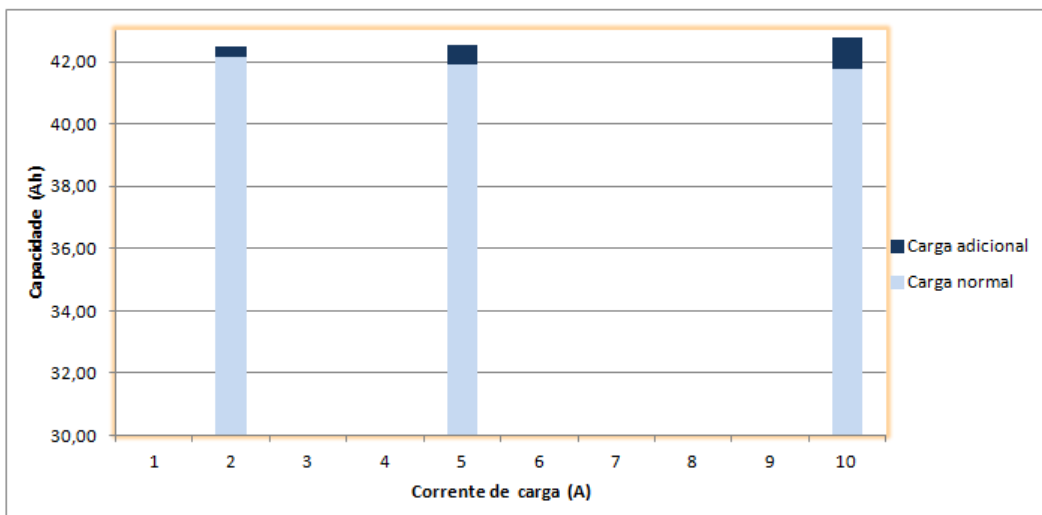
E. Gráfico de evolução da tensão em vazio, após carga/descarga normal.



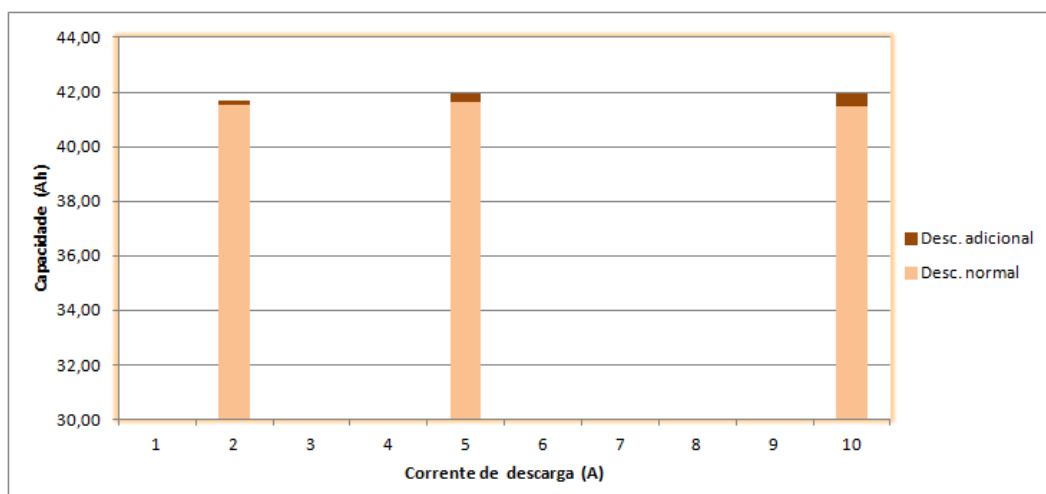
F. Gráfico de evolução da tensão em vazio, após carga/descarga adicional.



G. Carga média absorvida pela bateria de 40Ah, em função da corrente de carga.

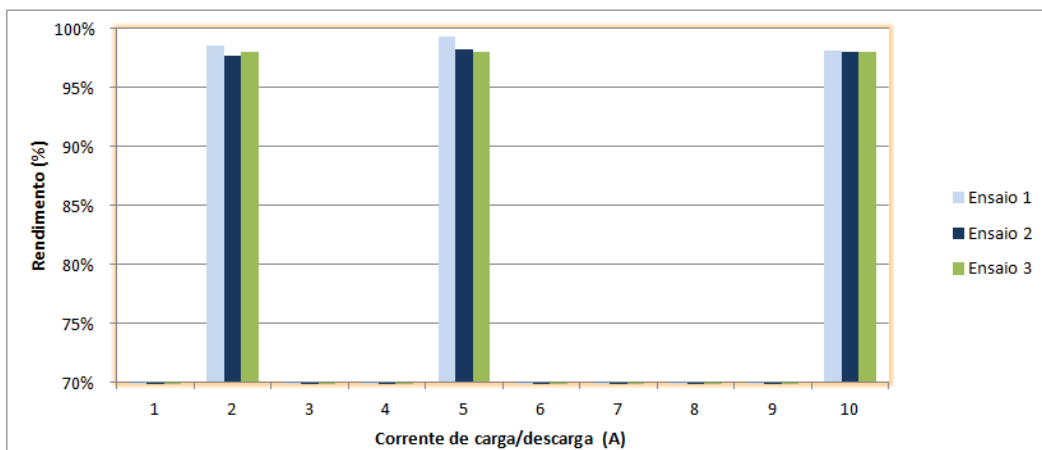


H. Carga média fornecida pela bateria de 40Ah, em função da corrente de descarga.

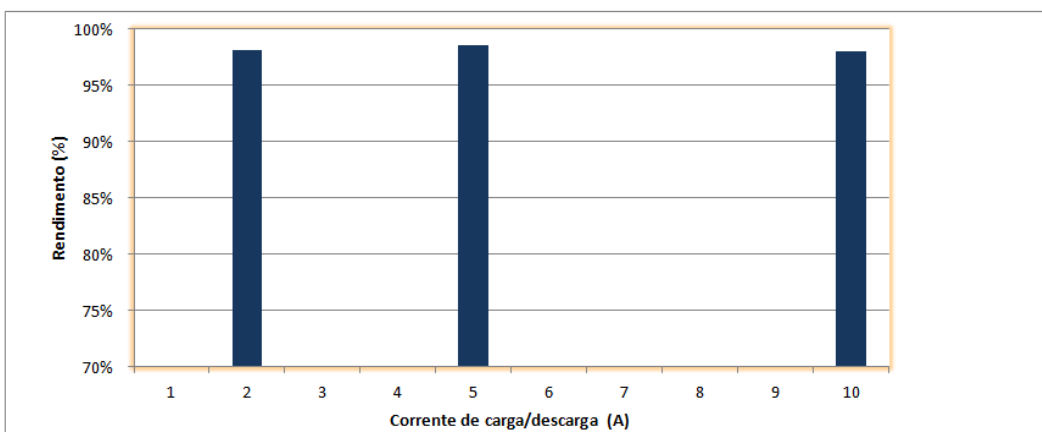


ANEXO 3

I. Gráfico do rendimento global da bateria de 40Ah, por ensaio.



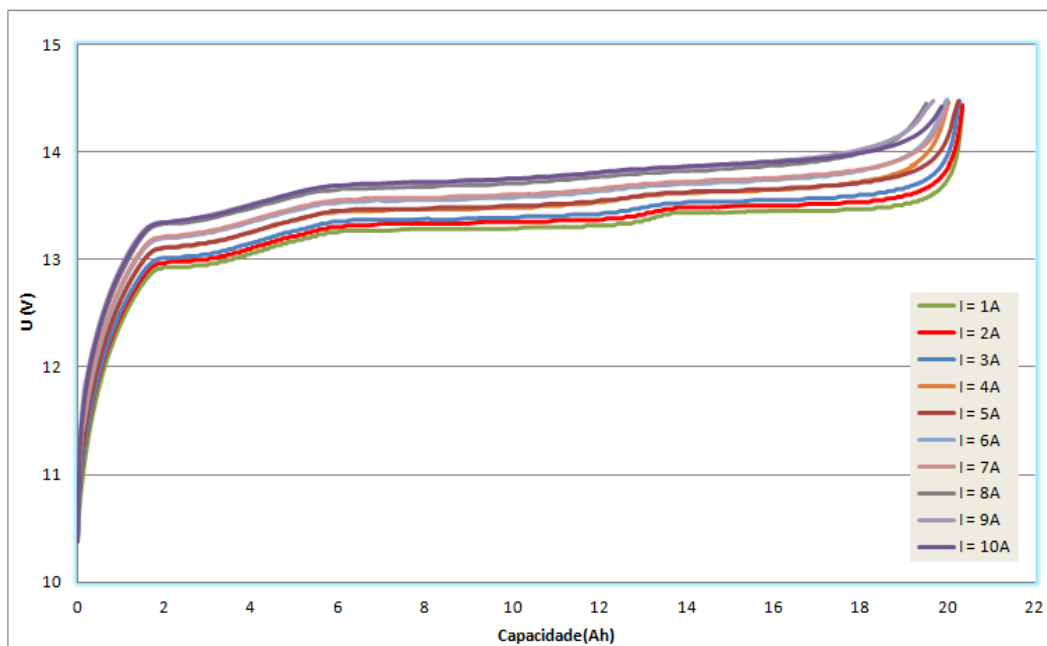
J. Gráfico do rendimento médio global da bateria de 40Ah.



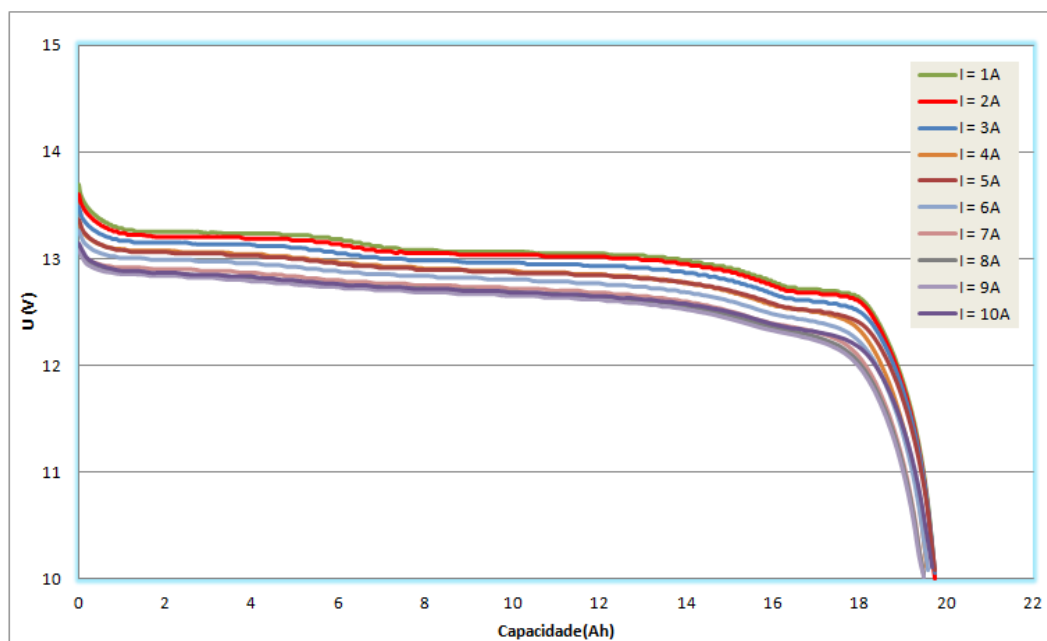
ANEXO 4

(Perfis de carga e descarga da bateria de 20Ah)

A. Perfil de carga – Tensão em função da corrente de carga.



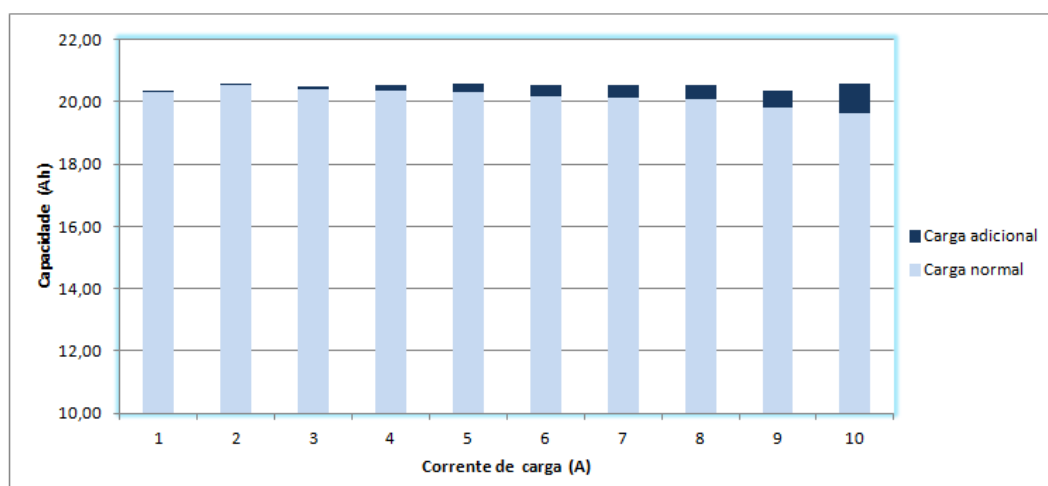
B. Perfil de descarga – Tensão em função da corrente de descarga.



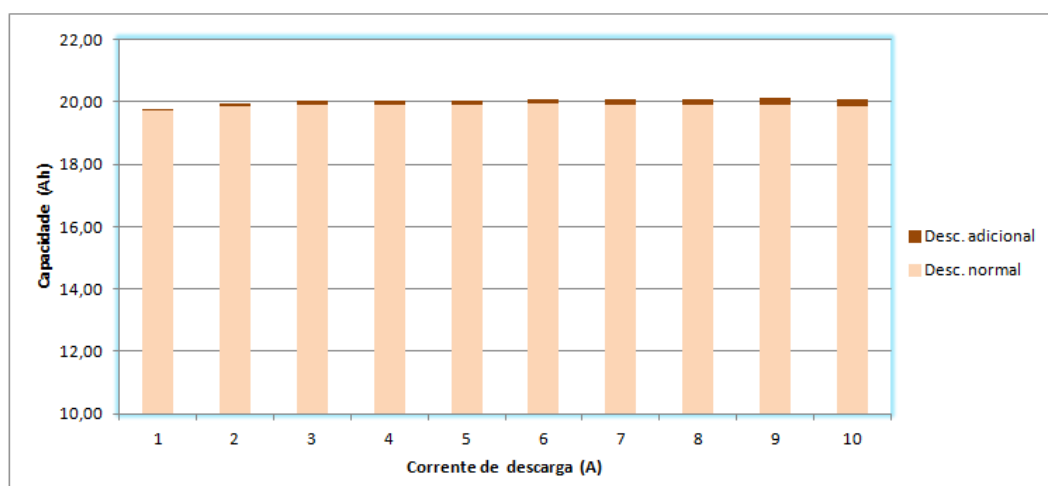
ANEXO 5

(Resultados individuais dos ensaios realizados à bateria de 20Ah – contagem da carga)

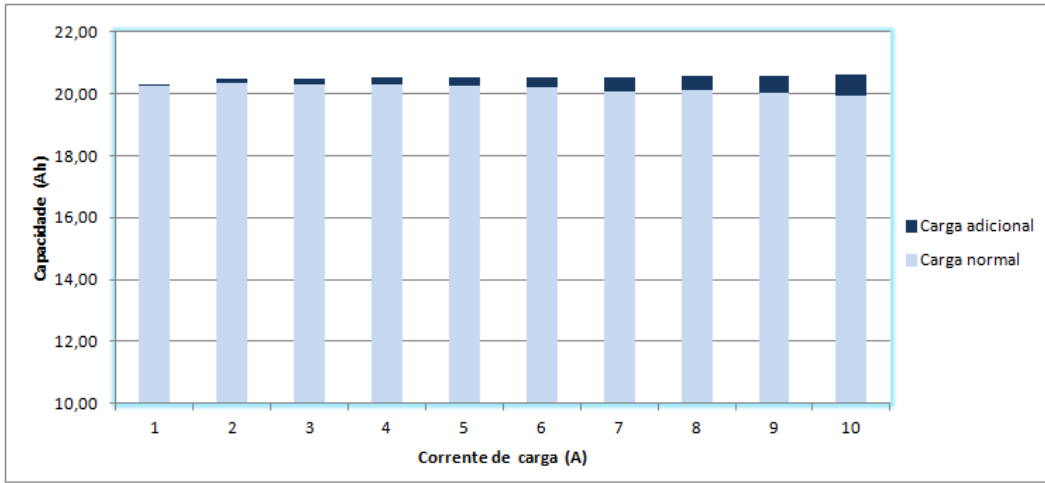
A. Ensaio 1 - Carga média absorvida pela bateria, em função da corrente de carga.



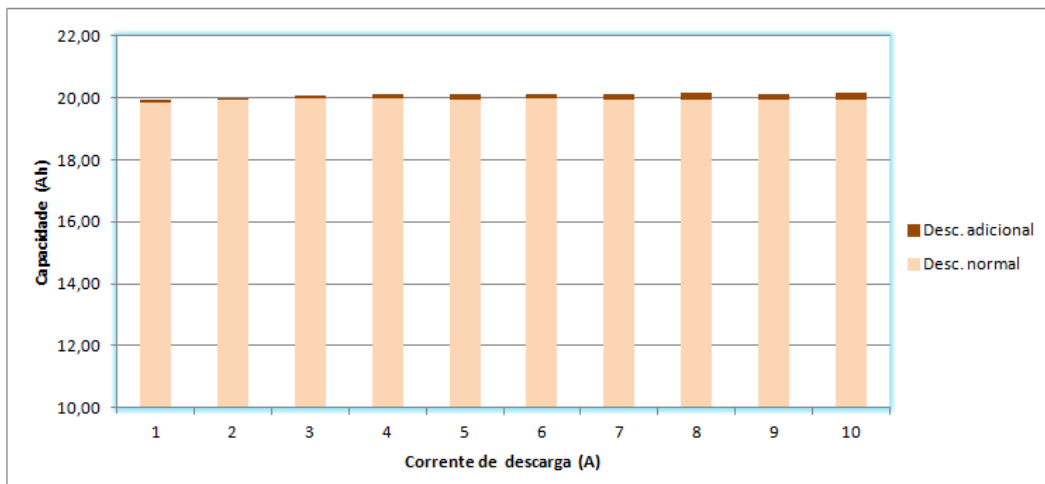
B. Ensaio 1 – Carga média fornecida pela bateria, em função da corrente de descarga.



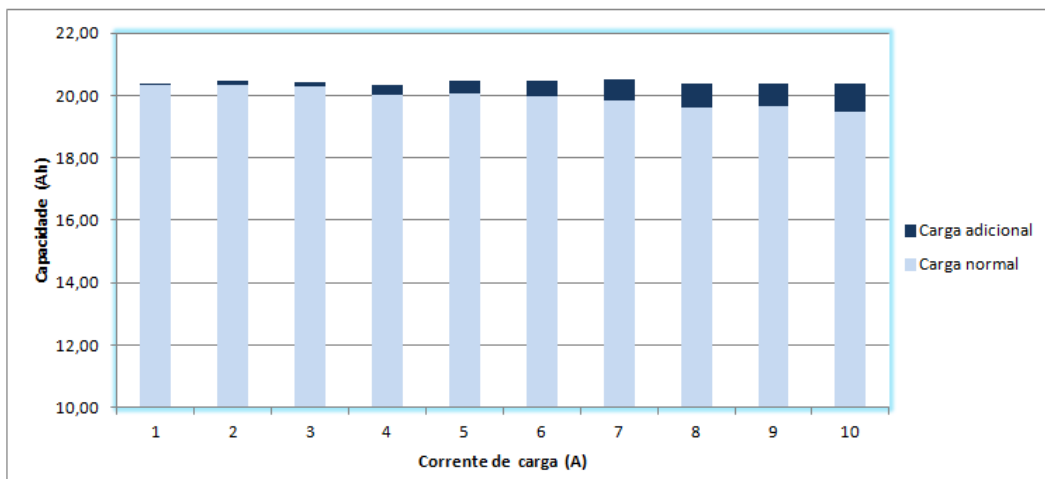
C. Ensaio 2 - Carga média absorvida pela bateria, em função da corrente de carga.



D. Ensaio 2 - Carga média fornecida pela bateria, em função da corrente de descarga.



E. Ensaio 3 - Carga média absorvida pela bateria, em função da corrente de carga.



F. Ensaio 3 - Carga média fornecida pela bateria, em função da corrente de descarga.

