



# ESTUDO DAS VANTAGENS DA INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA NOS SEE (D1415-032)

**NUNO FALCÃO VAZ**

Outubro de 2019

# DISSERTAÇÃO DO MEESEE

## ESTUDO DAS VANTAGENS DA INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA NOS SEE (D1415-032)

Nuno Manuel Falcão Pereira Rodrigues Vaz



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Eléctricos de Energia

**2019**



Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE -  
Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: Nuno Manuel Falcão Pereira Rodrigues Vaz, N<sup>o</sup>1170086, 1170086@isep.ipp.pt

Orientação científica: Prof. Doutor António Andrade, ata@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

**2019**



“A Energia não pode ser criada nem destruída, mas pode ser convertida de uma forma para outra.” A Lei da Conservação da Energia



Este trabalho dedico em especial à minha família e aos meus filhos



## *Agradecimentos*

Os meus agradecimentos estendem-se a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para eu conseguir atingir mais este objetivo académico.

Um agradecimento ao Prof. Doutor António Andrade pela sugestão do tema, de particular importância nos dias de hoje, e também pela ajuda e conselhos valiosos durante a elaboração deste trabalho.

Aos meus colegas e professores com quem tive oportunidade de partilhar estes dois últimos anos, em especial para a pequena Jessica, para o Fred, para a Madalena e para o Romeu, com quem partilhei mais proximamente este mestrado. Também um agradecimento aos Professores José Beleza de Carvalho, António Gomes, Mauricio Dias, Sérgio Ramos, Carlos Freitas, Teresa Nogueira que, inconscientemente, e à sua maneira, deram-me motivação adicional para cumprir este objetivo.

Por último e de maior importância, um reforço de agradecimento a toda a minha família, em especial à minha mulher, aos meus filhotes, Guilherme e Carolina, e aos meus pais, de quem tive toda a compreensão por prescindir de alguns momentos de vivência com eles, para me poder dedicar à elaboração deste trabalho de dissertação.



## *Resumo*

Este trabalho de dissertação pretende destacar a importância hoje, e no futuro, da integração de sistemas de baterias nos SEE para armazenamento de energia, referindo-se às principais vantagens da sua aplicação, nomeadamente como apoio à Mobilidade Elétrica.

Os sistemas de armazenamento de energia (ESS), além de darem um passo rumo à autonomia energética, ao permitirem guardar eletricidade para momentos em que não está a ser produzida, têm também a vantagem de amenizar as variações de preços e de potência que estão dependentes das condições meteorológicas (sol, vento, ou água nas barragens).

Nas fontes de energia renováveis, especialmente na fotovoltaica, pela sua característica de produção intermitente, o armazenamento de energia será fulcral para que o consumo da energia de origem fotovoltaica descole da franja residual em que se encontra atualmente (entre 1% e 2,5% na atualidade).

A mobilidade elétrica é também hoje um setor de inegável crescimento e, com ele, novas exigências sobre a atual infraestrutura de distribuição elétrica, obrigam ao reforço e ao investimento dessa infraestrutura para garantir o seu correto funcionamento.

Com a implementação de soluções de armazenamento de energia, em apoio a postos de carregamento de veículos elétricos, o crescimento da mobilidade elétrica é possível sem necessidade de reforço da infraestrutura e, se associado a sistemas de produção solar fotovoltaica, pode, inclusive, reduzir as exigências sobre a rede.

### ***Palavras-Chave***

Armazenamento de Energia, Baterias, Energia Renovável, Regulação de Frequência, BESS, VE.



## *Abstract*

This paper aims to highlight the importance of, today and in the future, the integration of battery systems in the electrical grid for energy storage, referring to the main advantages of its application, namely as support for Electric Mobility.

Energy storage systems, in addition to taking a step towards energy autonomy by storing electricity for times when it is not being produced, also have the advantage of mitigating price and power variations that are dependent on weather conditions (sun, wind, or water in the dams).

In renewable energy sources, especially in photovoltaics, due to their intermittent production characteristics, energy storage will be crucial for the consumption of photovoltaic energy to take off from the current residual fringe (between 1% and 2.5% in present).

Electric mobility is also today an undeniable growth sector and, with it, new demands on the current electrical distribution infrastructure, will force the reinforcement and investment of this infrastructure to ensure its correct functioning.

By implementing energy storage solutions in support of electric vehicle charging stations, the growth of electric mobility is possible without the need for infrastructure reinforcement and, if combined with photovoltaic solar production systems, can even reduce network requirements.

### ***Keywords***

Energy Storage, Batteries, Renewable Energy, Frequency Regulation, BESS, EV.



# Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ACRÓNIMOS</b> .....	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO .....	1
1.2. OBJECTIVOS .....	3
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	3
<b>2. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA</b> .....	<b>7</b>
2.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO .....	7
2.2. ESTADO DA ARTE .....	8
2.3. PRINCIPAIS VANTAGENS E BENEFÍCIOS .....	19
2.4. PRINCIPAIS APLICAÇÕES .....	22
<b>3. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA</b> .....	<b>31</b>
3.1. SISTEMA BESS- DEMOCRAT .....	32
3.2. BATTERY BLOCK .....	33
3.3. PCS BLOCK .....	35
3.4. ENERGY STORAGE CONTROLLER .....	39
3.5. ENERGY STORAGE MANAGER .....	40
<b>4. CASO DE ESTUDO</b> .....	<b>43</b>
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	44
4.2. CENÁRIOS MODELADOS .....	49
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>68</b>

<b>ANEXO A. TECNOLOGIAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA.....</b>	<b>70</b>
<b>ANEXO B. INVERSOR CARGADOR- CARACTERÍSTICAS.....</b>	<b>71</b>

## Índice de Figuras

Figura 1-Diagrama esquemático de uma pilha voltaica cobre–zinco.[5]	8
Figura 2-Representação esquemática de uma célula de íões de lítio.[6]	10
Figura 3-Esquema de funcionamento de uma bateria de fluxo redox.[8]	12
Figura 4-Esquema de produção/armazenamento/re-conversão de hidrogénio[3]	15
Figura 5-Volante de Inércia da <i>Beacon Power</i> [10]	16
Figura 6- Vista em corte da fundação do volante de inércia [3]	18
Figura 7-Sistema FESS 20 MW em <i>Hazle Township, Pensilvania</i> [10]	19
Figura 8- Exemplos de Serviços Auxiliares de apoio à rede elétrica [12]	25
Figura 9-Unidades contentorizadas <i>Battery Block + PCS Block</i> [13]	32
Figura 10- Layout exemplificativo de um <i>BESS Block</i> [14]	33
Figura 11- Exemplo de 2 componentes do <i>battery block</i>	34
Figura 12- Celas MT 15 kV do PCS block[13]	38
Figura 13- Transformador elevador (MT/BT) 15 kV/ 400 V [13]	38
Figura 14- Componentes do PCS block, inversor de baterias, UPS, Quadro AC e cabine de controlo[13]	39
Figura 15-Estações de Carregamento Ultra Rápido, HV-160	45
Figura 16- Inversor de Baterias Efacec 320 kW	46
Figura 17- Potência Contratada vs Potência Máx permitida	47

Figura 18- Cenário 1-Potência fornecida Rede vs Potência fornecida BESS	51
Figura 19- Cenário 1.1-Estado de carga do BESS ao fim de 30 minutos	51
Figura 20- Cenário 1.2-Estado de carga do BESS ao fim de 60 minutos	52
Figura 21- Cenário 1.3-Estado de carga do BESS ao fim de 90 minutos	53
Figura 22- Cenário 1.4-Estado de carga do BESS ao fim de 120 minutos	54
Figura 23- Cenário 1 - Estado de Carga do BESS- Período de Regeneração	55
Figura 24- Cenário 1 - Período de Regeneração do BESS (minutos)	55
Figura 25- Cenário 2 - Potência fornecida pelo BESS (kW)	57
Figura 26- Cenário 2.1-Estado de carga do BESS ao fim de 30 minutos	57
Figura 27- Cenário 2.2-Estado de carga do BESS ao fim de 60 minutos	58
Figura 28- Cenário 2.3-Estado de carga do BESS ao fim de 90 minutos	59
Figura 29- Cenário 2 - Estado de Carga do BESS- Período de Regeneração	60
Figura 30- Cenário 2 - Período de Regeneração do BESS (minutos)	60
Figura 31- Cenário 3.1 - Estado de Carga do BESS ao longo do dia	62
Figura 32- Cenário 3.2 - Estado de Carga do BESS ao longo do dia	63





## *Índice de Tabelas*

Tabela 1-Tecnologias de armazenamento de energia[1]	8
Tabela 2- Especificações dos transformadores do BESS DEMOCRAT	36
Tabela 3- Pressuposto base de cada Cenário	48
Tabela 4- Condições Base de utilização dos PC-VE	49
Tabela 5- Cenário 3.1 - Condições de utilização dos PC-VE	62
Tabela 6- Cenário 3.2 - Condições de utilização do PC-VE 2	63



## *Acrónimos*

BESS - Battery Energy Storage System

BMS - Battery Management System

BT - Baixa Tensão

DER - Distributed Energy Resources (Recursos de Energia Distribuídos)

*DoD* - Depth of Discharge

ESS - Energy Storage Systems / Sistemas de Armazenamento de Energia

FERC - Comissão Federal de Regulamentação de Energia Americana

FESS - Flywheel energy storage systems

Li-Ion - Iões de Lítio

MBMS -Master Battery Management System

MIT - Massachusetts Institute of Technology

PC - Posto de Carregamento

PC-VE - Posto de Carregamento de Veículos Elétricos

PCS - Power Converter Station

PEM - Proton Exchange Membrane

PHEV - Veículos Elétricos Híbridos plug-in

RFB - Baterias de Fluxo Regenerativo Redox

T&D - Transmissão e Distribuição

SEE - Sistemas Elétricos de Energia

SoC - State of Charge

VE - Veículos Elétricos





# 1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo descreve-se o contexto em que o armazenamento de energia é analisado e quais os objetivos a que este trabalho se propõe com essa análise.

É apresentada a forma como o documento foi organizado e é feito um breve resumo de enquadramento sobre cada um dos capítulos.

## 1.1. ENQUADRAMENTO

Segundo o relatório do “MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change - 2018 Outlook”[2], a população mundial deverá crescer para 9.8 bilhões de pessoas até 2050 e a necessidade global de energia deverá dobrar aproximadamente durante o mesmo período. Simultaneamente, o setor de energia está à beira de uma grande transformação, à medida que mais *stakeholders* analisam a possibilidade de mudar dos tradicionais sistemas de energia centralizados baseados em energia fóssil em direção ao potencial da produção distribuída baseada em energia renovável. A penetração de tecnologias renováveis, especialmente a solar fotovoltaica, tem sido estimulada recentemente pela melhoria dos seus custos. No entanto a sua intermitência e variabilidade, reduzem a disponibilidade e induzem a instabilidade na rede. Portanto, o setor elétrico deve

considerar superar esses desafios se as energias renováveis representarem mais do que apenas uma parcela insignificante do mercado global de energia.[1]

Nesse caminho, prevê-se que a produção global de eletricidade vai aumentar substancialmente durante o período de 2015 a 2050, aumentando 62% em comparação com um aumento na produção total de energia primária de 32%, indicando uma tendência contínua de eletrificação da economia. Energias renováveis, gás natural, produção nuclear e bioenergia vão expandir. A produção com base em carvão quase desaparecerá nas regiões desenvolvidas, mas permanecerá como a base para o mundo como um todo, principalmente devido à expansão contínua do seu uso na China e na Índia apesar do crescimento mais rápido de outras fontes de produção nesses países. [2]

Atualmente, o consenso emergente é que o armazenamento de energia é a tecnologia essencial que remodelará o setor de energia, permitindo a adoção generalizada e a integração de redes de fontes renováveis de energia solar e eólica. Da mesma forma que as linhas de transmissão afetam onde a eletricidade é consumida, o armazenamento de energia influencia em que momento esta é consumida. [1] Com o armazenamento de energia passa a ser disponibilizado aos consumidores, comerciais e residenciais, a flexibilidade de se tornarem produtores de energia e de selecionarem o preço a que consumirão a eletricidade, e também as comercializadoras e a rede ganham agilidade para acomodar produtores e consumidores com comportamentos temporais díspares. Os reguladores e os investidores já estão a começar a reconhecer o valor do armazenamento de energia e estão já a preparar políticas e investimentos que irão estimular ainda mais essa área.

Os benefícios potenciais do armazenamento de energia têm chamado a atenção de muitas partes interessadas no setor de energia, levando a um crescimento significativo.[1] Prevê-se que as instalações associadas aos serviços auxiliares da rede cresçam aproximadamente 40x até 2024 (538,4 MW em 2014 para 20.800 MW em 2024) devido a fatores como integração renovável, consumos de energia, desativação de ativos e inovação tecnológica. Espera-se que o armazenamento de energia entre os utilizadores finais (comercial e residencial) tenha um crescimento ainda maior de 70x (172 MW em 2014 para 12.147 MW em 2024) devido, em grande parte, à tecnologia de rede inteligente. A gama de tecnologias

de armazenamento que alimentará essas taxas de crescimento exponencial abrangem os estados de energia e os princípios da física.[1]

## **1.2. OBJECTIVOS**

O objetivo deste trabalho de dissertação é o de destacar a importância do armazenamento de energia para os Sistemas Elétricos de Energia (SEE) apresentando os principais benefícios para o SEE. Será feita uma breve apresentação do estado atual de algumas das tecnologias de armazenamento de energia especialmente as de base eletroquímica e mecânica. Através do Caso de Estudo, o trabalho pretende encontrar os limites de operação de um sistema de armazenamento de energia (BESS) pré-dimensionado para dar apoio a 2 super-carregadores de veículos elétricos que, de outra forma, face às limitações da rede elétrica disponível, seriam inviáveis a sua implementação.

## **1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

A dissertação apresenta-se dividida em 5 capítulos. No seguimento desta introdução, no Capítulo 2, é feito um enquadramento histórico das soluções de armazenamento de energia e descritas as principais soluções tecnológicas de baterias que estão disponíveis no mercado ou que oferecem um bom potencial para desenvolvimento no âmbito da sua aplicação para os SEE.

No capítulo 3, é descrita uma solução de armazenamento de energia com base em baterias de íons de lítio. A solução apresentada tem por base o projeto DEMOCRAT da Efacec, que é constituído por um sistema BESS, designado na literatura anglo-saxónica por *Battery Energy Storage System* (BESS), que, com o objetivo de ser um laboratório real, apresenta várias funcionalidades.

No capítulo 4 é apresentado um caso de estudo de aplicação de um sistema BESS num posto de abastecimento de combustível, e cujas principais funcionalidades seriam os de conferir apoio a um sistema de carregamento de veículos elétricos composto por 2 supercarregadores. São apresentados vários cenários onde se pretendem encontrar os limites da solução BESS e validar esta solução como um meio fundamental para o alargamento sustentável da rede de postos de carregamento de veículos elétricos.

No último capítulo, o 5º, foram reunidas as principais conclusões deste trabalho e, com base nessas conclusões, feitas previsões de aplicações e desenvolvimentos futuros no âmbito do armazenamento de energia.

Este trabalho de dissertação contém ainda 2 anexos, um quadro com as Tecnologias de armazenamento de Energia e uma ficha técnica de um inversor de baterias





## 2. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

### 2.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

Em simultâneo com a descoberta da eletricidade o Homem sempre procurou formas efetivas de armazenar a energia para a usar em momentos em que esta fosse necessária. O nosso conhecimento hoje das forças de eletricidade e das tecnologias de armazenamento de energia representam o contributo de vários cientistas e inovadores, mas foi pela mão do químico Alessandro Volta, em 1800, que a primeira bateria foi criada.[3]

Na sua forma mais básica, a bateria não é mais do que um dispositivo composto por uma ou mais células eletroquímicas que convertem a energia química armazenada em energia elétrica. Cada célula da bateria contém um terminal positivo, ou cátodo, e um terminal negativo, ou ânodo. Os eletrólitos permitem que os iões se movam entre os elétrodos e os terminais, permitindo que a corrente flua para fora da bateria para realizar trabalho.[4]

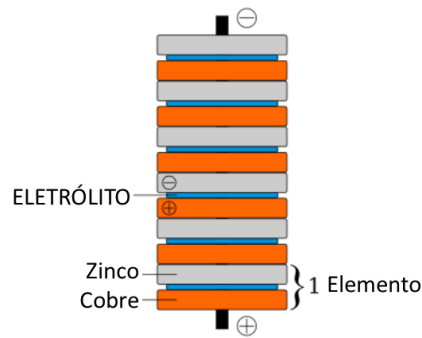


Figura 1-Diagrama esquemático de uma pilha voltaica cobre-zinco.[5]

No último século, a indústria de armazenamento de energia tem-se desenvolvido e adaptado às novas exigências e requisitos das novas tecnologias. A última década, com o crescimento da mobilidade elétrica, permitiu impulsionar os avanços na tecnologia e nos materiais, contribuindo para a fiabilidade dos sistemas de armazenamento e, com a economia de escala, reduzir dramaticamente os custos associados. A inovação contínua criou novas tecnologias, como condensadores eletroquímicos que podem ser carregados e descarregados simultaneamente e instantaneamente e proporcionam uma vida útil operacional quase ilimitada.[3]

## 2.2. ESTADO DA ARTE

Podemos dividir as tecnologias de armazenamento em 2 principais grupos conforme a tabela abaixo.

Tabela 1-Tecnologias de armazenamento de energia[1]

Kinetic energy			Potential energy		
Thermal technologies	Electrical technologies	Mechanical technologies	Electrochemical technologies	Chemical technologies	
Hot water	Supercapacitors	Flywheels	Pumped hydro	Lithium ion	Hydrogen
Molten salt	Superconducting magnetic energy		Compressed air energy	Lead acid	Synthetic natural gas
Phase change material				Redox flow	
				Sodium sulfur	

Apesar da grande diversidade de opções tecnológicas para armazenamento de energia, neste capítulo vamos focar apenas na descrição breve de algumas das tecnologias que se consideraram ter maior potencial para aplicação nos SEE e em associação a fontes de energia renováveis, especialmente as seguintes tecnologias de base eletroquímica, mecânica e elétrica.

- Iões de Lítio
- Baterias de Fluxo Regenerativo Redox
- Pilha de Combustível
- Volante de inércia

### **2.2.1. BATERIAS DE IÕES DE LÍTIO (LI-ION)**

As baterias de iões de lítio têm sido implementadas nas mais diversas aplicações de armazenamento de energia, desde pequenas capacidades de ampere-hora, em equipamentos eletrônicos como os telemóveis, a alguns quilowatt-hora, em sistemas residenciais, e até megawatts-hora, em instalações fotovoltaicas ou para prestação de serviços de apoio à rede elétrica.

#### Como funcionam

O termo "ião de lítio" refere-se não a um único par eletroquímico, mas a uma ampla variedade de químicas diferentes, todas caracterizadas pela transferência de iões de lítio entre os elétrodos durante as reações de carga e descarga. As células de iões de lítio não contêm lítio metálico; em vez disso, os iões são inseridos na estrutura de outros materiais, como óxidos ou fosfatos de metais litiados no elétrodo positivo (cátodo) e carbono (normalmente grafite) ou titanato de lítio no negativo (ânodo), com os dois elétrodos separados eletricamente do contacto direto um com o outro por um separador de membrana de polímero microporoso de 16-25 microns de espessura (normalmente polietileno), como mostrado na Figura 2. O separador poroso permite o transporte de iões de lítio entre os elétrodos negativo e positivo através do eletrólito contido nos poros do

elétrodo e eletrólito para permitir a reação eletroquímica que gera eletricidade a partir da célula da bateria durante as equações de descarga (1) – (3). [6]

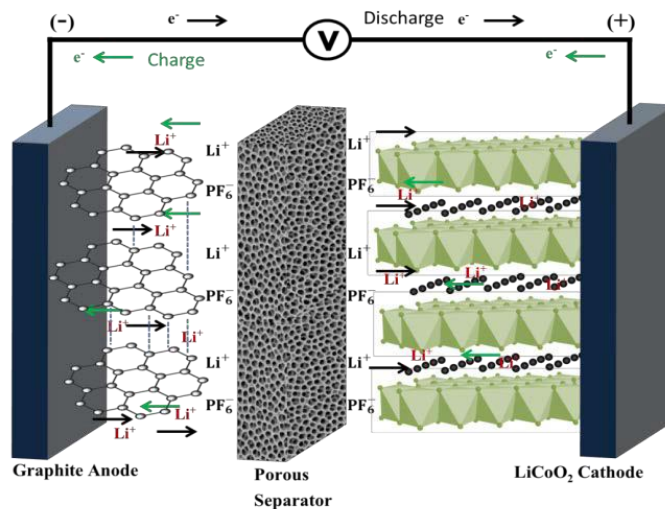
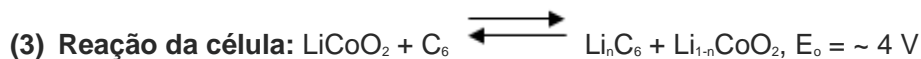
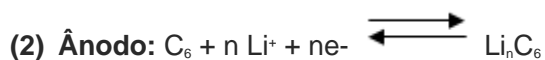
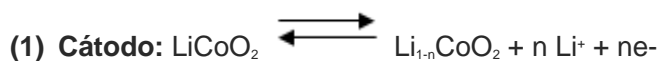


Figura 2-Representação esquemática de uma célula de íões de lítio.[6]

Fabricada no estado descarregado, a célula é ativada através do carregamento durante o qual o cátodo é oxidado (equação (1) para o cátodo LiCoO<sub>2</sub>) para produzir Li<sup>+</sup> e elétrons (e<sup>-</sup>). O Li<sup>+</sup> viaja através do eletrólito (composto de LiPF<sub>6</sub> em solvente orgânico) e é inserido no ânodo (equação (2) para ânodo de grafite) junto com os elétrons que chegam através do circuito externo. A reação celular geral é mostrada na equação (3). Os processos opostos ocorrem durante a descarga.



As células de íões de lítio podem ser produzidas no formato cilíndrico ou prismático (retangular). Essas células são tipicamente incorporadas em módulos multicelulares em séries e/ou matrizes paralelas, e os módulos são conectados juntos para formar uma sequência de baterias na tensão necessária, com cada sequência sendo controlada por um sistema de gestão de baterias. Os subsistemas eletrônicos são um recurso importante para as baterias de íões de lítio, que carecem da capacidade de tecnologias aquosas (por

exemplo, baterias de chumbo-ácido) para dissipar a sobrecarga de energia. As características de segurança das baterias de íões de lítio são determinadas pelos atributos do design do sistema, incluindo as características mecânicas e térmicas, eletrônica e comunicações e algoritmos de controle - independentemente da eletroquímica.

### **2.2.2. BATERIA DE FLUXO REGENERATIVO REDOX**

As baterias de fluxo regenerativo redox (RFB) representam uma classe de dispositivos de armazenamento de energia eletroquímica. O nome "redox" refere-se a reações químicas de redução e oxidação que ocorrem na RFB para armazenar energia em soluções de eletrólitos líquidos que fluem através de uma bateria de células eletroquímicas durante a carga e descarga.[3]

Neste tipo de baterias podem ser usados vários tipos de eletrólitos, mas usando o bromo como elemento comum. Entre alguns eletrólitos podem-se destacar alguns como sódio (NaBr), zinco (ZnBr), polisulfito de bromo (NaS-NaBr) ou vanádio (VBr). Neste tipo de sistema, as unidades de armazenamento são separadas da unidade onde ocorre a reação química, que leva a uma separação entre potência e capacidade. A potência disponível é determinada pelo tamanho da pilha, variando com a área de superfície dos elétrodos e do número de células unitárias. A capacidade disponível, por sua vez, é determinada pelo volume de eletrólito no estado de carga. Além disso, tanto os reagentes como os produtos da reação são solúveis, pelo que não existem fatores que limitem a associação às alterações eletroquímicas.[7]

Durante a descarga, um elétron é libertado através de uma reação de oxidação de um estado de alto potencial químico no lado negativo ou ânodo da bateria. O elétron move-se através de um circuito externo para realizar um trabalho útil. Finalmente, o elétron é aceite por uma reação de redução num estado de potencial químico mais baixo no lado positivo ou cátodo da bateria. A direção da corrente e as reações químicas invertem-se durante o carregamento.[3] A Figura 3 apresenta o modo de funcionamento da bateria de fluxo regenerativo e os seus componentes.

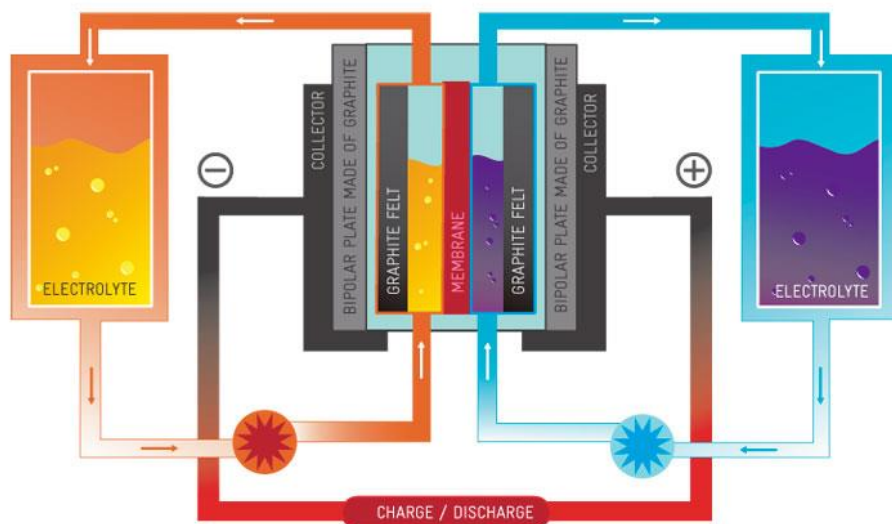


Figura 3-Esquema de funcionamento de uma bateria de fluxo redox.[8]

A diferença total no potencial químico entre os estados químicos dos elementos ativos nos dois lados da bateria determina a força eletromotriz (fem ou tensão) gerada em cada célula da bateria. A voltagem desenvolvida pela RFB é específica para as espécies químicas envolvidas nas reações e o número de células ligadas em série. A corrente desenvolvida pela bateria é determinada pelo número de átomos ou moléculas das espécies químicas ativas que reagem dentro das células em função do tempo. A energia fornecida pela RFB é o produto da corrente total e da tensão total desenvolvida nas células eletroquímicas. A quantidade de energia armazenada na RFB é determinada pela quantidade total de espécies químicas ativas disponíveis no volume de solução eletrolítica presente no sistema.

### Como funcionam as baterias de fluxo Redox [3]

A separação de potência e energia é uma distinção importante das RFBs, em comparação com outros sistemas de armazenamento eletroquímico. Como descrito acima, a energia do sistema é armazenada no volume de eletrólito que pode, fácil e economicamente, situar-se na faixa do kilowatt-hora a dezenas de megawatt-hora, dependendo do tamanho dos tanques de armazenamento. A capacidade de energia do sistema é determinada pelo tamanho da pilha de células eletroquímicas. A quantidade de eletrólito que flui na pilha eletroquímica a qualquer momento, é uma pequena percentagem da quantidade total de eletrólito presente (para as classificações de energia correspondentes à descarga na

potência nominal de duas a oito horas). O fluxo pode ser facilmente interrompido durante uma condição de falha. Como resultado, a vulnerabilidade do sistema à liberação descontrolada de energia no caso de RFBs é limitada pela arquitetura do sistema a alguns por cento da energia total armazenada. Esse recurso contrasta com as arquiteturas de armazenamento de células integradas e empacotadas (ácido-chumbo, NAS, íões de lítio), onde a energia total do sistema está sempre ligada e disponível para descarga.

A separação de potência e energia também fornece flexibilidade na aplicação de RFBs. A capacidade de energia (tamanho da pilha) pode ser diretamente adaptada à carga ou ao ativo de geração associado. A capacidade de armazenamento (tamanho dos tanques de armazenamento) pode ser adaptada de forma independente às necessidades de armazenamento de energia da aplicação específica. Dessa forma, as RFBs podem fornecer economicamente um sistema de armazenamento otimizado para cada aplicativo. Por outro lado, a proporção de potência / energia é fixada para células integradas no momento do design e fabricação das células. Economias de escala na produção de células limitam o número prático de diferentes modelos de células disponíveis. Portanto, os aplicativos de armazenamento com células integradas geralmente terão um excesso de capacidade ou capacidade de energia.

Os RFBs são adequados para aplicações com requisitos de energia na faixa de dezenas de quilowatts a dezenas de megawatts e requisitos de armazenamento de energia na faixa de 500 quilowatt-hora a centenas de megawatt-hora. Os RFBs podem ser a opção mais econômica nessa faixa, porque os tanques de armazenamento e os controles de fluxo são fáceis e econômicos de dimensionar, e as pilhas eletroquímicas podem ter unidades repetidas com potências entre dezenas e centenas de quilowatts.

As baterias de fluxo Redox oferecem um meio econômico e de baixa vulnerabilidade para armazenar energia elétrica em projetos de grande escala. As baterias de fluxo Redox também oferecem maior flexibilidade para adequar independentemente aos requisitos de potência e de energia para uma determinada aplicação do que outros meios eletroquímicos para armazenar energia elétrica. As baterias de fluxo Redox são adequadas para aplicações de armazenamento de energia com potências de dezenas de kW a dezenas de MW e durações de armazenamento de duas a 10 horas. [3]

### 2.2.3. PILHA DE COMBUSTÍVEL - HIDROGÉNIO

O hidrogénio é reconhecido como portador da energia mais promissora no futuro.[7]

A tecnologia de armazenamento, designada na literatura anglo-saxónica por *fuel cell*, é caracterizada pela ocorrência de dois processos: a eletrólise e a produção de energia. [9]

A eletricidade pode ser convertida em hidrogénio por eletrólise. O hidrogénio pode então ser armazenado e eventualmente re-eletrificado. Hoje, a eficiência é menor do que outras tecnologias de armazenamento, mas, apesar dessa baixa eficiência, o interesse no armazenamento de energia de hidrogénio está a crescer devido à capacidade de armazenamento ser muito maior comparativamente com baterias (pequena escala) ou hidroelétricas e CAES<sup>1</sup> (grande escala).

A eletrólise alcalina é uma tecnologia madura para grandes sistemas, enquanto os eletrolisadores PEM (*Proton Exchange Membrane*) são mais flexíveis e podem ser usados para pequenas soluções descentralizadas. A eficiência de conversão para ambas as tecnologias é de cerca de 65% a 70% (valor de baixas temperaturas). Atualmente, os eletrolisadores de alta temperatura estão em desenvolvimento e podem representar uma alternativa muito eficiente aos sistemas PEM e alcalinos, com eficiência de até 90%. [3]

#### Armazenamento de Hidrogénio

Pequenas quantidades de hidrogénio (até alguns MWh) podem ser armazenadas em vasos pressurizados, ou hidretos ou nanotubos de metais sólidos podem armazenar o hidrogénio com uma densidade muito alta. Quantidades muito grandes de hidrogénio podem ser armazenadas em cavernas de sal subterrâneas construídas de até 500.000 metros cúbicos a 2.900 psi, o que significaria cerca de 100 GWh de eletricidade armazenada. Dessa maneira, períodos mais longos de falhas ou excesso de produção de energia eólica /

---

<sup>1</sup> CAES- Compressed Air Energy Storage, é uma tecnologia que usa a eletricidade para comprimir e armazenar ar em reservatórios para, quando necessário, ser libertado através de uma turbina de gás natural e reconverter a energia potencial elástica do ar em energia elétrica. [3]

fotovoltaica podem ser compensados. Mesmo equilibrar variações sazonais pode ser possível.

### Re-eletrificação do Hidrogénio

O hidrogénio pode ser re-eletrificado em células de combustível com eficiência de até 50% ou alternadamente queimado em centrais de gás de ciclo combinado (eficiência de até 60%).

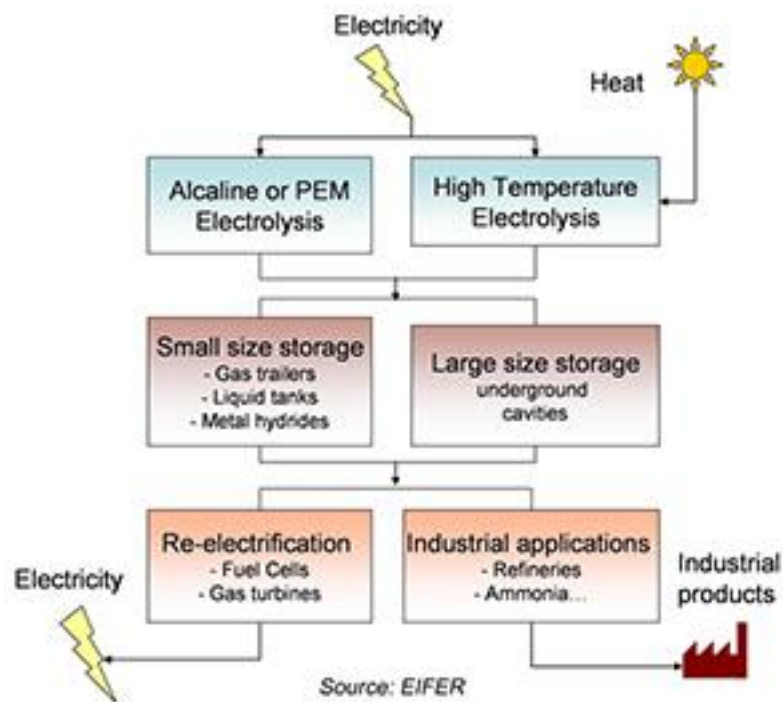


Figura 4-Esquema de produção/armazenamento/re-conversão de hidrogénio[3]

### 2.2.4. VOLANTE DE INÉRCIA (*FLYWHEEL*)

Estes sistemas de armazenamento de energia, designados por *flywheel* na literatura anglo-saxónica, são sistemas mecânicos que aproveitam as forças cinéticas ou gravitacionais para armazenar a energia fornecida. Embora a física dos sistemas mecânicos seja bastante simples, as tecnologias que permitem o uso eficiente e eficaz dessas forças são particularmente avançadas. A utilização de materiais de alta tecnologia, sistemas de controlo por computador e um design inovador tornam esses sistemas viáveis em várias aplicações.[3]

O volante de inércia é essencialmente uma bateria mecânica que armazena energia cinética numa massa rotativa. Através de sistemas eletrônicos avançados e um motor/gerador convertem essa energia cinética em energia elétrica, disponibilizando-a instantaneamente quando necessário. Os sistemas são modulares e podem ser configurados para atender às necessidades de potência de uma variedade de aplicações, desde 100 kW a sistemas de vários MW.[10]



Figura 5-Volante de Inércia da *Beacon Power*[10]

Um volante de inércia é recarregado usando o motor para aumentar a sua velocidade de rotação mais uma vez.[3]

Os volantes de inércia são tradicionalmente feitos de aço e giram em rolamentos convencionais; estes são geralmente limitados a uma taxa de revolução de alguns milhares de RPM. Os projetos de volante de inércia mais avançados são feitos de materiais de fibra de carbono, armazenados em vácuo para reduzir o atrito e utilizam a levitação magnética em vez de rolamentos convencionais, permitindo que eles girem em velocidades de até 60.000 RPM.[10]

A tecnologia do volante de inércia possui muitas propriedades benéficas que permitem melhorar a atual rede elétrica. Um volante de inércia pode utilizar a energia de fontes de energia intermitentes (por exemplo, energias solar fotovoltaica e eólica) ao longo do tempo

e disponibilizar um fornecimento contínuo de energia ininterrupta à rede. Os volantes de inércia também são capazes de responder de forma instantânea aos sinais da rede, fornecendo melhorias na regulação da frequência e na qualidade da eletricidade.[3]

### Como funcionam os volantes de inércia [3]

Os sistemas de armazenamento de energia com base no volante de inércia, em inglês, *Flywheel energy storage systems* (FESS), aplicam energia cinética armazenada numa massa rotativa com perdas por atrito muito baixas. A entrada de energia elétrica acelera a massa para acelerar através de um gerador de motor integrado. A energia é descarregada consumindo a energia cinética usando o mesmo motor-gerador. A quantidade de energia que pode ser armazenada é proporcional ao momento de inércia do objeto vezes o quadrado da sua velocidade angular. Para otimizar a relação energia/massa, o volante deve girar na velocidade máxima possível. Objetos de rotação rápida estão sujeitos a forças centrífugas significativas, no entanto, embora os materiais densos possam armazenar mais energia, eles também estão sujeitos a uma força centrífuga mais alta e, portanto, podem ser mais propensos a falhas em velocidades de rotação mais baixas do que os materiais de baixa densidade. Portanto, a resistência à tração é mais importante que a densidade do material. Os volantes de inércia de baixa velocidade são fabricados com aço e giram a taxas de até 10.000 PRM.[3]

O FESS mais avançado alcança uma densidade de energia significativa, com alta eficiência e baixas perdas em *standby* (por períodos de muitos minutos a várias horas), utilizando quatro características principais:

- 1) massa rotativa feita de resinas de fibra de vidro ou materiais de base polímera com alta resistência ao peso;
- 2) uma massa que opera no vácuo para minimizar as perdas por fricção do ar;
- 3) uma massa que gira em alta frequência; e
- 4) tecnologia de suporte sem qualquer contacto com as partes girantes com base em chumaceiras eletromagnéticas (baseadas em ímanes permanentes) para acomodar a alta velocidade de rotação.

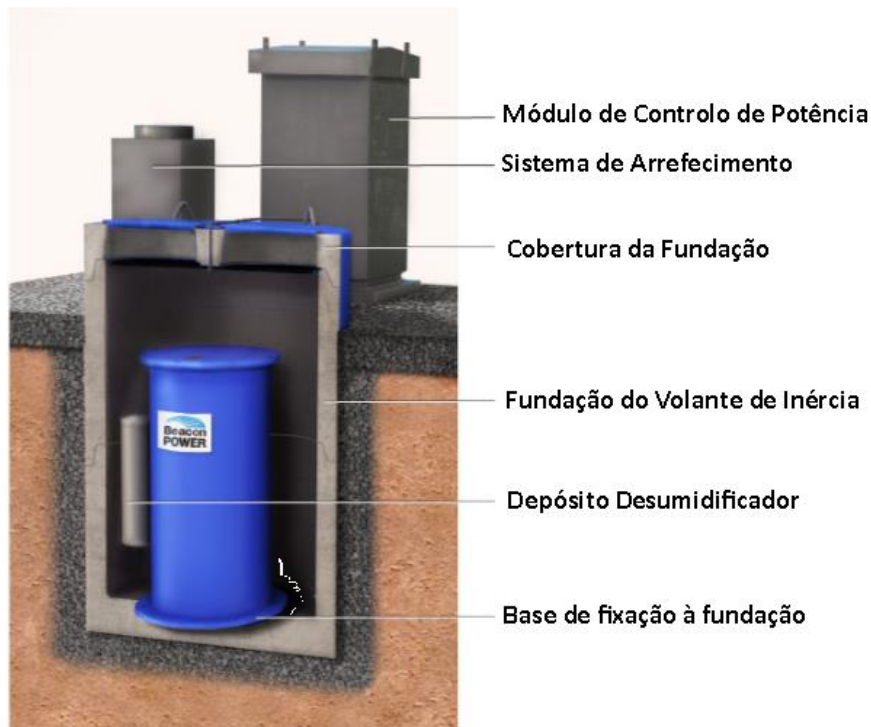


Figura 6- Vista em corte da fundação do volante de inércia [3]

Os FESS mais avançados operam a uma frequência de rotação superior a 100.000 RPM com velocidades de ponta superiores a 1000 m/s. Estes FESS deverão ser usados preferencialmente em aplicações de alta potência e baixa energia que exigem muitos ciclos.

Comparativamente com os sistemas de armazenamento de base química, os volantes de inércia têm também várias vantagens. Têm alta densidade de energia e durabilidade substancial, permitindo-lhes fazer ciclos com frequência, sem afetar o desempenho. Têm também taxas de resposta muito rápidas. De facto, eles podem passar da descarga total para a carga completa em alguns segundos ou menos. Os sistemas de armazenamento de energia com base no volante de inércia (FESS) são cada vez mais importantes para aplicações de alta potência e de energia relativamente baixa. Eles são especialmente interessantes para aplicações que exigem ciclos de carga/descarga frequentes, uma vez que este tipo de exigência contribui para uma redução de vida dos sistemas de base química quando usados extensivamente (ou seja, os FESS podem sofrer muitos ciclos de carga/descarga parciais e totais com um desgaste pouco significativo por ciclo).[3]

O FESS é especialmente adequado para várias aplicações, principalmente:

- para garantir fiabilidade e qualidade da energia nos SEE,
- através do apoio durante o período de arranque de grupos geradores de backup a longo prazo,
- resposta rápida para controlo de frequência.
- O FESS também pode ser importante como subsistema em veículos híbridos que param e arrancam frequentemente como componente do sistema de travões regenerativos.[3]



Figura 7-Sistema FESS 20 MW em Hazle Township, Pensilvania[10]

### **2.3. PRINCIPAIS VANTAGENS E BENEFÍCIOS**

O investimento em sistemas de armazenamento de energia evolui em paralelo com a rede elétrica, criando benefícios a longo prazo e fiabilidade ao longo dos anos.

O armazenamento de energia é assim um centro crítico para toda a rede elétrica. Aumentando a contribuição dos recursos de energia eólica, solar e hídrica, até aos combustíveis nucleares e fósseis, às necessidades de serviços secundários e a eficiência de todo o sistema. Pode atuar como um centro de produção, transmissão ou distribuição.[3]

Os benefícios potenciais oferecidos pelas tecnologias de armazenamento de energia são também valorizados pelas organizações tendo em conta a sua contribuição para o aumento das receitas ou a redução de custos - tanto de capital quanto de despesas operacionais. Além disso, o armazenamento oferece outros benefícios menos quantificáveis, como a integração de energias renováveis e a redução das emissões de gases de efeito estufa. Embora esses “benefícios sociais” sejam importantes, é difícil racionalizar um investimento baseado apenas em externalidades. Assim, a implementação de tecnologias de armazenamento de energia vai depender da dimensão com que uma tecnologia pode fornecer um serviço valioso a um custo atraente comparativamente com outras alternativas.[1]

### **2.3.1.       POUPANÇA**

O armazenamento de energia pode economizar custos operacionais na alimentação da rede, além de economizar dinheiro para os consumidores de eletricidade quando instalam sistemas de armazenamento de energia nas suas habitações e empresas. O armazenamento de energia pode reduzir o custo associado ao fornecimento dos serviços de regulação de frequência e reserva girante, além de compensar os custos para os consumidores, armazenando energia de baixo custo e utilizando-a mais tarde, durante períodos de pico com custos mais altos de eletricidade.

Embora Portugal seja um país com uma continuidade do serviço elevada, os sistemas de armazenamento de energia podem ser importantes e fulcrais durante as breves interrupções que a rede elétrica possa ter. Através dos sistemas de armazenamento de energia as empresas podem evitar que as interrupções sejam dispendiosas, podendo dar continuidade à sua atividade normal. No setor doméstico, os consumidores podem também ser poupados do inconveniente de não ter eletricidade.[3]

### **2.3.2.       MELHORAR A FIABILIDADE & RESILIÊNCIA**

O armazenamento de energia pode fornecer energia de backup durante interrupções. O mesmo conceito que se aplica à energia de backup de um dispositivo individual (por exemplo, um alarme de fumaça que se conecta a uma casa, mas também possui bateria de reserva), pode ser ampliado para um edifício inteiro ou mesmo para a rede em geral.[11]

O armazenamento fornece flexibilidade para a rede, para garantir energia ininterrupta aos consumidores, quando e onde eles precisarem. Essa flexibilidade é fundamental para a confiabilidade e a resiliência. À medida que o custo das interrupções continua a aumentar, o valor da confiabilidade aprimorada e das melhorias na resiliência também aumenta.[3]

### **2.3.3. INTEGRAR VÁRIOS RECURSOS**

O armazenamento de energia pode ajudar a aumentar a contribuição dos recursos variáveis ou intermitentes, como a energia solar e eólica, armazenando o excesso de energia e fornecendo-a quando o oposto está a acontecer.

Mas o armazenamento de energia pode também contribuir para um fornecimento de eletricidade mais eficiente para recursos que tenham uma carga base inflexível. Quando o consumo muda rapidamente e é necessária flexibilidade, o armazenamento de energia pode injetar ou extrair eletricidade, conforme necessário, para corresponder exatamente à carga - onde e quando for necessário.

O armazenamento de energia é uma tecnologia capacitadora. Nos momentos em que o sol e/ou o vento não estão disponíveis, os sistemas de armazenamento de energia podem estar lá para dar o apoio. Quando as mudanças de consumos mudam e os recursos que disponibilizam a potência de base não conseguem reagir com rapidez suficiente, o armazenamento de energia pode dar esse apoio.[3]

### **2.3.4. REDUZIR O IMPACTE AMBIENTAL**

Do ponto de vista ambiental e do não desperdício de energia, o armazenamento de energia permite que a eletricidade seja armazenada para ser utilizada mais tarde, quando e onde for mais necessária. Isso cria eficiências e recursos para a rede elétrica - incluindo a capacidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Ao introduzir mais flexibilidade na rede, o armazenamento de energia pode ajudar a integrar mais recursos solares, eólicos e de energia distribuída. Também pode melhorar a eficiência da rede - aumentando o fator de capacidade dos recursos existentes - e compensar a necessidade de construir novas centrais de energia que possam ser mais poluidoras.

À medida que o mix de fornecimento de energia fica mais limpo com a utilização de recursos com baixo ou sem carbono, o armazenamento de energia ajuda esse mix de fornecimento a evoluir com mais facilidade e fiabilidade.[3]

## **2.4. PRINCIPAIS APLICAÇÕES**

O armazenamento de energia pode acrescentar mais valor à rede elétrica através de uma vasta variedade de aplicações. Por exemplo, como um recurso de produção, o armazenamento melhora o sistema, fornecendo capacidade flexível adicional; como recurso de rede, traz flexibilidade operacional e melhora a fiabilidade do sistema de transmissão e distribuição (T&D); e, estando instalado antes do contador, melhora a eficiência e reduz os custos. No entanto, o verdadeiro valor do armazenamento de energia está no potencial de fornecer cada um desses serviços por meio de um único recurso, através de um conjunto de várias aplicações.[12]

Embora muitas novas tecnologias de armazenamento de energia tenham surgido recentemente, neste trabalho optou-se por apresentar as principais aplicações em que o armazenamento de energia pode fornecer melhor valor.

### **2.4.1. ATUAR COMO RECURSO DE PRODUÇÃO**

Como recurso de produção, o armazenamento de energia pode absorver energia durante os ciclos de carregamento e libertar essa energia de volta para a rede mais tarde, quando for necessário ou mais benéfico para o sistema. Recursos de longo prazo, como baterias de fluxo ou bombagem hidroelétrica, podem atuar como capacidade adicional que fornece energia de volta à rede quando necessário para corresponder à carga ou aumentar a produção existente.

#### *Time Shifting / Arbitragem da Produção*

O *time shifting* funciona da seguinte forma, produzir ou comprar eletricidade em momentos em que as taxas são baixas e armazenar essa eletricidade até que possa ser usada ou vendida posteriormente. Isso cria oportunidades de arbitragem para os

produtores que desejam vender eletricidade no momento em que as tarifas são mais altas, reduzindo assim os custos e / ou maximizando as receitas.[12]

#### Intermitência da capacidade renovável

Os sistemas de armazenamento de energia podem armazenar a energia não aproveitável durante períodos de alta disponibilidade de recursos renováveis e descarregam quando os recursos renováveis são baixos, maximizando a disponibilidade de energia renovável na rede. Este facto atenua a intermitência das renováveis e reduz a necessidade de utilizar outros recursos potencialmente mais caros, como centrais de gás.

Por fim, em algumas áreas, os projetistas dos sistemas da rede, exigem capacidade de reserva para fazer backup da produção renovável. Nestes casos o armazenamento de energia pode reduzir ou eliminar esses requisitos, realçando ainda mais a importância da energia renovável, aumentando o contributo das energias renováveis no mix de fornecimento.[12]

#### **2.4.2. ATUAR COMO RECURSO DE REDE**

Como recurso da rede, o armazenamento de energia agrega valor aos sistemas de T&D, permitindo que os concessionários das redes de T&D adiem eventuais investimentos para reforço das redes; atenuação do congestionamento da rede; e prestação de serviços auxiliares, como a regulação de frequência, o suporte de tensão, e potência de reserva para apoio à estabilização da rede.

#### Adiamento de Investimentos na Rede Elétrica

Nos casos em que a infraestrutura existente está a chegar ao seu limite de capacidade, o armazenamento de energia pode ser usado para atrasar (ou, em alguns casos, adiar completamente) eventuais atualizações da infraestrutura que possam ser onerosas e que seriam necessárias para manter a capacidade do sistema em satisfazer os requisitos de carga. Assim, em vez de substituir ou reforçar as linhas, o armazenamento pode atuar como um amortecedor, libertando energia quando as linhas estão próximas dos limites de

capacidade, reduzindo assim a quantidade de energia necessária para fluir através da própria linha.

Além da economia imediata de custos com o atrasar das atualizações da infraestrutura, esperar para fazer investimentos significativos na rede permite também que os projetistas obtenham melhor clareza em relação ao crescimento futuro da carga, o que reduz o risco e melhora a eficácia dos futuros investimentos na rede.

#### Atenuação do impacto do congestionamento das linhas de transmissão

Devido ao difícil acesso e localização de alguns troços das redes de transmissão, estas, em algumas partes do país podem ficar congestionadas, conduzindo a taxas de acesso altas e ao congestionamento nos momentos em que a rede está a ser mais solicitada.

O armazenamento de energia, nestes casos, pode ser usado para mitigar os impactos do congestionamento da transmissão, colocando ativos de armazenamento a jusante dos pontos de estrangulamento para armazenar eletricidade nos momentos de menor consumo e para libertação nos horários de pico. Isso reduz a necessidade de haver excesso de energia a ter que fluir através da linha congestionada, minimizando os requisitos de capacidade de transmissão e possíveis taxas de congestionamento.[12]

#### Serviços Auxiliares

Os sistemas de armazenamento de energia (ESS) são referidos como proporcionando benefícios na operação das redes, quando utilizados como sistemas auxiliares da rede de distribuição.[12]

De acordo com a Comissão Federal de Regulamentação de Energia americana (FERC), os serviços auxiliares são definidos como funções executadas por equipamentos elétricos de produção, transmissão, sistemas de controle, e sistema de distribuição e pessoas para suporte dos serviços básicos da capacidade de produção, fornecimento de energia e potência. Complementa ainda a definição de serviços auxiliares como aqueles serviços necessários para suportar a transmissão de energia elétrica desde o produtor até ao

consumidor de forma a manter a fiabilidade de todas as operações dentro do sistema interconectado de transmissão. O exemplo abaixo apresenta a regulação de frequência, o controlo de tensão, as reservas e os serviços de controlo de carga.[12]

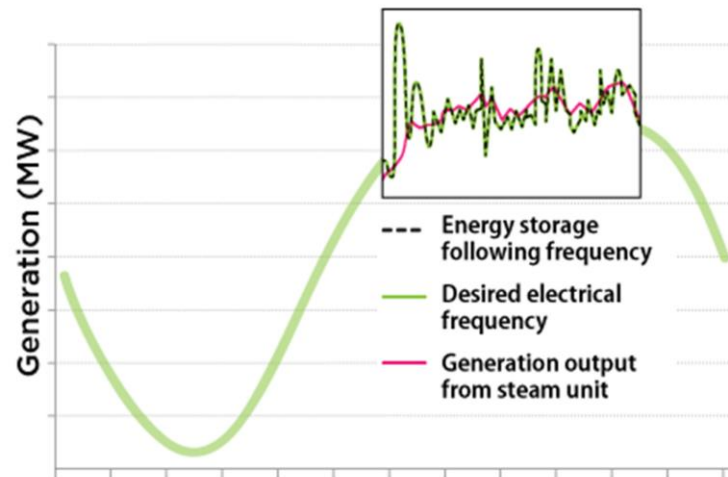


Figura 8- Exemplos de Serviços Auxiliares de apoio à rede elétrica [12]

A regulação de frequência refere-se à necessidade de reagir a mudanças de curto prazo na oferta e no consumo para manter a frequência da rede dentro dos seus limites operacionais. Manter a frequência da eletricidade na rede é essencial para garantir que ela permaneça dentro dos limites necessários para manter a estabilidade do sistema. A frequência do sistema quando fica muito alta ou demasiado baixa pode danificar equipamentos e levar a *blackouts* ou outras falhas na rede.

Os ESS, como baterias e volantes de inércia, são capazes de responder às necessidades de frequência em segundos e com um grau de precisão consideravelmente mais alto do que muitas fontes tradicionais de produção.

O controlo de carga refere-se à capacidade de produção que altera a potência de saída em resposta a mudanças na carga, como forma de gerir as alterações entre a oferta e consumo. É semelhante à regulação de frequência, mas, o controlo de carga atua num período mais longo, com o objetivo de igualar a produção à carga.[12]

Os ESS fornecem serviços de controlo da carga libertando energia para o sistema quando a carga aumenta. No entanto, quando a carga diminui, o armazenamento pode acompanhar a redução da carga e agir de duas formas:

- deixando de libertar energia no sistema (semelhante a um recurso tradicional) ou
- absorvendo o excesso de produção enquanto estiver no modo de carregamento.

Ao atuar como carga, o armazenamento de energia permite que os centros de produção convencionais possam operar com a máxima eficiência.

A rede elétrica depende sempre de reservas de *backup* para fornecer capacidade quando os recursos de produção regulares se encontram inesperadamente indisponíveis. Nessas situações o armazenamento de energia pode ser usado da mesma forma como todos os tipos de capacidade de reserva, reduzindo, adiando ou eliminando novamente a necessidade de produção adicional.

Em vez de ter que estar online, operacional e sincronizado com a rede, o armazenamento de energia simplesmente precisa de estar carregado e disponível. Além disso, devido à rápida taxa de resposta, o armazenamento, ele pode reagir quase instantaneamente para controlar sinais.

O controle de tensão refere-se aos ativos que fornecem energia reativa à rede para manter a tensão dentro da faixa especificada. Assim como a frequência da rede deve ser regulada para garantir que ela permaneça dentro de uma faixa estreita, a tensão da rede também deve ser controlada para garantir que ela permaneça o mais próximo possível da tensão nominal.[12]

O armazenamento de energia desempenha outro papel importante, disponibilizando a capacidade adicional para fornecer energia reativa à rede quando necessário.

#### Capacidade de Fornecimento de Energia e Cobertura de picos de potência (peak-shaving)

O armazenamento de energia pode ser usado para suportar os requisitos de capacidade de pico, armazenando energia durante períodos de baixo consumo e atuando como um recurso de pico quando o consumo é alto. Utilizado dessa maneira, o armazenamento pode reduzir, adiar ou eliminar a necessidade de criar capacidade de produção adicional (ou, até certo ponto, capacidade de transmissão e distribuição).[12]

#### Micro Redes

Algumas microrredes são projetadas para aproveitar as energias renováveis para as suas necessidades de consumo. À medida que a rede elétrica atinge níveis mais altos de penetração de energia renovável, aumenta também a necessidade de ter uma fonte adicional de energia para manter a estabilidade da rede. Na rede global, essa função é executada pela concessionária da rede, mas numa microrrede a funcionar numa configuração em ilha, a intermitência dos recursos renováveis exigiria uma unidade de produção adicional para compensar a intermitência ou a instabilidade causada pela variação de tensão ou frequência.

Nestas situações, o armazenamento de energia pode ser um suporte para as microrredes armazenando energia e usando-a para fornecer suporte de tensão e frequência. Além disso, o armazenamento pode oferecer benefícios, incluindo suavizar o impacto da produção variável e o deslocamento da produção solar e eólica, para atender ao consumo de pico.

#### **2.4.3. APOIO A POSTOS DE CARREGAMENTO DE VE**

Os veículos elétricos (VEs) estão a tornar-se cada vez mais comuns nas ruas e na rede elétrica.

Embora uma grande parte do carregamento desses veículos ocorra à noite e durante os finais de semana, quando o valor e o preço da eletricidade são baixos ou relativamente baixos, e enquanto os veículos de transporte de passageiros não são necessários ou usados, alguns VEs precisam carregar durante o dia e mesmo durante os períodos de pico de consumo em que a rede já está a fornecer a quantidade máxima de energia.

Se o carregamento dos VE ocorrer em partes da rede que não possuem capacidade suficiente para acomodar as necessidades extras de energia, existem duas alternativas básicas. Primeiro, a concessionária da rede teria de aumentar ou reforçar a infraestrutura de geração, transmissão e distribuição (GT&D) para adicionar a capacidade necessária. A segunda alternativa é instalar recursos de energia distribuídos (DERs), incluindo produção e armazenamento distribuídos. Para alcançar o efeito desejado, a capacidade do DER deve ser instalada eletricamente a jusante dos pontos de congestionamento para satisfazer localmente o consumo adicional no pico.[3]

No entanto, os VEs também podem ser um recurso de eletricidade. Quando ligados, as baterias desses veículos podem fornecer muitos dos serviços de rede que os sistemas estacionários de armazenamento de energia podem fornecer e também podem ser geridos ativamente para reduzir os impactos que os seus carregamentos podem ter na rede elétrica - uma capacidade cada vez mais importante, à medida que mais e mais VEs estão ligados à rede.[3]

Assim, dada a proliferação esperada de VEs, há um foco crescente das empresas de serviços públicos, reguladores, formuladores de políticas e legisladores no desenvolvimento de planos para acomodar o consumo elétrico adicional que ocorrerá durante os horários de pico.

Uma alternativa à resposta do sistema convencional de T&D é adicionar o armazenamento distribuído de eletricidade nas, ou próximo, estações de carregamento de EV. Dessa forma é possível reduzir a capacidade da rede de T&D necessária no pico para responder à parcela de carregamento dos VEs. Além disso, o sistema de armazenamento é carregado nos períodos em que a energia é mais barata e fora das horas de pico, quando o uso de centrais de produção a combustível bem como as emissões atmosféricas são mais baixas (por quilowatt-hora).[3]

Uma rede mais inteligente e responsiva, apoiada por recursos de armazenamento de energia, fornecerá os recursos de monitorização, comunicação, controlo e computação para acomodar o carregamento rápido de VE durante os períodos de pico de consumo.[3]

O uso do armazenamento de energia para o carregamento de VEs tem algumas sinergias notáveis com outros benefícios. Por exemplo, o armazenamento distribuído para carregamento de EV pode fazer parte de uma estratégia localizada para integrar a energia fotovoltaica distribuída e fornecer serviços elétricos mais fiáveis em partes específicas da rede. Além disso, carregar à noite quando o consumo de eletricidade é baixo, diminuiria o consumo, reduzindo assim o custo geral de serviço das concessionárias das redes.[3]







### 3. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

O uso eficaz dos recursos energéticos do mundo depende da flexibilidade de fornecer energia seletivamente nos horários de escolha, que é o conceito fundamental por trás das tecnologias de armazenamento de energia (Capítulo 2), para que possa ser aproveitado posteriormente ou usado de maneira alternativa. A flexibilidade temporal oferecida pelo armazenamento pode ajudar o setor de energia a acomodar períodos de incompatibilidade de oferta / consumo (de breves flutuações a interrupções prolongadas) e, assim, melhorar a fiabilidade da rede, a qualidade da eletricidade e o lucro dos investimentos na infraestrutura.[3]

Numa perspetiva social, o armazenamento de energia pode atender ao consumo sazonal de energia das áreas rurais, capacitar os consumidores a gerir o seu consumo de energia e a fortalecer a proposta de valor das instalações de energia renovável.

Para facilitar a descrição de um sistema de armazenamento de energia optou-se por usar o exemplo do projeto demonstrador DEMOCRAT que se encontra, desde agosto de 2019, nas instalações da EFACEC, Maia.

Este sistema pretende ser uma montra demonstradora das capacidades que estes sistemas de armazenamento podem representar para a rede elétrica pública e privada.

### 3.1. SISTEMA BESS- DEMOCRAT

O demonstrador do projeto DEMOCRAT está atualmente instalado dentro das instalações industriais da Efacec, na Maia, Portugal. Este Sistema de Armazenamento de Energia (BESS) compreende uma ligação trifásica à rede de BT e será ligado à rede de 15 kV.

A solução compreende duas unidades contentorizadas: uma unidade de armazenamento de energia (*battery block*), onde está instalado o sistema de baterias, e uma unidade de conversão ou *power converter station* (PCS block).

Dependendo das dimensões da solução BESS, estas duas divisões podem coexistir na mesma unidade contentorizada (*BESS Block*) ou, em alternativa, a exemplo da solução DEMOCRAT, em duas unidades contentorizadas distintas (*PCS Block + Battery Block*).



Figura 9-Unidades contentorizadas *Battery Block + PCS Block*[13]

Na figura abaixo apresenta-se um layout exemplificativo de um BESS *block* onde se percebe a divisão em duas áreas distintas, uma divisão preparada para receber o sistema de baterias (*battery block*) e uma divisão para o sistema de conversão de energia (*PCS block*).

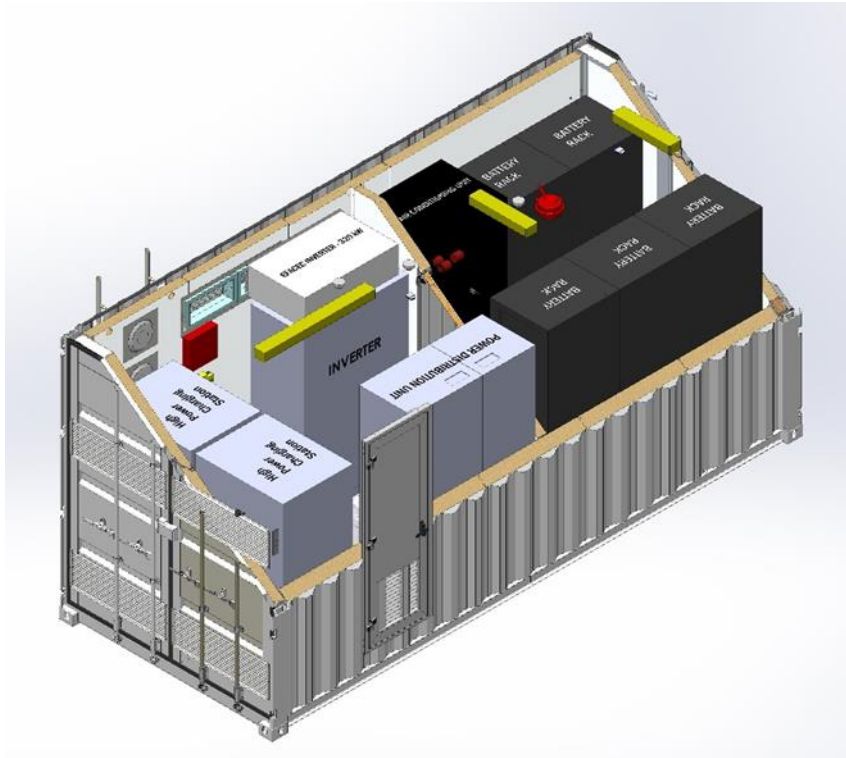


Figura 10- Layout exemplificativo de um BESS *Block*[14]

### 3.2. BATTERY BLOCK

A unidade Battery block contempla todo o sistema de baterias e deverá ser projetada para adequar corretamente a quantidade e a tipologia de baterias escolhida. Nesta unidade podem destacar-se como principais componentes os seguintes:

- suportes de baterias (*battery racks*)
  - Módulos de baterias
  - Sistema de gestão de energia
  - LAN switch;
- Quadro DC,

- Ar condicionado,
- Sistema de detecção e extinção de incêndios
- Sistema de intrusão

Atualmente, o battery block do demonstrador DEMOCRAT está equipado com 2 *racks* de baterias de íões de lítio (Li+) da Pylontech, com uma capacidade instalada de 2x109 kWh. Este *battery block* pode acomodar até 9x109 kWh das mesmas baterias, mas permitiria também a integração de outras tecnologias de lítio, bem como outro tipo de baterias.



Rack de baterias



Quadro DC

Figura 11- Exemplo de 2 componentes do *battery block*

Quadros elétricos: são componentes de um sistema de fornecimento de energia que divide uma alimentação em circuitos secundários, disponibilizando um fusível ou disjuntor de proteção para cada circuito. Nesse conteúdo, um quadro elétrico específico integra o circuito de distribuição DC, interconecta o sistema de conversão de energia ao sistema de baterias.[15]

O sistema AVAC para controlo térmico: o sistema AVAC visa manter as células da bateria dentro da faixa de temperatura ideal, permitindo que as baterias operem dentro de uma faixa de temperatura segura e ideal com o objetivo de maximizar a vida útil do sistema e garantir os requisitos de performance. Nesse sentido, o fim a que se destina o sistema de baterias deve ser conhecido, bem como o possível perfil de utilização do BESS. Embora o sistema AVAC permita a operação das baterias na faixa ideal de temperatura, ele mostra impactos significativos na eficiência global do sistema. Para diminuir o impacto do sistema AVAC, vários fatores além da eficiência das baterias e da aplicação devem ser considerados, tais como: localização no interior do contentor, direção do fluxo de ar, fluxo de ar, temperatura do ar, consumo elétrico (Coeficiente de desempenho - COP ) e isolamento do contentor.[15]

O sistema de deteção e extinção de incêndio: Deverá ser um sistema baseado num tipo de gás ou fluido inerte, ou seja, um supressor de incêndio sem água. O fluido interrompe o processo de combustão, absorvendo o calor. Corresponde a uma alternativa sustentável que substitui gases perigosos e não permanece na atmosfera nem danifica a camada de ozono.[15]

O sistema de deteção de intrusão: deverá ser um sistema típico que monitoriza o contentor, detetando e alertando em caso de intrusão de humano/animal, para que o BESS possa interromper a operação de forma segura.[15]

### **3.3. PCS BLOCK**

O *PCS block* é onde se encontra o sistema dedicado à conversão de energia e contempla 3 principais compartimentos:

- Compartimento para as Celas MT de interligação com a rede;
- Compartimento para os Transformadores MT/BT e BT/BT;
- Compartimento para o inversor de baterias, UPS, quadros de distribuição e armário de comando/controlo;

Celas MT: A ligação à rede MT requer 3 celas MT, para ligação, proteção e comutação entre a rede MT e o transformador. É necessária uma cela MT com interruptor-seccionador (IS) para os cabos de entrada / saída de cabos equipados com interruptor-seccionador ISF. Uma outra cela MT é necessária para a proteção do transformador MT / BT (cela DC/MT) e deve estar equipada com um disjuntor a vácuo do tipo DIVAC. Uma última cela MT para medição de tensão (célula TT MT). Os transformadores de tensão presentes na cela TT devem ser protegidos por fusíveis. [15]

Transformadores BT/BT e MT/BT: Para o transformador BT/BT, é esperado um com a configuração YNd11. Esta topologia possui um enrolamento primário em estrela com neutro e um segundo enrolamento com ligação delta. As tensões deste transformador correspondem a 420V e 315V como tensão primária e secundária, respetivamente. No que diz respeito ao transformador MT/ BT, a topologia para este transformador é Dyn11, o que significa um enrolamento primário com ligação delta e um enrolamento secundário em estrela com neutro. As tensões correspondem a 15kV no lado MT e 315V no lado BT. Ambos os transformadores devem ter 250 KVA.[15]

Tabela 2- Especificações dos transformadores do BESS DEMOCRAT

Transformer Type	Transformer configuration	Primary winding	Secondary winding
LV/LV	YNd11	420	315
MV/LV	Dyn11	15kV	315

Armário de controlo: O armário de controlo é fornecido com dispositivos eletrónicos, capazes de monitorizar e controlar os vários componentes do sistema de armazenamento. O armário de controlo compreende o *ES Controller* e o *ES Manager*. Também deve incluir um GPS capaz de sincronizar qualquer dispositivo de TI com uma referência de tempo global. Essa sincronização é necessária para garantir que todos os eventos e alarmes tenham uma marcação de hora adequada. Um *switch* LAN também deve estar presente no painel de controlo, pois fornece comutação entre os diferentes dispositivos de TI e uma rede local comum.[15]

Em relação aos IEDs, um sistema de armazenamento pode compreender IEDs (relés de proteção, qualímetros, medidores inteligentes e concentradores). O sistema deve incluir:

- Um medidor inteligente (*smart meter*) capaz de monitorizar o circuito ao qual está ligado e comunicar informações sobre o consumo ou injeção de energia elétrica na rede.
- Dois qualímetros (um para BT e outro para MT) capazes de avaliar tendências e previsões de dados, enquanto realizam o cálculo da potência ativa, reativa e aparente. Além disso, pode fornecer leituras de THD, podendo fazer o controlo de quedas e aumentos de tensão e corrente, com a capacidade de disparar eventos. O qualímetro MT está ligado dentro da cela DC.
- Um controlador para o transformador de distribuição (DTC) que pode fornecer recursos de controlo e monitorização da rede de baixa tensão, bem como a medição e agregação dos dados de medição. Também pode funcionar como um medidor inteligente.
- Uma unidade de proteção, como o TPU S220-S, que pode desativar equipamentos de proteção, como disjuntores, como resultado de anomalias de tensão, corrente e frequência. Esta unidade também faz a verificação e o sincronismo. A TPU deve estar ligada à cela DC /MT e atuar sobre o disjuntor MT.

A UPS pode garantir que, em caso de falha ou em emergência, os componentes críticos do sistema tenham outra fonte de energia de backup. Os equipamentos controlados remotamente, os IED, o ES Controller, devem ser alimentados pela UPS.

O *PCS block* do demonstrador DEMOCRAT está equipado com um inversor de baterias de 250 kVA. É equipado com dois transformadores, fornecendo a interface com a rede nos níveis BT e MT, respetivamente 400 V e 15 kV.



Figura 12- Celas MT 15 kV do PCS block[13]



Figura 13- Transformador elevador (MT/BT) 15 kV/ 400 V [13]



Figura 14- Componentes do PCS block, inversor de baterias, UPS, Quadro AC e cabine de controlo[13]

### 3.4. ENERGY STORAGE CONTROLLER

O ES Controller (ESC) está localizado no armário de controlo situado no PCS block, corresponde a uma unidade de controlo local inteligente que permite a resposta adequada e muito rápida do sistema de armazenamento de energia. O controlador permite a monitorização contínua das medidas CA e CC da rede elétrica e do sistema de baterias, fornecendo as interfaces entre o sistema de gestão de baterias e o inversor de baterias. Os seus recursos de controlo garantem o cumprimento dos critérios técnicos e económicos que são personalizáveis pelo utilizador do sistema de armazenamento. Ele executa as funções básicas como o controlo e monitorização, a capacidade de guardar o histórico dos registos dos dados de medição e a gestão dos momentos de on/off do sistema de baterias tendo por base os modos de operação do sistema.

Este componente monitoriza o dispositivo da bateria, comunicando-se com o BMS ou MBMS e com o sistema de conversão de energia. Além disso, o ESC pode monitorizar, recolhendo as medidas elétricas no ponto de conexão elétrico (ECP) para fazer um controlo adequado do BESS. O ESC é também responsável pelo envio de pontos de ajuste de energia ativos e reativos ao sistema de conversão de energia, com o fim de executar diferentes

serviços. Além disso, ao permitir comunicar com os sistemas de outras entidades intervenientes do setor elétrico (por exemplo, Operador da rede de Distribuição, operador do mercado de eletricidade), é capaz de otimizar o comportamento do BESS tanto em termos técnicos quanto económicos, além de permitir que o BESS responda a solicitações funcionais externas. A otimização do comportamento do BESS consiste em definir o cronograma do sistema de baterias, ou seja, definir os períodos de tempo mais adequados, para cumprir com os objetivos da sua operação, carregar e descarregar o BESS.

Além desses dois dispositivos, o inversor e o MBMS, que são controlados pelo *ES controller*, este controlador comunica também com os restantes componentes do sistema, como os serviços auxiliares, como o sistema de combate a incêndio e o AVAC, os sistemas de medição e qualidade de energia, o (s) transformador (es) e com os ativos da rede.

Em relação aos serviços auxiliares, o *ES Controller* desempenha um papel muito importante na estratégia de regulação de ventilação e AVAC, uma vez que as baterias de íões de lítio possuem uma faixa limitada de temperaturas nas quais o sistema pode operar com segurança. A faixa ideal de temperatura de operação das baterias deve estar entre 18 ° C e 28 ° C para garantir uma vida útil longa para as baterias e mais eficiência para o sistema.

### **3.5. ENERGY STORAGE MANAGER**

O *Energy Storage Manager*, tal como o *ES Controller*, também se localiza no armário de controlo do *PCS block* e corresponde a um sistema de gestão avançado do sistema de armazenamento de energia. O *ES Manager* deve ter uma visão detalhada, não apenas do sistema de armazenamento, mas também dos outros elementos ativos que podem partilhar o mesmo ECP da rede com o sistema de armazenamento. Como exemplos de elementos ativos são, por exemplo, uma central solar fotovoltaica, um grupo gerador a diesel e um conjunto de cargas controláveis, como um sistema de carregamento de veículos elétricos (EV). A aquisição e o processamento de uma quantidade significativa de dados permitem a implementação de algoritmos avançados, a fim de maximizar os benefícios do sistema de armazenamento durante sua vida útil, obtendo uma visão mais abrangente de todo o sistema.

Por um lado, o *ES Manager* tem a responsabilidade de otimizar o sistema integrado coordenando ao mesmo tempo os ciclos de vida útil das baterias (vida útil e taxa de degradação), ou seja, o processo de otimização considera não apenas a operação do sistema da bateria, mas também algumas variáveis internas associadas à saúde das baterias, o que pode limitar o desempenho geral do sistema e a sua vida útil.

Por outro lado, o *ES Manager* deve fornecer algoritmos avançados capazes de otimizar, para diferentes horizontes temporais (diária ou intra-diária) a gestão dos ciclos de carga e descarga, respondendo a vários objetivos de operação e integrando algoritmos de previsão de produção renovável e cargas. O *ES Manager* deve também reportar os dados importantes ao sistema de gestão de micro-redes (MGMS).

Um outro recurso do *ES Manager* é a monitorização e a avaliação de desempenho do sistema de armazenamento integrado que vai até a análise de desempenho, gera e fornece relatórios de desempenho e reporta a análise de desempenho ao SCADA / EMS / MGCC.[15]



## 4. CASO DE ESTUDO

Neste capítulo pretende-se descrever a metodologia desenvolvida para encontrar os limites de operação de um BESS na sua função de suporte a 2 postos de carregamento de veículos elétricos (PC-VE) com características de carregamento super-rápidas. Essa análise foi feita numa perspetiva de determinar os limites de potência e de capacidade energética do BESS. O estudo teve em conta as limitações de potência da rede elétrica local e as necessidades energéticas de potenciais veículos elétricos (VE) utilizadores dos postos de carregamento.

Para este estudo a solução de baterias escolhida incidu sobre um sistema de baterias com base na tecnologia de iões de lítio e sustentou-se na necessidade de garantir, para a solução BESS, uma tecnologia com alguma maturidade de desenvolvimento e que permitisse um horizonte de utilização de 15 anos, uma vez que esse é um valor habitualmente assumido como o período de vida útil de sistemas de baterias.[17]

#### 4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para este estudo foram modelados vários cenários de consumo que permitissem simular o comportamento da solução BESS perante os vários cenários e, encontrar o limite da capacidade do sistema na sua função de apoio ao carregamento dos veículos elétricos (*worst case scenario*).

Partiu-se assim de uma solução contentorizada BESS pré-dimensionada, quer em potência instalada, quer em capacidade energética disponível e, assumiram-se também, condições base para a capacidade energética dos veículos utilizadores dos postos de carregamento de veículos elétricos.

##### Capacidade e Estado de Carga das Baterias dos VE

Tendo em conta o estado de desenvolvimento atual das baterias de VE e prevendo-se, nos próximos anos, uma evolução da sua capacidade energética para níveis de autonomia superiores, assumiu-se que os veículos elétricos utilizadores destes postos de carregamento, teriam capacidades de 95 kWh e 100 kWh, Audi e-Tron e Tesla Model S Long Range, respetivamente.[17] Na seleção destes VE foi também tido em consideração a sua capacidade de poder aceitar cargas ultra-rápidas de 150 kW de potência.

Foram também considerados alguns pressupostos no que respeita às características e ao estado de carga (*SoC*) das baterias dos veículos elétricos (VE). Neste caso, assumiu-se que um utilizador de VE tem a preocupação de procurar um posto de carregamento antes de atingir os 20% de *SoC*. Para efeitos de cálculos considerou-se que o estado de carga inicial dos VE antes do carregamento seria de 20% e que o utilizador pretenderá fazer o carregamento até aos 100% da capacidade da bateria.

##### Definição das Horas de Ponta

No que respeita às horas de ponta do posto de combustível, assumiram-se 3 períodos de horas de ponta onde a potência disponível na rede é menor:

- **Hora de ponta 1:** Período entre as 7h-9h
- **Hora de ponta 2:** Período entre as 12h-14h

- **Hora de ponta 3:** Período entre as 17h-19h

### Características dos Postos de Carregamento de Veículos Elétricos (PC-VE)

Quanto aos postos de carregamento de veículos elétricos (PC-VE) foram considerados, para este estudo, 2 Supercarregadores Ultra Fast Charger HV160, que apresentam a potência de consumo AC de 160 kVA (aprox. 156,8 kW com fator potência 0,98). [18] Para efeitos de cálculos considerou-se a potência de consumo de cada carregador HV 160 de 160 kW e desprezaram-se também as perdas adicionais de aproximadamente 5% por carregador.

Com esta base de potência, o funcionamento simultâneo dos 2 supercarregadores representará uma potência máxima total absorvida ao sistema de 320 kW.



Figura 15-Estações de Carregamento Ultra Rápido, HV-160

### Condições base para a descarga de energia

Quanto à potência do inversor carregador a instalar no BESS considerou-se um equipamento com uma potência, nos seus terminais BT, de 320 kW para garantir o correto funcionamento dos 2 Supercarregadores.



Figura 16- Inversor de Baterias Efacec 320 kW

### Características base para a carga de energia

Relativamente à potência disponível para o carregamento dos veículos elétricos, a Figura 17 mostra o gráfico com o cenário base no que respeita às potências disponíveis na rede local, nomeadamente a limitação da potência contratada (173 kW), e a limitação da potência máxima disponibilizada para efeitos de carregamento das baterias do sistema BESS e da alimentação dos postos de carregamento de VE, ou seja, nas horas de ponta estão disponíveis 75 kW e nas horas de vazio, estão disponíveis 150 kW.

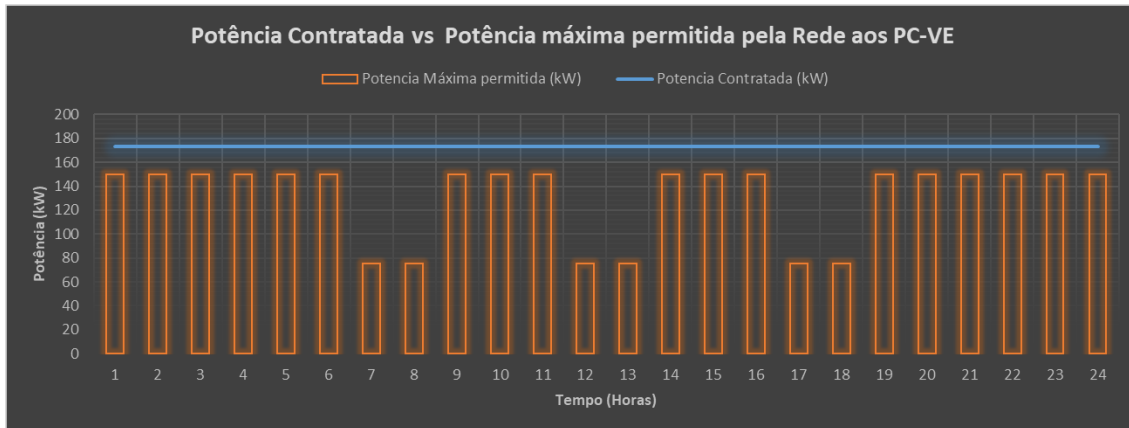


Figura 17- Potência Contratada vs Potência Máx permitida

### Cálculo da Energia e Tempo de carregamento

A energia necessária para carregar cada um dos veículos elétricos foi calculada com base na capacidade das baterias de cada VE ( $C$ ), no estado de carga inicial ( $SoC_i$ ) e no nível de carga final pretendido pelo utilizador ( $SoC_f$ ), aqui demonstrada pela Equação 1.

$$E = (SoC_f - SoC_i) \times C \quad (1)$$

Tendo em conta a quantidade de energia necessária no carregamento de cada um dos veículos elétricos para garantir um  $SoC_f$  de 100%, e como se trata de um carregamento com uma potência constante, determinou-se o tempo necessário para cada carregamento através da Equação 2.

$$T = \frac{E}{P} \times 60 \quad (2)$$

Onde  $E$  representa a energia que vai ser requisitada ao sistema, em kWh,  $P$  representa a potência de carga dos PC-VE, em kW, e  $T$  representa o tempo que dura cada carregamento, em minutos.

### Requisitos de capacidade de energia do BESS

Tendo em conta o perfil de consumo criado para cada um dos cenários, definiu-se que o BESS deveria ter uma capacidade mínima de armazenamento de energia utilizável de 261,36 kWh. Este valor de energia utilizável pressupõe a assunção de uma profundidade

de descarga máxima de 80% (*DoD* 80%) e uma capacidade instalada de 326,7 kWh, através da instalação de 3 Racks de baterias de 108,9 kWh, cada um.

Assumiu-se também, para este estudo, que o estado de carga inicial do BESS, no momento T0 de cada Cenário, seria de 100%.

### Resumo dos pressupostos iniciais dos diferentes cenários

Na Tabela 3 apresenta-se um resumo com os pressupostos base assumidos para simular cada um dos cenários.

Tabela 3- Pressuposto base de cada Cenário

PRESUPOSTOS INICIAIS	Rede Elétrica Local		
	Limite de potencia da Rede elétrica local (Hora de Vazio):	150	kW
	Limite de potencia da Rede elétrica local (Horas de Ponta):	75	kW
	Power Converter Block		
	Potência do Inversor Carregador (AC/DC):	320	kW
	Battery Block		
	Capacidade de cada Rack (23 módulos):	108,9	kWh
	nº de Racks:	3	un
	Capacidade total inicial das baterias instaladas:	326,7	kWh
	DoD recomendado das baterias:	80% ▼	%
	Capacidade total Utilizável (kWh) com DoD recomendado:	261,36	kWh
	Limite do BESS com DoD (80 %):	65,34	kWh
	Postos de Carregamento de Veículos Elétricos (PC-VE)		
	Potencia Absorvida pelo Carregador de VE (AC input):	160,00	kVA
	Perdas do carregador VE:	0,0% ▼	
	Potência de Saída de cada PC-VE (DC output):	160,0	kW
	Nº de Postos de Carregamento VE:	2	un
	Veículos Elétricos		
	Nível de carga do VE antes do carregamento:	20% ▼	
	Nível de carga do VE Máx. Pretendida:	100% ▼	

## 4.2. CENÁRIOS MODELADOS

Este estudo pretendeu simular vários cenários possíveis de utilização dos postos de carregamento de veículos elétricos (PC-VE), desde cenários menos exigentes a cenários extremos de utilização dos postos de carregamento para, com base nos dados obtidos, encontrar os limites de utilização do sistema BESS proposto.

Os vários cenários modelados tiveram em conta dois principais períodos existentes ao longo de um dia, o período das horas de vazio (Cenário 1) e o período das horas de ponta (Cenário 2 e *worst case scenario*). Com base nestes dois cenários principais, simularam-se vários sub-cenários de utilização dos PC-VE em períodos de 30 minutos, onde os 2 PC-VE estariam em funcionamento simultâneo, de forma a exigir a potência máxima ao sistema em cada instante, e estariam a ser utilizados por VE de forma consecutiva até se atingir o limite de carga mínimo definido para o BESS. Foi também assumido que, para o início do Cenário 1 e do Cenário 2, o sistema BESS estaria com a sua capacidade energética máxima (*SoC* 100%).

Foi ainda criado um Cenário 3, para simulação do comportamento do BESS ao longo de um dia completo (24h), respeitando os limites da rede, os requisitos de operação do próprio BESS e considerando um período de utilização dos postos de carregamento entre as 3h e as 22h para, dessa forma, estimar a quantidade de VE que o sistema BESS conseguiria apoiar.

A Tabela 4 resume os principais dados do funcionamento simultâneo dos dois postos de carregamento (PC-VE), destacando-se a energia total requisitada pelos VE e o tempo utilizado para o carregamento de cada um dos VE.

Tabela 4- Condições Base de utilização dos PC-VE

Posto de Carregamento	VE	Bateria dos VE			Carregador		
		Capacidade	A carregar	Potencia	Carga	Tempo de carga	
		(kWh)	(%)				(kWh)
PC-VE1	Audi E-Tron	95	80%	76	160,00	2,67	29
PC-VE2	Tesla Model S	100	80%	80	160,00	2,67	30
<b>TOTAIS</b>				156	320	5,33	

No período de vazio, as horas escolhidas para a simulação não seguiram nenhum critério específico de escolha, sendo escolhidas de forma aleatória.

#### **4.2.1. CENÁRIO 1 - CARREGAMENTO HORAS VAZIO**

Para este período horário consideraram-se 4 cenários, onde cada cenário representa 30 minutos de operação dos PC-VE. Cada um dos cenários de carregamento ocorre de forma sequencial e com o mínimo tempo de pausa entre eles. Pretende-se, com isto, perceber qual o momento onde é atingido o limite mínimo do BESS.

- Cenário 1.1: 1º VE em carga, ocorrência em simultâneo nos 2 postos de carregamento Ultra Rápido;
- Cenário 1.2: 2º VE em carga, ocorrência em simultâneo nos 2 postos de carregamento Ultra Rápido;
- Cenário 1.3: 3º VE em carga, ocorrência em simultâneo nos 2 postos de carregamento Ultra Rápido;
- Cenário 1.4: 4º VE em carga, ocorrência em simultâneo nos 2 postos de carregamento Ultra Rápido.

A Figura 18 pretende mostrar graficamente a potência disponibilizada pela rede e a potência disponibilizada pelo BESS, para a satisfação deste cenário. Da sua análise percebe-se que a potência máxima disponibilizada pela rede nas horas de vazio, 150 kW, não é suficiente para satisfazer a totalidade da potência solicitada pelos 2 PC-VE em funcionamento simultâneo, 320 kW. Razão que sustenta a necessidade do BESS ter que disponibilizar uma potência de 170 kW para o funcionamento correto dos postos de carregamento.

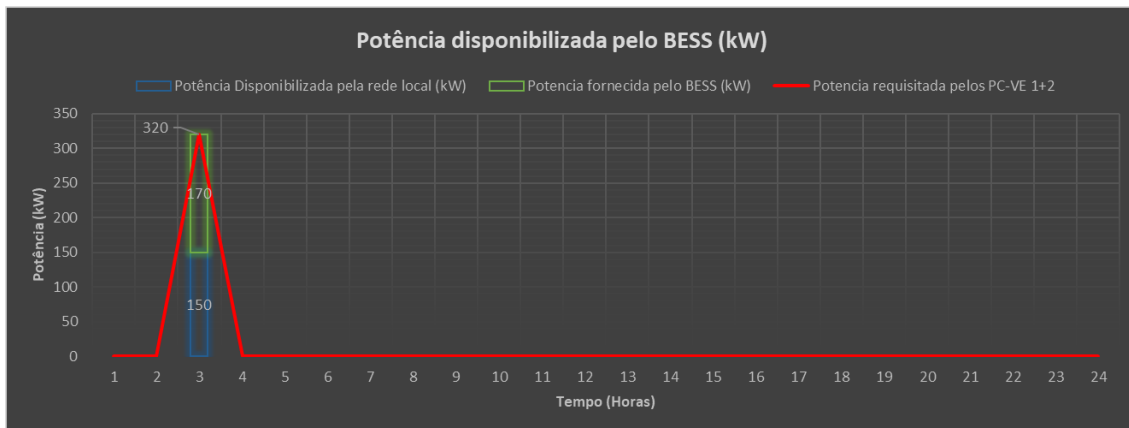


Figura 18- Cenário 1-Potência fornecida Rede vs Potência fornecida BESS

### Cenário 1.1

Este Cenário 1.1, apresenta os primeiros 30 minutos de utilização do sistema BESS no período vazio onde, na Figura 19, é apresentado o comportamento do estado de carga do BESS.

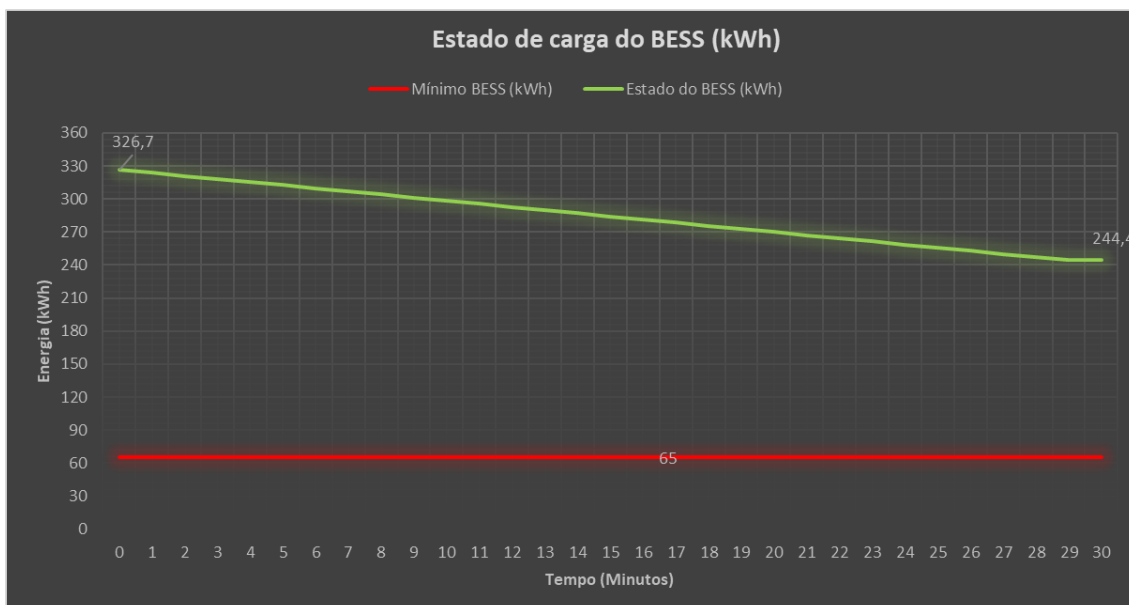


Figura 19- Cenário 1.1-Estado de carga do BESS ao fim de 30 minutos

Da análise da Figura 19, podemos observar que o sistema BESS, nos primeiros 30 minutos, disponibilizou energia ao sistema, e respondeu positivamente à carga solicitada, mantendo-se acima do limite mínimo de carga definido. No final deste cenário, o estado

de carga do BESS situava-se nos 244,4 kWh (SoC 75%). Pode-se observar também, pela análise do gráfico, que a curva do estado de carga do BESS atenua ligeiramente a sua descida no último minuto do período de carga. Esta situação deve-se a que, no minuto 29, o Audi e-Tron terminou o seu carregamento e apenas o Tesla Model S manteve-se em carga.

### **Cenário 1.2**

Este Cenário 1.2, apresenta os 30 minutos seguintes ao Cenário 1.1. Neste cenário considerou-se a entrada de um segundo veículo para carregamento, situação que ocorreu em simultâneo nos dois PC-VE e nas mesmas condições de carga.

Na Figura 20, é apresentado o comportamento do estado de carga do BESS neste novo cenário.

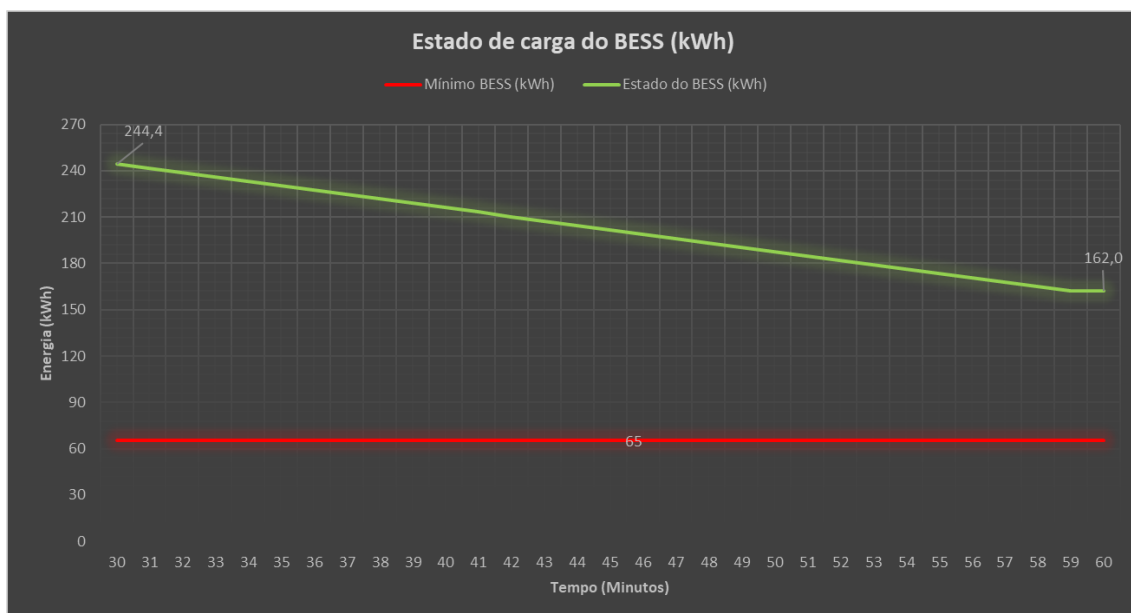


Figura 20- Cenário 1.2-Estado de carga do BESS ao fim de 60 minutos

Da análise da figura, podemos observar que o sistema BESS, neste segundo período de 30 minutos, correspondeu positivamente à carga solicitada, disponibilizando 82,3 kWh, e mantendo os seus níveis da bateria acima do valor limite mínimo definido (65 kWh). À semelhança das razões do cenário anterior, o gráfico mostra, a partir do minuto 59, a atenuação da curva de descarga do BESS.

### Cenário 1.3

Neste cenário considerou-se a entrada de um terceiro veículo para o carregamento, imediatamente a seguir ao fim da carga dos VE do Cenário 1.2, em simultâneo nos dois PC-VE e nas mesmas condições de carga dos cenários anteriores.

A Figura 21, mostra o comportamento de descarga do BESS, que se apresenta igual aos cenários anteriores, fruto da implementação das mesmas condições de utilização dos postos de carregamento.

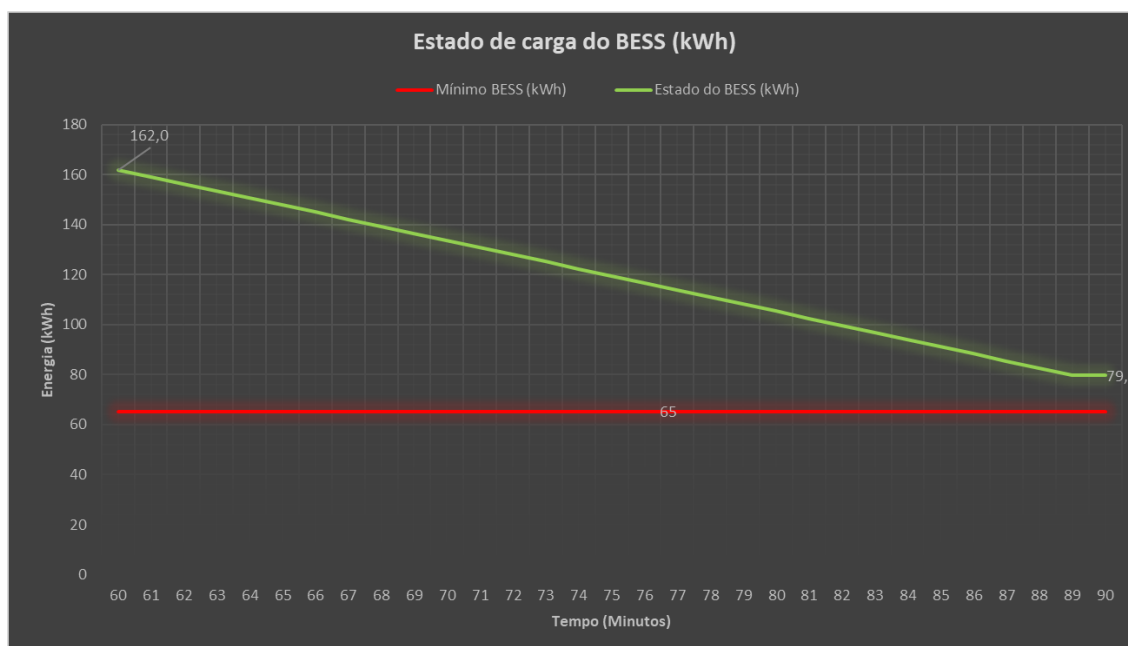


Figura 21- Cenário 1.3-Estado de carga do BESS ao fim de 90 minutos

Da análise da Figura 21 e, à semelhança do cenário anterior, o gráfico mostra, a partir do minuto 89, a atenuação da curva de descarga do BESS devido ao fim do carregamento do Audi e-Tron. Podemos também observar que o sistema BESS, neste terceiro período de 30 minutos, e com o mesmo nível de descarga imposto, 82,3 kWh, conseguiu manter a sua capacidade energética acima do seu valor limite (65 kWh), no entanto, a diferença até esse limite mínimo, 14,4 kWh (SoC 24%) permite-nos concluir que, num próximo cenário, se forem impostas as mesmas condições de carregamento, o BESS irá retirar de serviço os postos de carregamento, numa primeira etapa, de um dos PC-VE, e numa segunda etapa, antes de atingir o limite mínimo, do segundo PC-VE, para depois iniciar o período de regeneração do BESS. Esta função do BESS pode ser alterada e, inclusive, após o último

carregamento completo dos VE estar efetuado, prevendo-se a incapacidade de poder suportar um novo ciclo de carregamento de VE, iniciar logo a regeneração. Para efeitos de determinar os limites de carregamento neste cenário, optou-se por deixar o BESS atingir esse limite.

#### **Cenário 1.4**

Neste cenário considerou-se a entrada de um quarto veículo para o carregamento, mais uma vez, imediatamente a seguir ao fim da carga dos VE do Cenário 1.3, em simultâneo nos dois PC-VE e nas mesmas condições de carga dos cenários anteriores.

A Figura 22, mostra o momento em que o BESS atingiu o seu limite de apoio à rede dos postos de carregamento, neste caso ao minuto 95, momento a partir do qual o sistema BESS parou o carregamento dos VE e deu início à regeneração do seu sistema de baterias, canalizando a potência da rede local para esse fim. Neste curto período de carregamento, o BESS apenas conseguiu fornecer aos PC-VE aproximadamente 14 kWh antes de iniciar a regeneração.

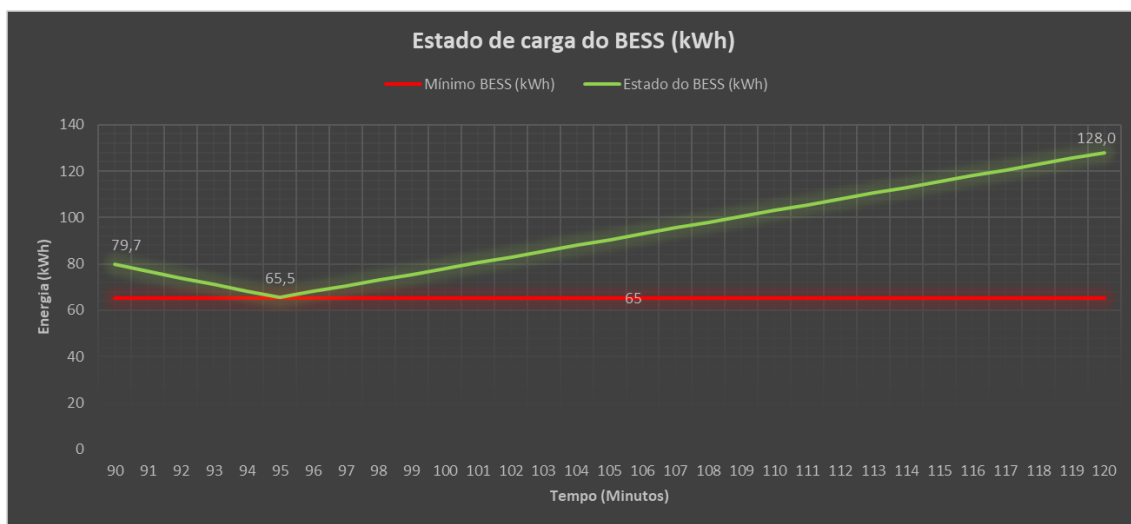


Figura 22- Cenário 1.4-Estado de carga do BESS ao fim de 120 minutos

Depois de atingir o limite de carga mínimo, o sistema BESS está programado para só iniciar novo período de apoio ao carregamento quando o seu estado de carga das baterias tiver sido totalmente repostado (SoC 100%).

A Figura 23 faz um “zoom out” desse momento e mostra, num quadro de 24h, o comportamento de carga e descarga do BESS. Neste exemplo assumiu-se que a regeneração do BESS teve início na Hora 4, e que a potência disponível na rede (150 kW) passou a ser utilizada, na sua totalidade, para a regeneração do sistema de baterias do BESS. Neste estado de regeneração, verifica-se que só ao final da Hora 6 o BESS consegue recuperar a sua capacidade energética máxima de 326,70 kWh.

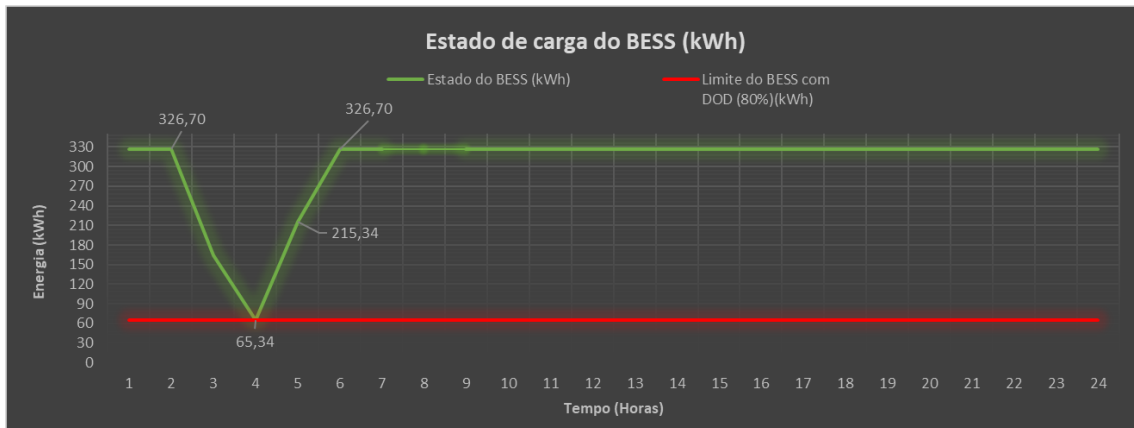


Figura 23- Cenário 1 - Estado de Carga do BESS- Período de Regeneração

A figura seguinte permite, em mais pormenor, perceber o período de regeneração do BESS, onde, ao fim de 105 minutos após o início da regeneração, é atingida a capacidade máxima do BESS.



Figura 24- Cenário 1 - Período de Regeneração do BESS (minutos)

Como breve conclusão do comportamento do BESS no período de vazio, podemos assumir que a solução técnica do BESS em estudo, no período de horas de vazio permite apoiar a rede e suportar o carregamento de até 6 VE consecutivos, e sem período de regeneração entre os carregamentos. Por outro lado, tendo em conta a potência disponível na rede de 150 kW, o sistema precisa de 1h45 para regenerar a carga das baterias do BESS antes deste iniciar um novo ciclo de carregamento.

#### **4.2.2. CENÁRIO 2 - CARREGAMENTO NAS HORAS DE PONTA**

Para o período das horas de ponta consideraram-se os cenários abaixo, onde cada cenário representa 30 minutos de operação dos PC-VE e onde, em cada um dos PC-VE, estará um veículo elétrico em carga. Tal como para o Cenário 1, pretende-se encontrar o limite mínimo do BESS, ou seja, o momento onde o BESS deixe de conseguir suportar a rede na operação de carregamento dos VE.

- Cenário 2.1: 1º VE em carga, ocorrência em simultâneo nos 2 postos de carregamento Ultra Rápido;
- Cenário 2.2: 2º VE em carga, ocorrência em simultâneo nos 2 postos de carregamento Ultra Rápido;
- Cenário 2.3: 3º VE em carga, ocorrência em simultâneo nos 2 postos de carregamento Ultra Rápido;

A Figura 25 mostra graficamente a potência que o BESS tem de dispor no período das horas de ponta. Comparativamente com o Cenário 1, neste período horário a potência disponível na rede reduz-se para metade, 75 kW, o que exige ao BESS um reforço adicional de potência para essa compensação, neste caso, a disponibilidade de 245 kW.

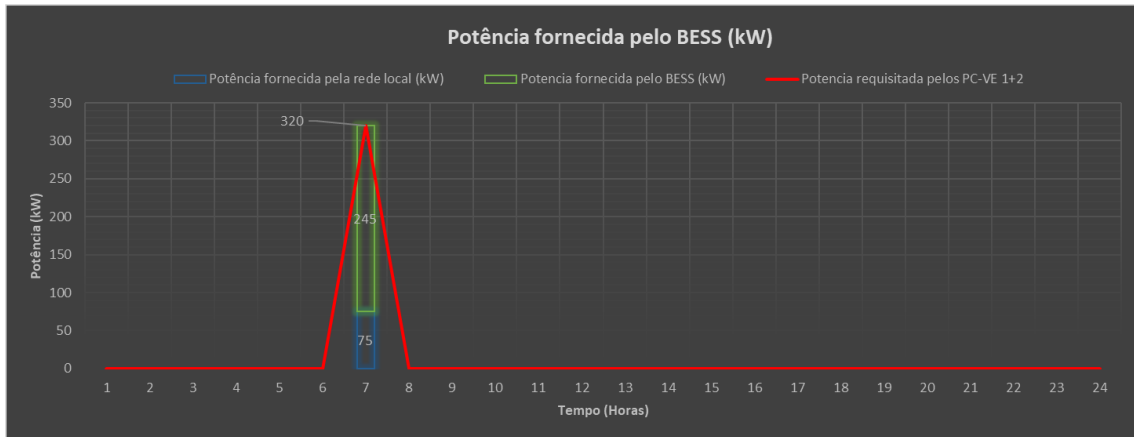


Figura 25- Cenário 2 - Potência fornecida pelo BESS (kW)

### Cenário 2.1

Este Cenário, apresenta os primeiros 30 minutos de utilização do sistema BESS no período das horas de ponta onde, na Figura 26, é apresentado o comportamento do estado de carga do BESS neste primeiro período.

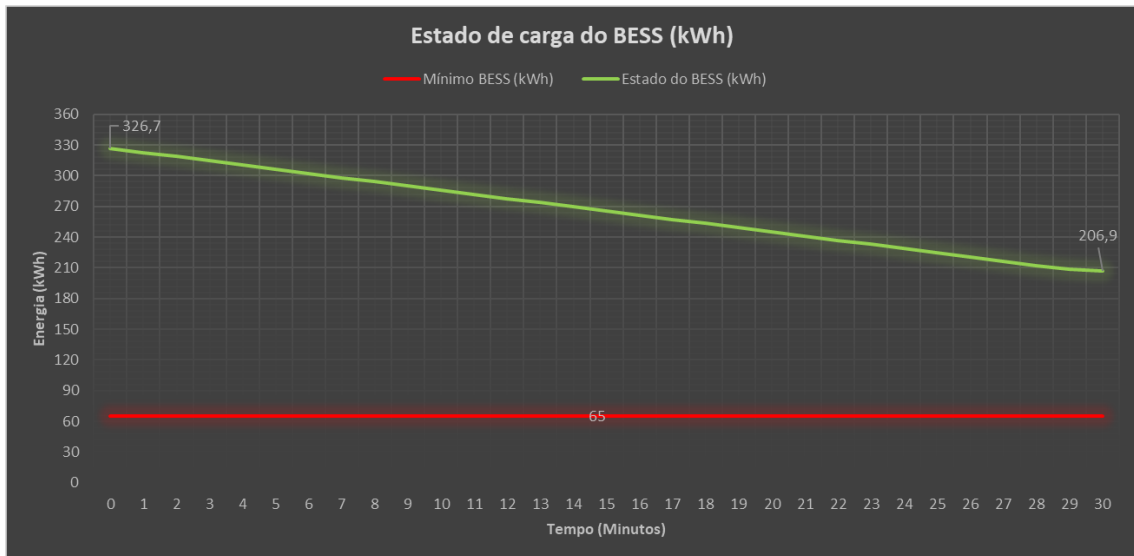


Figura 26- Cenário 2.1-Estado de carga do BESS ao fim de 30 minutos

Tal como no Cenário 1.1, na análise da Figura 26, observa-se que o sistema BESS, nos primeiros 30 minutos, disponibilizou energia ao sistema, e terminou este primeiro período de carregamento com o seu estado de carga acima do limite mínimo definido (65 kWh), no entanto com um SoC inferior ao período homólogo do Cenário 1, neste caso 206,9 kWh (SoC 63%). Neste cenário o BESS disponibilizou para o carregamento dos VE, 119,8 kWh de

energia. Também se observa o mesmo comportamento de atenuação da curva de descarga do BESS, no último minuto.

## **Cenário 2.2**

Neste cenário considerou-se a entrada do segundo veículo para carregamento, imediatamente a seguir ao fim da carga dos VE do Cenário 2.1. Este acontecimento ocorreu em simultâneo nos dois PC-VE e nas mesmas condições de carga do cenário anterior.

A Figura 27, mostra o comportamento de descarga do BESS, neste segundo período de 30 minutos.

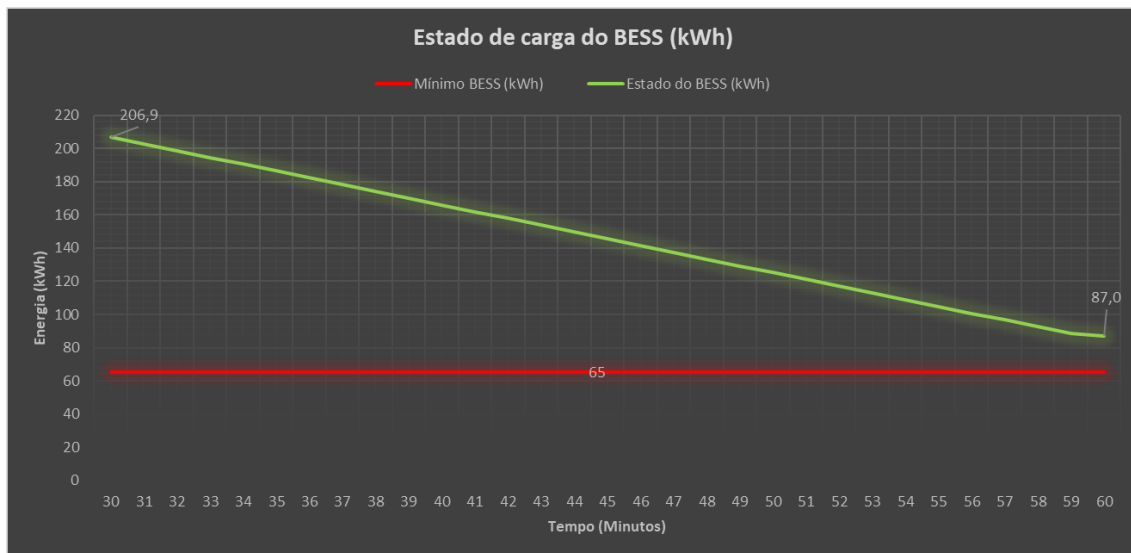


Figura 27- Cenário 2.2-Estado de carga do BESS ao fim de 60 minutos

Da análise da figura observa-se que o gráfico apresenta uma curva de descarga mais acentuada do que a curva de descarga do Cenário 1, devido à necessidade do BESS ter que disponibilizar mais potência ao sistema. Neste cenário, em 30 minutos, o BESS teve que disponibilizar 119,8 kWh o que o aproxima do limite mínimo definido para o estado de carga do BESS.

Apesar de, no final deste cenário, o sistema BESS ter-se mantido acima desse limite mínimo, a diferença até esse limite é muito pequena, cerca de 22 kWh (SoC 27%), e permite-nos antecipar a conclusão de que, no próximo cenário, se forem mantidas as mesmas condições

de carregamento, o BESS irá retirar de serviço os postos de carregamento e iniciar o período de regeneração.

Tal como no cenário homólogo anterior, para efeitos de determinar os limites de carregamento neste cenário, optou-se por deixar o BESS atingir esse limite mínimo de carga.

### **Cenário 2.3**

Neste cenário considerou-se a entrada do terceiro veículo elétrico para carregamento, mais uma vez, imediatamente a seguir ao fim da carga dos VE do Cenário 2.2, em simultâneo nos dois PC-VE e nas mesmas condições de carga.

A Figura 28, mostra o momento em que o BESS atingiu o seu limite de apoio à rede dos postos de carregamento, neste caso ao minuto 65. Comparativamente com o Cenário 1, o sistema BESS, nas horas de ponta, atingiu o seu limite 30 minutos antes, ou seja, apenas conseguiu garantir o apoio ao carregamento de 4 veículos elétricos. A partir do minuto 65 inicia-se o período de regeneração do BESS, sendo que, até esse momento, o BESS apenas conseguiu fornecer aos PC-VE aproximadamente 20 kWh antes de iniciar a regeneração.

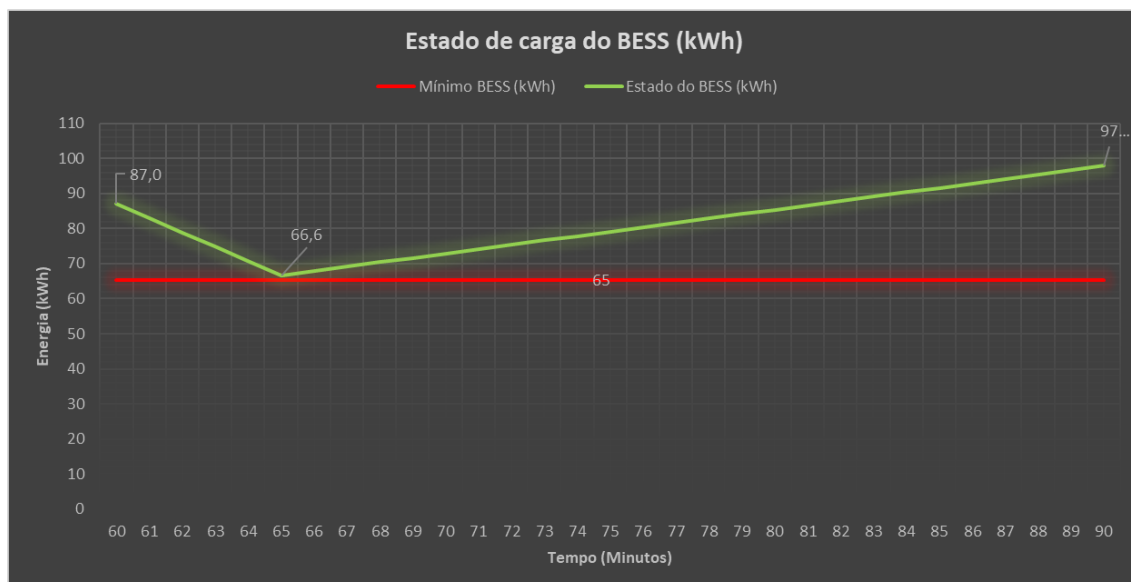


Figura 28- Cenário 2.3-Estado de carga do BESS ao fim de 90 minutos

A Figura 30 faz o “zoom out” temporal, apresentando a perspetiva de análise do comportamento de carga e descarga do BESS num período de 24h. Nessa análise, também

apoiada pela Figura 28, é observável que o sistema BESS apenas conseguiu responder às solicitações de apoio ao carregamento de VE, na primeira hora do período de ponta, e por mais 5 minutos da segunda hora de ponta, momento a partir do qual iniciou regeneração com a potência disponível na rede, de 75 kW. Neste estado de regeneração e assumindo que este teve início às 8h, verifica-se que o BESS só ao fim de 2 horas (10h da manhã) apresenta a sua capacidade energética máxima de 326,70 kWh.

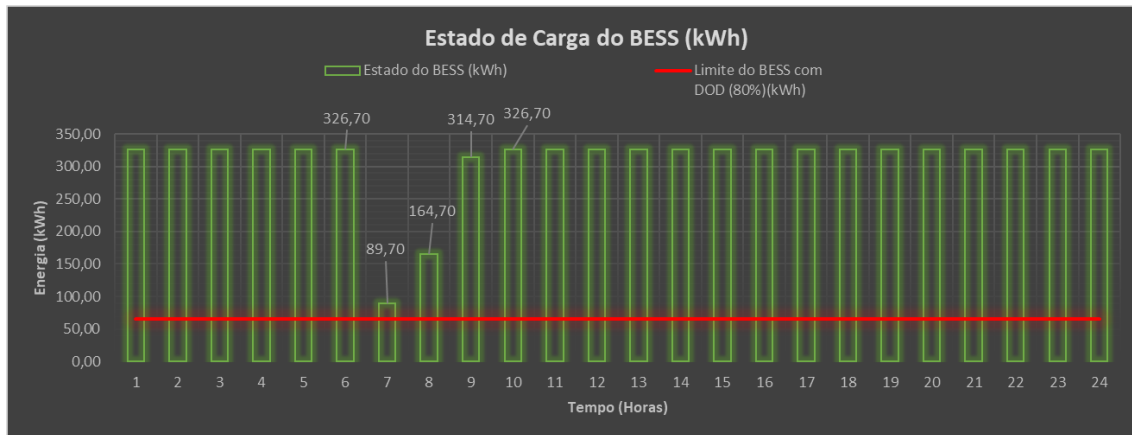


Figura 29- Cenário 2 - Estado de Carga do BESS- Período de Regeneração

Na Figura seguinte observa-se em maior detalhe o período de regeneração do BESS onde são destacados os dois momentos distintos de velocidades de carga do BESS. O primeiro momento, mais lento, até aos 25 minutos, onde a potência disponível da rede é de 75 kW, e um segundo momento, mais rápido, até aos 120 minutos, onde a curva de carga é mais acentuada, onde a potência disponível na rede é de 150 kW.

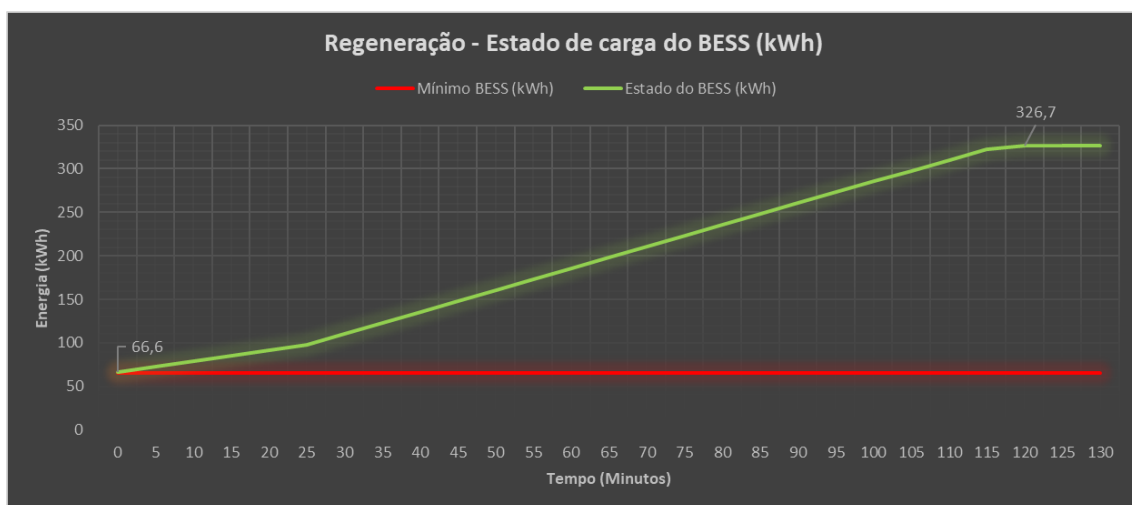


Figura 30- Cenário 2 - Período de Regeneração do BESS (minutos)

A título de conclusão deste cenário, podemos assumir que a solução técnica do BESS em estudo, no período de horas de ponta permite apoiar a rede no suporte ao carregamento de até 4 VE consecutivos e sem período de regeneração entre os carregamentos. Por outro lado, tendo em conta a potência disponível na rede em 2 momentos de carga (75 kW e 150 kW), o sistema precisa de 120 minutos (2 horas) para regenerar a carga das baterias do BESS antes de iniciar um novo ciclo de carregamento.

#### **4.2.3. CENÁRIO 3 – UTILIZAÇÃO DOS POSTOS DE CARREGAMENTO AO LONGO DO DIA**

Neste 3º cenário, tentaram-se recriar dois perfis de utilização dos postos de carregamento, ao longo de um dia, para determinar o nº de VE que poderiam ser carregados durante 1 dia completo de funcionamento. Para este cenário tiveram-se em conta os limites de potência da rede, os requisitos de funcionamento do BESS, no que respeita à regeneração necessária antes de iniciar um novo ciclo de carregamento, e o horário de início e fim de operação dos postos de carregamentos, neste caso considerando-se o início do funcionamento às 3h e o fim às 22h. Para este cenário assumiu-se também que cada PC-VE, em cada hora, carregaria 2 VEs.

- Cenário 3.1: Utilização dos dois postos de carregamento Ultra Rápido em simultâneo;
- Cenário 3.2: Utilização de apenas um posto de carregamento Ultra Rápido;

##### **Cenário 3.1**

Para este cenário, consideraram-se os consumos correspondentes à utilização simultânea dos 2 PC-VE, Tabela 5, e definiram-se as horas em que os postos de carregamento PC-VE 1 e PC-VE 2 estariam em utilização, tendo-se em conta o tempo necessário para a regeneração do BESS antes de iniciar um novo ciclo de carregamento, Figura 31.

Tabela 5- Cenário 3.1 - Condições de utilização dos PC-VE

Posto de Carregamento	VE		Bateria dos VE		Total a carregar por hora (kWh)	Carregador		
	Marca	VE/hora	Capacidade (kWh)	A carregar (%)		Potencia (kW)	Carga (kWh/min)	Tempo Total de carga (min)
PC-VE1	Audi E-Tron	2	95	80%	152	160,00	2,67	57
PC-VE2	Tesla Model S	2	100	80%	160	160,00	2,67	60
<b>TOTAIS</b>					<b>312</b>	<b>320</b>	<b>5,33</b>	

Nesta simulação entendeu-se ser necessário garantir que o estado de carga do BESS tinha de estar na capacidade máxima no início das horas de ponta ou, pelo menos, ter energia suficiente para garantir o carregamento do máximo número de VE durante esse período de ponta.

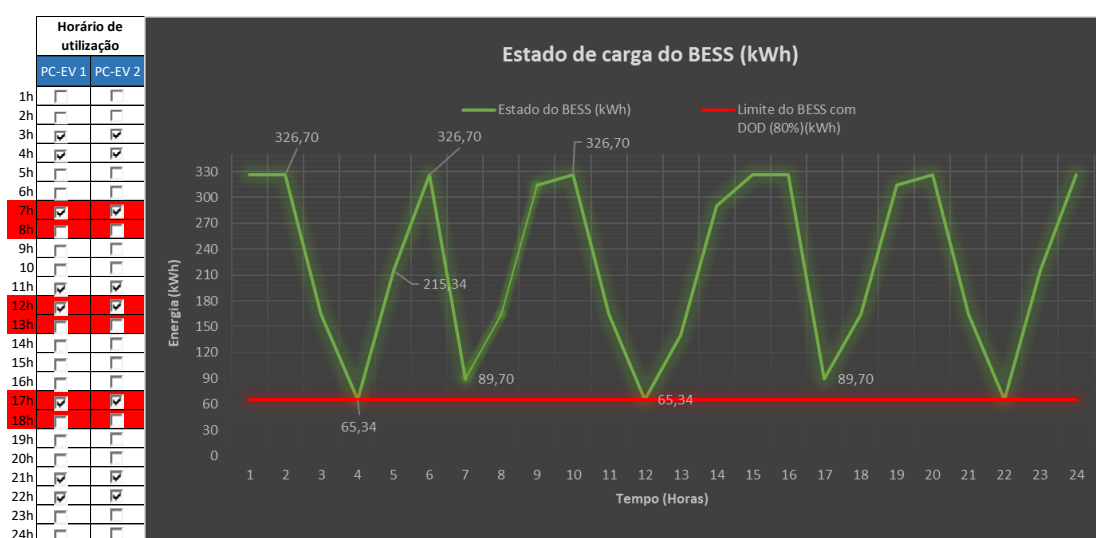


Figura 31- Cenário 3.1 - Estado de Carga do BESS ao longo do dia

Da análise do cenário, podemos concluir que o funcionamento dos 2 postos de carregamento em simultâneo, e ao longo do período definido (3h – 22h), obriga o BESS a fazer 5 ciclos de carga/descarga. Em termos de número de veículos carregados, e considerando que estão disponíveis para carregamento, em cada hora, um total de 4 VE, verifica-se que, neste cenário, o BESS conseguiria carregar um total de 32 veículos no período de 24 horas. No entanto, nas horas de ponta, só na primeira hora conseguiria garantir o carregamento dos VE e, na segunda hora, já estaria no período de regeneração.

### Cenário 3.2

Para este cenário, assumiu-se que apenas um posto de carregamento estaria em funcionamento (PCVE 2), e consideraram-se os consumos correspondentes apenas à utilização desse posto de carregamento por um Tesla Model S, conforme os valores apresentados na Tabela 6.

Tabela 6- Cenário 3.2 - Condições de utilização do PC-VE 2

Posto de Carregamento	VE		Bateria dos VE		Total a carregar por hora	Carregador		
	Marca	VE/hora	Capacidade	A carregar		Potencia	Carga	Tempo Total de carga (min)
			(kWh)	(%)	(kW)	(kWh/min)		
PC-VE1	Audi E-Tron	0	95	80%	0	160,00	2,67	0
PC-VE2	Tesla Model S	2	100	80%	160	160,00	2,67	60
<b>TOTAIS</b>					<b>160</b>	<b>320</b>	<b>5,33</b>	

Definiram-se igualmente as horas em que o posto de carregamento estaria em utilização, Figura 32. Tal como no cenário anterior, para esta simulação pretendeu-se garantir que o estado de carga do BESS tinha de estar na capacidade máxima no início das horas de ponta ou, pelo menos, ter energia suficiente para garantir o carregamento dos VE previstos no início da hora de ponta.

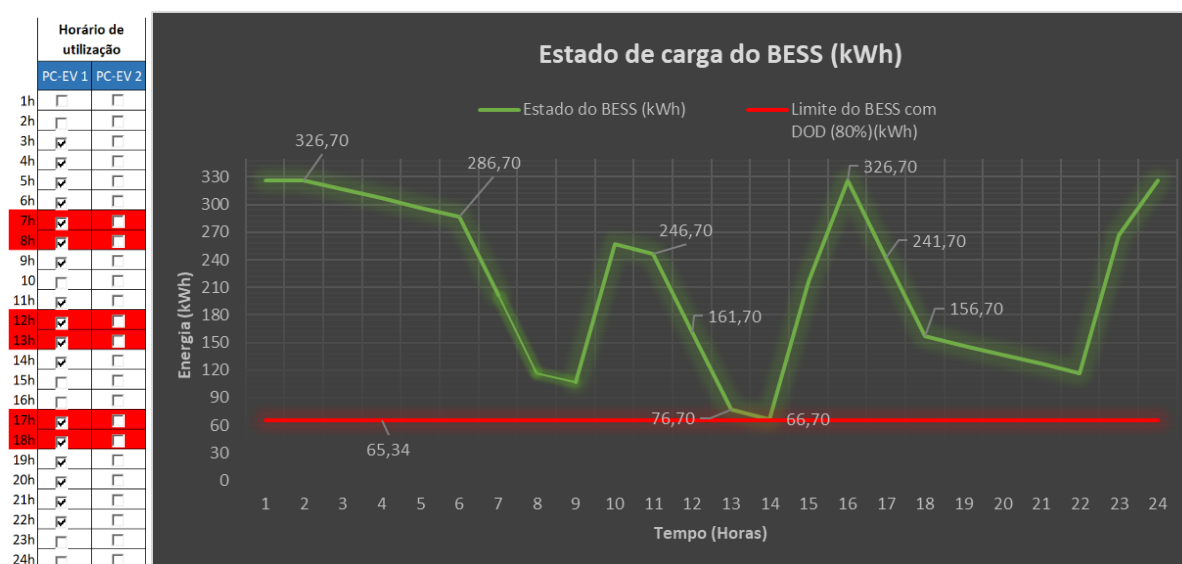


Figura 32- Cenário 3.2 - Estado de Carga do BESS ao longo do dia

Da análise deste cenário, podemos desde logo concluir que o funcionamento de apenas 1 posto de carregamento é menos exigente, do ponto de vista energético, do que o cenário

anterior, representando menos ciclos de carga/descarga para o BESS, o que pode favorecer o tempo de vida útil das baterias do sistema BESS. Em termos de número de veículos carregados, e considerando que em cada hora se carregam 2 VE, neste cenário, e à semelhança do Cenário 3.1, seria possível carregar um total de 34 veículos no período de 24 horas. Para além disso, neste cenário foi garantido o carregamento dos VE nas horas de ponta.

## 5. CONCLUSÕES

A variedade de aplicações que o armazenamento de energia pode assumir é ampla. Como recurso de produção, o armazenamento pode fornecer serviços de suporte de capacidade semelhantes aos recursos tradicionais, como fornecer a capacidade de reserva necessária. Como recurso de rede, o armazenamento pode melhorar a eficiência do sistema, aliviando o congestionamento da transmissão e aumentando a flexibilidade operacional. Por fim, como um ativo a ser colocado antes do contador, o armazenamento de energia pode fornecer uma variedade de serviços aos consumidores finais de energia, como energia de backup ou fazer a própria gestão de energia.

Ainda assim, existem questões maiores em torno do verdadeiro valor do armazenamento de energia, como o valor geral que o armazenamento fornece à rede, aos produtores de energia e aos consumidores, não sendo fácil atribuir um valor ao armazenamento de maneira que beneficie as partes interessadas e incentive a sua utilização.

Com o caso de estudo apresentado pretendeu-se demonstrar que, na situação em que se prevê um crescimento do mercado da mobilidade elétrica, tanto os operadores da rede de distribuição como o setor empresarial, para fazer face às futuras exigências de potência sobre a infraestrutura elétrica atual, terão de investir em soluções, por um lado, que evitem

ou permitam adiar o investimento em reforço da rede elétrica e, por outro lado, do ponto de vista empresarial, permitam criar e fazer crescer uma rede de postos de carregamento elétrico de alta performance, mesmo havendo limitações de disponibilidade de potência na rede elétrica.

No âmbito da análise ao sistema BESS proposto, e da sua aplicação à mobilidade elétrica, ficou mostrado que, diferentes condições operacionais resultam num impacto diferente na capacidade de resposta ao número de carregamentos consecutivos e, também, na capacidade de regeneração do sistema.

Na análise do comportamento do BESS nas condições do cenário 3, ao longo do período de 24h, também podemos concluir que o sistema faz mais ciclos de carga/descarga quando os PC-VE estão em funcionamento simultâneo (Cenário 3.1) e carrega menos 2 VE do que no Cenário 3.2, onde apenas 1 PC-VE está em funcionamento. Também se verifica que no Cenário 3.1, o BESS é apenas capaz de disponibilizar energia na primeira hora de ponta, e na segunda hora já está em regeneração, enquanto que no Cenário 3.2, o BESS consegue manter o apoio à rede e garantir o carregamento dos VE durante todos os períodos de horas de ponta. No entanto, tratando-se de um caso simulado, a probabilidade dos postos de carregamento terem a todas as horas do dia, o mesmo número de VE para carregamento será pouco real, o que nos leva a concluir que, numa situação real, em que os 2 postos de carregamento estejam em funcionamento simultâneo, a capacidade energética do BESS não seria capaz de satisfazer os consumos nas horas de ponta, onde se prevê no futuro poderem haver mais VE para carregamento.

Nas simulações dos cenários de carregamento, feitos com base num volume de visitas aos postos de carregamento que, ao dia de hoje, ainda são pouco prováveis, conclui-se que poderá fazer sentido ter reservado no edifício do BESS, espaço adicional que permita aumentar o nº de racks de baterias, de forma a garantir, no *worst case scenario*, o carregamento consecutivo dos VE durante, pelo menos, as 2 horas de ponta, ou seja, garantir que a capacidade utilizável de energia seja, no mínimo, 312 kWh, uma vez que é expectável que sejam os períodos de maior solicitação dos postos de carregamento.

Face ao crescimento atual que o mercado dos veículos elétricos está a apresentar, será inevitável que este tipo de aplicações para os sistemas BESS sejam fundamentais como

suporte à rede elétrica local e, também, como contribuidores para a disseminação de postos de carregamento ultra rápidos, públicos e privados, permitindo atenuar o problema da autonomia dos veículos elétricos e reduzir os tempos de carga necessários, sem afetar a rede elétrica existente.

O sistema BESS, mesmo associado a soluções de mobilidade elétrica, pode também trazer outras vantagens para além do suporte à rede por si só, nomeadamente, pode ser útil para reduzir custos com os carregamentos de VEs e melhorar as margens de lucro, quando programado para fazer a regeneração nos horários em que a energia é mais barata. Assim, pode também fazer sentido reforçar a capacidade energética do BESS, para absorver o máximo de energia possível nos períodos de vazio e super-vazio, e disponibilizar a energia nos períodos onde a energia é mais cara.

Por fim, este trabalho de dissertação, tendo sido focado numa abordagem mais técnica para validação de uma solução BESS, pode servir de base para uma continuidade na análise das vantagens dos sistemas BESS como apoio às redes elétricas, mas, numa abordagem do ponto de vista económico, poder fazer a validação desta solução ou encontrar o modelo de negócio mais vantajoso face aos futuros panoramas que se preveem para os sistemas elétricos de energia.

## Referências Bibliográficas

- [1] G. L. Tomas Diaz de la Rubia, Florian Klein, Budd Shaffer, Nathan Kim, “Energy storage: Tracking the technologies that will transform the power sector.”
- [2] J. Reilly *et al.*, “MIT JOINT PROGRAM ON THE SCIENCE AND POLICY OF GLOBAL CHANGE OUTLOOK FOOD • WATER • ENERGY • CLIMATE PERSPECTIVES FROM 2018.”
- [3] “ESA | Batteries.” [Online]. Available: <https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/solid-electrode-batteries/>. [Accessed: 11-Jun-2019].
- [4] “Electrochemistry Encyclopedia -- Volta and the ‘Pile.’” [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20120716205546/http://electrochem.cwru.edu/encycl/art-v01-volta.htm>. [Accessed: 11-Sep-2019].
- [5] F. Decker, “Volta and the ‘Pile,’” *Electrochemistry Encyclopedia*, 2005. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20120716205546/http://electrochem.cwru.edu/encycl/art-v01-volta.htm>. [Accessed: 24-Apr-2019].
- [6] K. M. Abraham, “Prospects and limits of energy storage in batteries,” *Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 6, no. 5. American Chemical Society, pp. 830–844, 05-Mar-2015.
- [7] A. Miranda, “Tecnologias de Armazenamento de Energia – Identificação do Potencial e Aplicações,” 2011.
- [8] IK4-TEKNIKER, “Baterías de flujo redox para el almacenamiento masivo de energía.” [Online]. Available: <https://www.tekniker.es/es/baterias-de-flujo-redox-para-el-almacenamiento-masivo-de-energia>. [Accessed: 12-Sep-2019].
- [9] B. Silva, “Estudo de Soluções Alternativas de Armazenamento de Energia para Diferentes Horizontes Temporais,” 2008.

- [10] “Power Electronics | Beacon Power.” [Online]. Available: <https://beaconpower.com/power-electronics/>. [Accessed: 15-Jul-2019].
- [11] J. Eyer and G. Corey, “SANDIA REPORT Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potential Assessment Guide A Study for the DOE Energy Storage Systems Program.”
- [12] Acore, “Beyond Renewable Integration: The Energy Storage Value Proposition Beyond Renewable Integration: The Energy Storage Value Proposition AMERICAN COUNCIL ON RENEWABLE ENERGY,” 2016.
- [13]. ::: “DEMOCRAT :::” [Online]. Available: [http://www.democrat-project.efacec.com/About/Res\\_Arch.html](http://www.democrat-project.efacec.com/About/Res_Arch.html). [Accessed: 03-Sep-2019].
- [14] B. Tasker, D. Kubina, M. Šebek, T. Vojáček, and P. Vabroušek, “ESS 320kW Container Specification Optimized for EV charging optionally with integrated 2x160kW HPC,” 2018.
- [15] M. Ribeiro, I. Miranda, and Miranda, “DEMOCRAT Deliverable 3.1-Specification of the energy storage system,” 2018.
- [16] “PYLON’s PowerCube ESS Product Solution Pylon Technologies,” 2018.
- [17] “Electric car range and efficiency (EPA) - PushEVs.” [Online]. Available: <https://pushevs.com/electric-car-range-efficiency-epa/>. [Accessed: 02-Oct-2019].
- [18] Efacec, “Datasheet-Ultra Fast Charge Station Product description,” 2019.

## Anexo A. Tecnologias de armazenamento de energia

Neste anexo são descritas as principais características das atuais tecnologias de armazenamento de energia.[3]

Technologies	Power rating (MW)	Storage duration (h)	Cycling or lifetime	Self-discharge (%)	Energy density (Wh/l)	Power density (W/l)	Efficiency (%)	Response time
Super-capacitor	0.01-1	ms-min	10,000-100,000	20-40	10-20	40,000-120,000	80-98	10-20ms
SMES	0.1-1	ms-min	100,000	10-15	~6	1000-4000	80-95	< 100ms
PHS	100-1,000	4-12h	30-60 years	~0	0.2-2	0.1-0.2	70-85	sec-min
CAES	10-1,000	2-30h	20-40 years	~0	2-6	0.2-0.6	40-75	sec-min
Flywheels	0.001-1	sec-hours	20,000-100,000	1.3-100	20-80	5,000	70-95	10-20ms
NaS battery	10-100	1min-8h	2,500-4,400	0.05-20	150-300	120-160	70-90	10-20ms
Li-ion battery	0.1-100	1min-8h	1,000-10,000	0.1-0.3	200-400	1,300-10,000	85-98	10-20ms
Flow battery	0.1-100	1-0h	12,000-14,000	0.2	20-70	0.5-2	60-85	10-20ms
Hydrogen	0.01-1,000	min-weeks	5-30 years	0-4	600 (200 bar)	0.2-20	25-45	sec-min
SNG	50-1,000	hours-weeks	30 years	negligible	1,800 (200 bar)	0.2-2	25-50	sec-min

Electrical   
 Mechanical   
 Electrochemical   
 Chemical

## Anexo B. Inversor Carregador- Características

<b>Efacec Bat. Inverter 320</b>	
Maximum AC-Power	320 kVA
Rated AC-Power	320 kW
Rated grid voltage	400V
Rated grid frequency	50Hz
Grid frequency accuracy	N/A
Maximum AC-current	509 A (subject to change if voltage is configured)
Short circuit level	N/A
Power factor (cos $\varphi$ )	N/A
AC-current distortion (THD)	< 3 %
Efficiency	98,4%
<b>Protective Devices</b>	
DC disconnect device	•
AC disconnect device	Circuit breaker
DC overvoltage protection	•
AC overvoltage protection	•
Auxiliaries overvoltage protection	•
Ground fault monitoring	•
Overvoltage	•
Undervoltage	•
Overfrequency	•
Underfrequency	•
Anti-islanding	•
Reverse polarization	•
Short circuit on the output	•
Overtemperature	•
Asymmetrical current	•
Grid Support	LVFRT, HVRT, P(f), Q(U), PQ setpoint, Off-grid and black-start
<b>General Data</b>	
Ambient temperature	-10 °C ... +50 °C
Max. Permissible value for relative humidity (noncondensing)	15% ... 95%
Cooling concept	Air forced cooling
Color	RAL 7035
Dimensions (WxDxH)	1200 x 600 x 1900 mm
Weight	850 kg
Protection degree	IP20
Protective class	I
<b>Standards</b>	
CE marking	Yes
Safety/EMC	EN 50178 / EN 61000-6-2, EN 61000-6-4
Grid interface	IEC 62116, Flexible grid code control mode
<b>Interfaces</b>	
Local Human Machine Interface	4.3" Color, touch screen
Remote interface	Web Virtual HMI
Communication	Modbus TCP/RTU
Data storage	Datalogger