



OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA HÍBRIDO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA MELHOR DESEMPENHO EM CUSTO E VIDA ÚTIL

MIGUEL ANDRÉ PINTO PRETO

fevereiro de 2024

OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA HÍBRIDO DE
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA
MELHOR DESEMPENHO EM CUSTO E VIDA
ÚTIL

Miguel André Pinto Preto

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de
Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: Miguel André Pinto Preto, Nº 1180536, 1180536@isep.ipp.pt

Orientação científica: Professor Alexandre Silveira, asi@isep.ipp.pt

Empresa: INESC TEC

Supervisão: Engenheiro Alexandre Lucas, alexandre.lucas@inesctec.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Área de Especialização em Sistemas e Planeamento Industrial

2024

Para os meus avós

Agradecimentos

Antes de mais, gostaria de expressar a minha profunda gratidão para todos aqueles que me apoiaram e contribuíram de maneira significativa para concluir o meu percurso académico.

Desta forma, primeiramente gostaria de agradecer ao INESC TEC, pela oportunidade e experiência oferecida, em particular ao Sr. Engenheiro Alexandre Lucas, pelos conhecimentos transmitidos, acompanhamento e apoio constante ao longo do desenvolvimento do projeto.

Neste seguimento, expresso igualmente o meu sincero agradecimento ao Orientador deste projeto, Sr. Professor Engenheiro Alexandre Silveira, pela sua total disponibilidade, que permitiu a sólida evolução do trabalho desenvolvido.

À minha família, especialmente aos meus pais e irmã, pelos esforços incansáveis no sentido de me proporcionarem todas as oportunidades, e sobretudo por nunca deixarem de acreditar em mim. Sem eles não seria possível.

Por fim, mas não menos importante, aos meus amigos, por me ensinarem o significado da amizade e companheirismo. Partilhamos histórias que irei guardar como memórias inesquecíveis para o resto da vida.

A todos, o meu muito obrigado!

"I've missed more than 9000 shots in my career. I've lost almost 300 games. 26 times, I've been trusted to take the game winning shot and missed. I've failed over and over and over again in my life. And that is why I succeed."

Michael Jordan

Resumo

O desenvolvimento em larga escala das energias renováveis introduz novos desafios nos sistemas de energia, resultando em maior volatilidade no equilíbrio entre a geração e produção de energia nos mercados de eletricidade liberalizados. O armazenamento de energia desempenha um papel essencial na redução desse desequilíbrio, aliviando o congestionamento da rede e, assim, aprimorando a estabilidade e a confiabilidade do sistema.

A escolha de um sistema de armazenamento de energia depende de vários fatores, incluindo a localização, a carga, a fonte de energia elétrica, os custos associados, bem como os impactos ambientais. As soluções de armazenamento híbrido têm o potencial polivalente e flexível e por esse motivo tem recebido atenção especial com visto o seu desempenho superior em algumas aplicações específicas.

Este projeto tem como objetivo comparar o desempenho de um sistema híbrido de armazenamento de energia com o de uma única bateria, levando em consideração o custo de fornecimento de energia e o impacto ambiental. Para isso, aplicam-se dois problemas de otimização sendo que o modelo de programação linear gera um despacho de carregamento ótimo da bateria para fornecimento de energia, seja minimizando os custos ou o impacto ambiental, para uma carga genérica, incluindo a parcela responsável pelos custos da energia e a degradação das baterias.

Foram analisados dois cenários, considerando o custo comparativo e o impacto ambiental aplicados a um edifício. Para cada cenário, foi feita a comparação de um sistema singular composto por uma bateria de lítio, com um sistema híbrido composto por um grupo de uma bateria de lítio e uma de cada uma das outras 6 tecnologias. Os resultados demonstram que parâmetros de desempenho, como eficiência e curva de degradação, exercem um impacto significativo nos custos finais e no impacto ambiental de várias tecnologias de armazenamento.

Palavras-Chave: Sistemas Híbridos de Armazenamento de Energia, Baterias de Vanádio, Otimização, Degradação de Baterias, Redução de Emissões.

Abstract

The large-scale development of renewable energies introduces new challenges to energy systems, resulting in increased volatility in the balance between energy generation and production in liberalized electricity markets. Energy storage plays an essential role in mitigating this imbalance, relieving network congestion, and thereby enhancing system stability and reliability.

The choice of an energy storage system depends on various factors, including location, load, power source, associated costs, as well as environmental impacts. Hybrid storage solutions have versatile and flexible potential and, for this reason, have received special attention due to their superior performance in specific applications.

This project aims to compare the performance of a hybrid energy storage system with that of a single battery, considering energy supply costs and environmental impact. To achieve this, two optimization problems are applied. The linear programming model generates an optimal battery charging dispatch for energy supply, either minimizing costs or environmental impact, for a generic load, including the portion responsible for energy costs and battery degradation.

Two scenarios were analyzed, considering comparative cost and environmental impact applied to a building. For each scenario, a comparison was made between a singular system composed of a lithium battery and a hybrid system composed of a lithium battery and one each of the other six technologies.

The results demonstrate that performance parameters such as efficiency and degradation curve have a significant impact on the final costs and environmental footprints of various storage technologies.

Keywords: Hybrid Energy Storage Systems, Vanadium Batteries, Optimize, Battery Degradation, Emission reduction.

Índice

AGRADECIMENTOS	VIII
RESUMO.....	XII
ABSTRACT.....	XV
ÍNDICE.....	XVII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XXI
ÍNDICE DE TABELAS.....	XXV
ACRÓNIMOS	XXVII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2.OBJETIVOS.....	2
1.3.CALENDARIZAÇÃO	3
1.4.ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	4
2. ESTADO DE ARTE	5
2.1.SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	8
2.2.SISTEMAS HÍBRIDOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	9
2.3.SISTEMAS ELETROQUÍMICOS.....	9
2.3.1. <i>Baterias lão Lítio</i>	10
2.3.2. <i>Baterias de chumbo</i>	11
2.3.3. <i>Baterias redox Fluxo de vanádio (VRFB)</i>	12
2.3.4. <i>Baterias de Níquel</i>	13
2.3.5. <i>Baterias de Sódio-Enxofre(NAS)</i>	13
2.4.SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA	14
2.4.1. <i>Condensadores eletroquímicos</i>	14
2.5.SISTEMAS DE ENERGIA TÉRMICA	15
2.5.1. <i>Calor sensível</i>	15
2.5.2. <i>Calor latente</i>	16
2.5.3. <i>Reações químicas</i>	16
2.6.SISTEMAS DE ENERGIA MECÂNICA.....	16
2.6.1. <i>Volante de Inércia</i>	17
2.6.2. <i>Ar comprimido</i>	17
2.6.3. <i>Bombagem Hidroelétrica</i>	18
2.7.ARMAZENAMENTO QUÍMICO	19

2.8. COMPARAÇÃO TECNOLÓGICA.....	20
3. MODELO	21
3.1. TRABALHOS RELACIONADOS	21
3.2. MODELIZAÇÃO.....	22
3.3. DEGRADAÇÃO.....	24
3.4. IMPACTO AMBIENTAL	26
4. IMPLEMENTAÇÃO	30
4.1. LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO/ SOFTWARE	30
4.1.1. Python.....	30
4.1.2. Pycharm	31
4.2. BESS.....	32
4.3. OPTIMIZER	32
4.4. MAIN.....	34
5. DEMONSTRAÇÕES E RESULTADOS	35
5.1. DEMONSTRAÇÃO.....	35
5.2. SIMULAÇÕES.....	36
6. API	45
6.1. API.....	45
6.2. REST API	46
6.3. FASTAPI	47
6.4. IMPLEMENTAÇÃO/ FUNCIONALIDADES DA API	48
6.5. TESTES API	49
7. CONCLUSÕES	51
REFERÊNCIAS.....	54
ANEXO A.	59
ANEXO B.	61

Índice de Figuras

Figura 1 – Calendarização.....	3
Figura 2 - Acumulação global de instalações de armazenamento de energia [4].....	6
Figura 3 – Produção de eletricidade renovável em Portugal 2022 [6].....	7
Figura 4 - Sistemas de armazenamento de energia e tecnologias correspondentes.....	8
Figura 5 – Curvas de degradação Lítio e Vanádio [27].....	26
Figura 6- Fronteiras do sistema considerados [25].....	27
Figura 7 – Arquitetura do sistema.....	36
Figura 8 – Preços diários de mercado ENTO-E (esquerda) e os incentivos das emissões (direita).....	37
Figura 9 – Input previsão de carga do edificio do parceiro industrial.....	38
Figura 10 – Exemplo de um despacho diário de uma bateria Lítio única (esquerda) e do sistema híbrido Li e VRFB (direita) utilizando FO1.....	41
Figura 11 – Exemplo do estado de carga (SOC) de uma bateria Lítio única (esquerda) e do sistema híbrido Lítio e VRFB (direita) utilizando FO1.....	41
Figura 12 - Exemplo de um despacho diário de uma bateria Lítio única (esquerda) e do sistema híbrido Li e VRFB (direita) utilizando FO2.....	42
Figura 13– Exemplo do estado de carga (SOC) de uma bateria Lítio única (esquerda) e do sistema híbrido Lítio e VRFB (direita) utilizando FO2.....	42
Figura 14 – Classe BESS.....	61
Figura 15 – Classe <i>Optimizer</i> (método: <i>Initialize</i>).....	62

Figura 16 – Definição do problema e das variáveis de decisão.....	63
Figura 17 – Função Objetivo.....	63
Figura 18 – Restrições do problema.....	64
Figura 19 – Classe <i>Optimizer</i> (método: <i>Solve milp</i>).....	64
Figura 20 - Classe <i>Optimizer</i> (método: <i>Generate_outputs</i>).....	65
Figura 21 – Função <i>read_data</i>	66
Figura 22 – Função <i>optimize</i>	67

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Características técnicas de cada sistema de armazenamento de energia.....	20
Tabela 2 - Custo Total de Capital para cada tecnologia [15].....	25
Tabela 3 – Sumario do LCA de cada tecnologia de armazenamento de energia [25].....	29
Tabela 4- Resultados para cada tecnologia considerando custos de energia (FO1).....	39
Tabela 5 - Resultados para cada tecnologia considerando emissões (FO2).....	40
Tabela 6 – <i>Endpoints</i>	49

Acrónimos

AIE	–	Agência Internacional de Energia
API	–	Application Programming Interface
BESS	–	Battery Energy Storage System
BNEF	–	BloombergNEF
CAES	–	Compressed Air Energy Storage
CED	–	Cumulative Energy Demand
Coin-OR	–	Computational Infrastructure for Operations Research
DER	–	Recursos de Energia Distribuída
DES	–	Sistemas de Armazenamento de Energia Distribuída
DOD	–	Depth of Discharge
EMS	–	Energy Management System
ESS	–	Energy Storage System
GWP	–	Global Warming Potential
HESS	–	Hybrid Energy Storage System
HTTP	–	Hypertext Transfer Protocol
IDE	–	Integrated Development Environment
INESCTEC	–	Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência

- LCA – Life Cycle Assessment
- MILP – Mixed Integer Linear Programming
- NaS – Sódio Enxofre
- Ni-Cd – Níquel-Cadmio
- PHS – Pumped Hydro Storage
- RESTAPI - Representational State Transfer Application Programming Interface
- SOC – State of Charge
- VRFB – Vanadium Redox Flux Battery

1. INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo são apresentados os objetivos do projeto, bem como a sua contextualização e enquadramento, identificando o problema que se pretende resolver e os resultados que se pretendem obter. Para além disso é apresentada a calendarização e o planeamento do projeto e a organização da estrutura do relatório.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O presente trabalho foi realizado no âmbito da unidade curricular Tese/Dissertação/Estágio (TEDI) do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores – Ramo de Sistemas e Planeamento Industrial (SPI) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), tendo como local de realização o Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência (INESC TEC).

O INESC TEC é uma associação privada sem fins lucrativos, com estatuto de utilidade pública, que se centra em atividades de investigação científica e desenvolvimento tecnológico, transferência de tecnologia, consultoria avançada e formação, e pré-incubação de novas empresas de base tecnológica.

Este projeto faz parte do InterStore, um projeto financiado pela União Europeia (UE). A visão geral do InterStore é desenvolver e demonstrar um conjunto de ferramentas de código aberto interoperáveis para a integração de Sistemas de Armazenamento de Energia Distribuída (DES) e Recursos de Energia Distribuída (DER) que possibilitará a hibridização, utilização e monetização da flexibilidade do armazenamento dentro de um ambiente de mundo real.

1.2. OBJETIVOS

O presente projeto surgiu da quase inexistência na literatura de sistemas híbridos de armazenamento de energia baseados na performance custo, degradação e impacto ambiental, tendo como principal objetivo abordar essa lacuna e proporcionar avanços significativos nessa área.

Assim sendo, este trabalho tem como foco central o desenvolvimento de um modelo que vai gerar um despacho de recomendação de carregamento da tecnologia de armazenamento, de modo a demonstrar o maior desempenho de um sistema híbrido, otimizando o custo de fornecimento de energia elétrica para uma carga genérica (que é um edifício de escritórios, sendo suportada por um HESS (sistema híbrido de armazenamento de energia), ao mesmo tempo em que aumenta a vida útil de os sistemas de armazenamento, em comparação com um caso base de uma única bateria. Deste modo, foram estabelecidos os seguintes objetivos:

- Estudo e análise do projeto
- Desenvolvimento do Modelo de Otimização
- Desenvolvimento de uma REST API para integração com uma aplicação Web

1.3. CALENDARIZAÇÃO

O projeto teve uma duração de aproximadamente 9 meses, iniciando no dia 1 de março de 2023 e tendo sido dado como concluído no dia 15 de dezembro de 2023. Durante esse período, o relatório foi elaborado simultaneamente ao desenvolvimento do projeto.

A primeira fase compreendeu um estudo abrangente do estado da arte, abordando tecnologias e conceitos relacionados ao tema do projeto. Na segunda etapa, que ocorreu entre os meses de abril e agosto, o foco foi direcionado para o funcionamento e desenvolvimento do modelo em si.

A terceira etapa, realizada entre agosto e dezembro, concentrou-se no desenvolvimento de uma REST API (Representational State Transfer Application Programming Interface) para integração com uma aplicação *web*. Por fim, a implementação destes requisitos estendeu-se até o dia 15 de dezembro, marcando a conclusão integral do projeto. A figura 1 representa a calendarização do projeto.

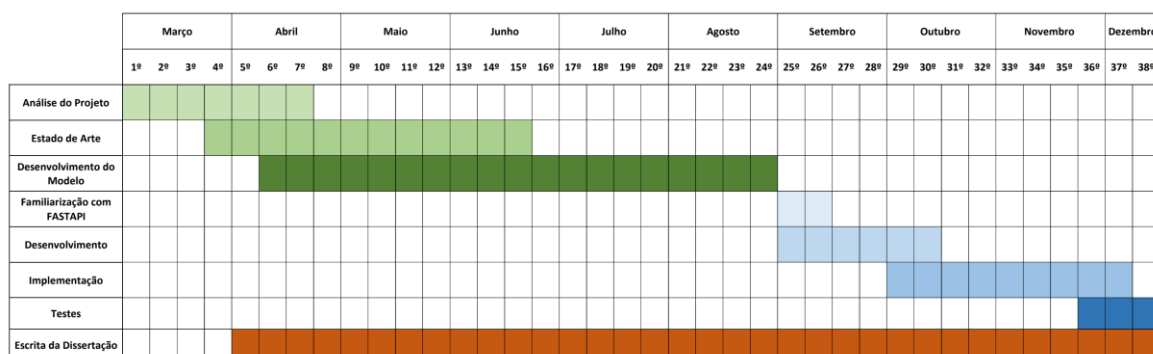


Figura 1 – Calendarização

1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

O relatório está organizado em sete capítulos, estruturados de modo a auxiliar o leitor a entender o processo de desenvolvimento deste projeto.

No primeiro capítulo é feita a introdução ao projeto, a contextualização do problema a resolver, os objetivos a atingir, a calendarização e a organização do relatório.

No segundo capítulo, é abordado o estado da arte, apresentando abordagens teóricas necessárias para a compreensão e realização deste trabalho. Inicialmente com uma visão geral da energia no mundo e em Portugal, e em seguida apresentados e detalhados algumas das tecnologias de armazenamento de energia.

O terceiro capítulo, aborda a metodologia subjacente ao modelo utilizado, realizando uma análise que incorpora a degradação e o impacto ambiental.

O quarto capítulo foca na implementação do código com a explicação detalhada de cada componente do código.

No quinto capítulo são apresentados alguns testes funcionais ao sistema, bem como interpretados os resultados obtidos dos diferentes componentes do trabalho prático desta dissertação e avaliar se estes vão de encontro com o pretendido

No sexto capítulo, são descritas as tecnologias fundamentais que foram empregues no desenvolvimento da API, as principais funcionalidades da API, incluindo a descrição dos *endpoints* e a estratégia de testes adotada para garantir a funcionalidade e confiabilidade da API.

Por fim, o último capítulo (Conclusão) realiza uma avaliação ao trabalho desenvolvido, mediante a apresentação dos objetivos atingidos. Descreve ainda as direções a seguir num desenvolvimento futuro em conjunto com algumas limitações encontradas. Para concluir, apresenta uma apreciação pessoal acerca do trabalho realizado

2. ESTADO DE ARTE

A geração global de eletricidade ainda depende em grande parte de fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis, como carvão, gás natural e combustíveis líquidos. No entanto, essa dependência apresenta duas questões críticas. Primeiramente, há a preocupação com o esgotamento iminente dos combustíveis fósseis, previsto para ocorrer dentro de aproximadamente 100 anos. Além disso, o uso dessas fontes de energia resulta na emissão de gases de efeito estufa e outros poluentes prejudiciais que têm impactos negativos nos ecossistemas e na saúde humana [1].

Por outro lado, os avanços tecnológicos no campo do armazenamento de energia estão a tornar cada vez mais atraente a sua integração e o armazenamento de eletricidade na rede elétrica, desempenhando um papel crucial na redução da pegada ambiental.

Em consonância com a recomendação da Comissão Europeia, que tem como objetivo principal alcançar a neutralidade carbónica até 2050, tem-se observado um considerável aumento nos investimentos em sistemas de armazenamento de energia. De acordo com a mais recente previsão da *BloombergNEF* (BNEF) [2], a capacidade global de instalações de armazenamento de energia deve atingir um total acumulado de 411 GW até o final de 2030. A Figura 2 apresenta uma projeção da evolução global da capacidade acumulada de instalações de armazenamento de energia.

Os Estados Unidos e a China deverão manter as suas posições como os dois maiores mercados, representando mais da metade das instalações globais até o final da década. No entanto, a Europa está a viver um aumento significativo na capacidade de armazenamento, impulsionada pela crise atual de energia. A recente invasão da Ucrânia pela Rússia teve um impacto evidente nas implantações de armazenamento de energia na Europa. De acordo com a BNEF, os preços recordes da eletricidade estão a levar os consumidores a considerar novas formas de abastecimento de energia, o que está a impulsionar o mercado de armazenamento residencial a curto prazo [2].

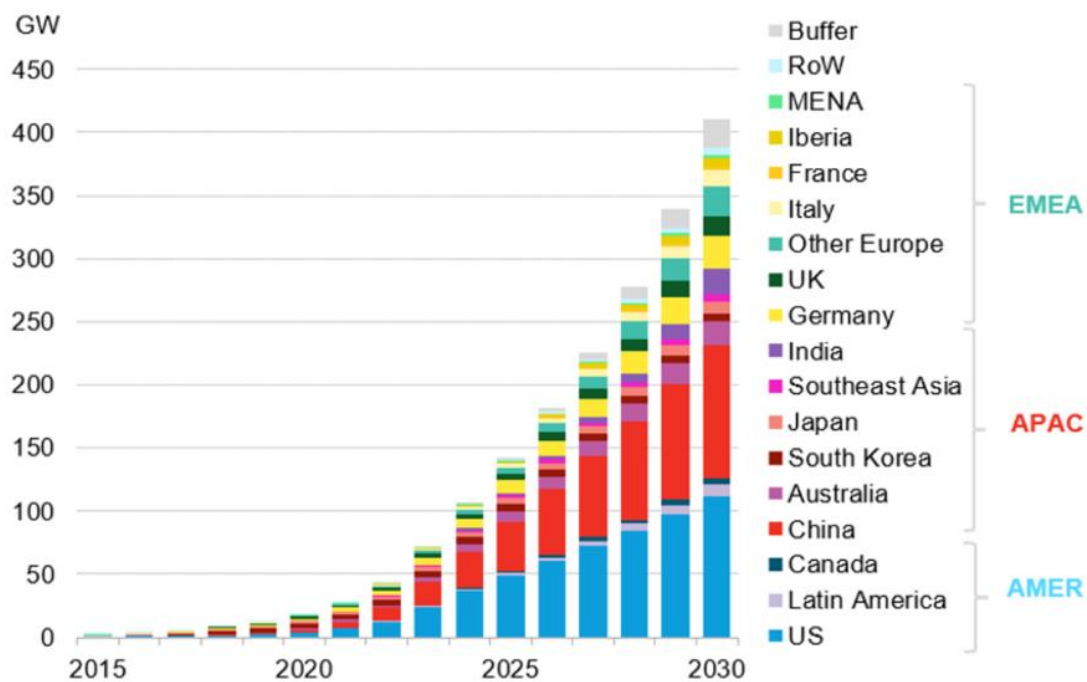


Figura 2 - Acumulação global de instalações de armazenamento de energia, 2015-2030 [3]

A Europa tem feito investimentos significativos em baterias para apoiar a integração das energias renováveis, melhorar a estabilidade da rede elétrica e promover a transição para um futuro energético mais limpo. De acordo com um relatório da Agência Internacional de Energia (AIE), a capacidade de armazenamento de baterias na Europa atingiu 3,2 gigawatts (GW) no final de 2020, representando um aumento considerável em relação aos 0,4 GW registados em 2016. O mesmo relatório projetou que a capacidade instalada de armazenamento de baterias na Europa crescerá para mais de 18 GW até 2025. Isto reflete o rápido crescimento do mercado europeu de armazenamento de energia [3].

Em 2020, o valor de mercado desse setor na Europa foi estimado em cerca de 1,9 € bilião [4]. No entanto, à medida que as implantações aumentam e os custos diminuem, espera-se um crescimento substancial nos próximos anos que possibilitará a integração eficaz das energias renováveis, o equilíbrio da rede elétrica, o apoio às comunidades de energias renováveis e a prestação de uma ampla gama de serviços.

Apesar da significativa dependência mundial de energia fóssil, Portugal tem a particularidade de não possuir fontes significativas de energia fóssil, sendo a maioria importada. A desativação da Central Termoelétrica de Sines em janeiro de 2021 marcou o fim da produção de eletricidade a partir do carvão em Portugal.

Em 2022, como ilustrado na figura 3, e seguindo os objetivos do Plano Nacional de Energia e Clima, Portugal alcançou aproximadamente 56,3% da geração de eletricidade proveniente de fontes renováveis. A energia eólica (28,8%) e a hidroelétrica (14,2%) e a biomassa (7,4%) combinadas satisfizeram mais da metade (50,4%) da geração de eletricidade. As demais tecnologias de energia renovável totalizaram 6%, incluindo energia solar fotovoltaica (5,6%) e geotermia (0,4%). Em 2022, dos 1 255 MW de capacidade instalada, a maioria foi proveniente da energia solar fotovoltaica, com 860 MW, enquanto os restantes MW foram de energia hídrica [5].

Até 2030, espera-se que o crescimento continue, especialmente na energia solar fotovoltaica, e há a possibilidade de que a energia eólica *offshore* alcance 10 GW de potência instalada. Atualmente, cerca de 95% do armazenamento de energia para conversão em eletricidade é fornecido pelas centrais hidroelétricas [6]. No entanto, a capacidade de armazenamento de baterias está em crescimento, pois o modelo energético futuro baseia-se na produção renovável, que é intermitente e requer armazenamento intermediário. Esse armazenamento, por motivos de poupanças na distribuição, precisará ser realizado localmente em edifícios e integrado em microrredes inteligentes. Nesse sentido, o papel das baterias é crucial, estando já em ação para atender a essa procura vários projetos como por exemplo, o projeto Baterias 2030 [7]

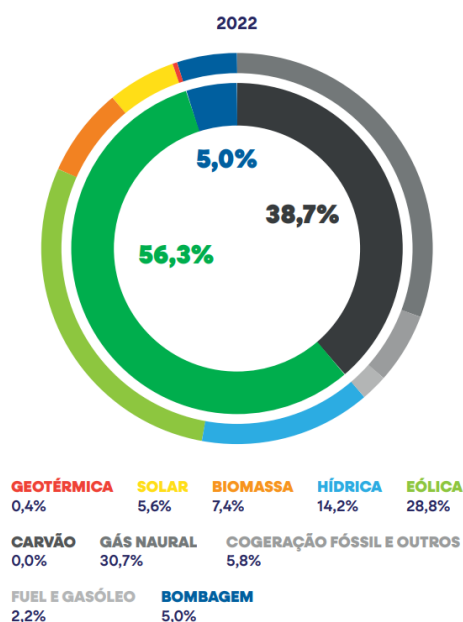


Figura 3 – Produção de eletricidade renovável em Portugal 2022 [5]

2.1. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

O desenvolvimento em larga escala das energias renováveis pode trazer consigo novos desafios para os sistemas de energia, incluindo uma maior volatilidade nos preços da energia nos mercados de eletricidade liberalizados. A fim de atenuar esse desequilíbrio entre consumo e produção, bem como aliviar o congestionamento da rede, tornando-a mais estável e confiável, o armazenamento de energia torna-se uma peça fundamental.

Um Sistema de Armazenamento de Energia (ESS) é uma solução que converte a energia, geralmente na forma de eletricidade, em outra forma que pode ser armazenada em um meio de armazenamento e, posteriormente, convertida de volta em eletricidade quando necessário. Por meio desse processo, um ESS armazena eletricidade quando a procura é baixa e liberta quando a procura é alta, proporcionando uma flexibilidade operacional significativa à rede elétrica e reduzindo a intermitência [6].

As aplicações típicas de sistemas de armazenamento de energia abrangem setores como transporte, dispositivos portáteis e a rede de energia. A figura 4 ilustra os diversos tipos de sistemas de armazenamento de energia e tecnologias correspondentes.

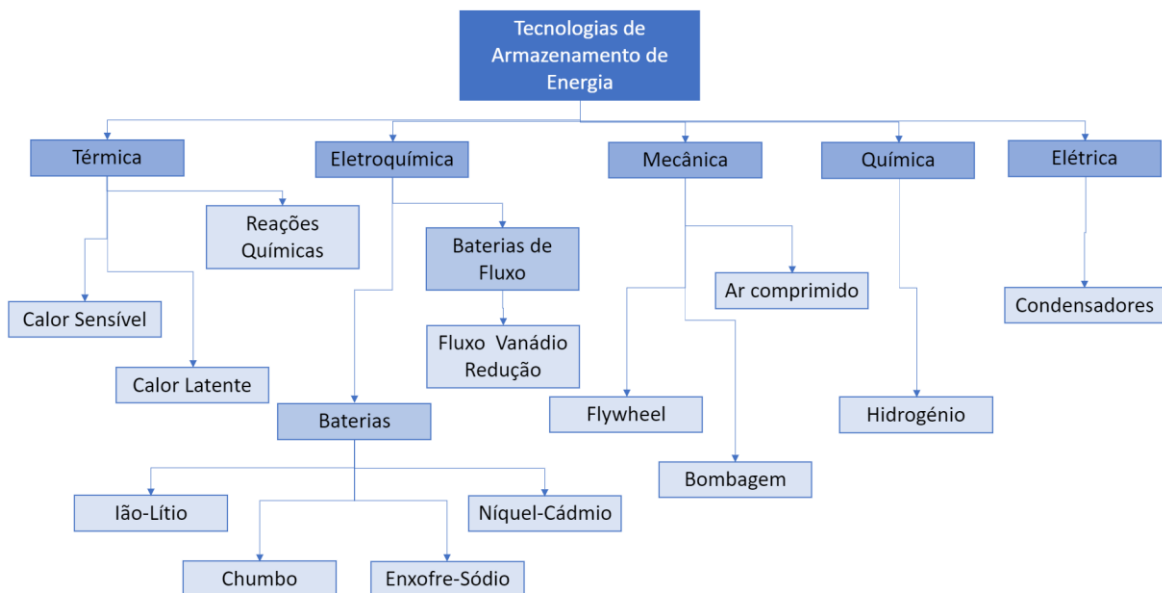


Figura 4 - Sistemas de armazenamento de energia e tecnologias correspondentes

2.2. SISTEMAS HÍBRIDOS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

O desenvolvimento dos Sistemas Híbridos de Armazenamento de Energia (HESS) surgiu como resposta à necessidade de encontrar soluções que combinem as melhores características de diversas tecnologias.

Assim, com o decorrer do tempo, verificou-se um aumento no desenvolvimento de várias tecnologias que apresentaram vantagens, mas também limitações, uma vez que nenhuma das tecnologias era capaz de alcançar de forma abrangente todos os requisitos e exigências de maneira otimizada. Reconhecendo essa diversidade e complexidade, os investigadores e especialistas começaram a explorar a possibilidade de combinar duas ou mais tecnologias num único sistema híbrido. Para esse efeito, os investigadores optaram por aproveitar as características mais robustas de cada tecnologia, procurando assim, complementar e superar as suas fraquezas. Desta forma, espera-se que o desempenho global do sistema híbrido seja superior ao alcançado por qualquer tecnologia individualmente [8].

Neste contexto, verifica-se a existência de diversas tecnologias de armazenamento de energia, que podem ser resumidas em cinco categorias principais: elétrica, eletromecânica, mecânica, térmica e química. Nas páginas seguintes irão ser explicadas estas novas tecnologias individualmente e as várias aplicações em que são utilizadas.

2.3. SISTEMAS ELETROQUÍMICOS

Alessandro Volta é amplamente reconhecido como o inventor da primeira bateria, o que ocorreu em 1800. Uma bateria é um dispositivo composto por uma ou mais células eletroquímicas que convertem energia química armazenada em energia elétrica. Cada célula consiste em um terminal positivo, conhecido como cátodo, e um terminal negativo, chamado ânodo [6], [9].

Desta forma as baterias armazenam energia sob a forma eletroquímica, criando iões eletricamente carregados. Durante o processo de carregamento, a corrente contínua é convertida em energia química. Quando a bateria é descarregada, essa energia é

novamente transformada em um fluxo de elétrons na forma de corrente contínua. Por outras palavras, os elétrons possibilitam a movimentação de íons entre os elétrodos e os terminais, gerando um fluxo de corrente elétrica [9].

Os avanços na tecnologia e nos materiais têm contribuído significativamente para aumentar a confiabilidade, a capacidade de produção e a densidade dos sistemas modernos de baterias, ao mesmo tempo em que reduzem os custos associados.

A tecnologia das baterias é geralmente subdividida em dois conceitos principais: baterias secundárias e baterias de fluxo. As baterias secundárias usam elétrodos para realizar tanto o processo de transferência de elétrons quanto para armazenar os produtos ou reagentes resultantes das reações no estado sólido do eletrodo [9]. Exemplos dessas baterias incluem as baterias de chumbo-ácido, níquel-cádmio, hidreto metálico de níquel, íon-lítio, sódio-enxofre, entre outras. Já as baterias de fluxo compreendem as baterias de fluxo vanádio redução [6], [9].

2.3.1. BATERIAS IÃO LÍTIO

As baterias de íon lítio são compostas por cátodos feitos de óxidos de vários metais, como cobalto, níquel, e alumínio, em combinação com lítio, ou alternativamente, fosfato de ferro e lítio. Estas baterias apresentam várias vantagens notáveis. Primeiramente, carregam rapidamente e descarregam lentamente. Além disso, possuem uma alta densidade de energia, não sofrem com o efeito memória e, praticamente, não perdem carga quando estão inativas [6], [10].

Inicialmente, as baterias de íon lítio foram desenvolvidas para dispositivos eletrônicos, mas devido ao seu sucesso, várias empresas estão a trabalhar no desenvolvimento de células para aplicação em sistemas de armazenamento de energia. Também são amplamente utilizadas em veículos elétricos [6], [10].

O sucesso destas células impulsionou a diversificação nas suas aplicações, resultando na criação de baterias de diferentes tamanhos e formatos. Isso varia desde células individuais até montagens complexas com vários módulos organizados em *packs*, adaptados para uma variedade de aplicações [6], [10].

No entanto, como acontece com qualquer tecnologia, as baterias de íon lítio também apresentam algumas desvantagens, principalmente relacionadas à proteção, já que requerem sistemas para prevenir sobrecargas e superaquecimento. Além disso, embora o custo tenha diminuído, a fabricação dessas baterias ainda é aproximadamente 40% mais cara do que as baterias de níquel-cádmio [6], [10].

É fundamental destacar que as baterias de íon lítio são projetadas para operar dentro de limites específicos de tensão e corrente, garantindo, assim, segurança e longevidade. Além disso, a pesquisa e o desenvolvimento contínuos procuram constantemente melhorar a eficiência, a densidade de energia, o custo e a segurança destas baterias.

2.3.2. BATERIAS DE CHUMBO

As baterias de chumbo representam a tecnologia de bateria recarregável mais amplamente adotada em todo o mundo. Desempenham um papel fundamental em diversos cenários, incluindo sistemas de alimentação de emergência, integração em sistemas fotovoltaicos, estabilização de flutuações em energia eólica e ainda como baterias de arranque em veículos [10].

A história de sucesso das baterias de chumbo no campo do armazenamento de energia é inegável, e ao longo do tempo, as suas capacidades e limitações foram cuidadosamente desenvolvidas. Estas baterias têm uma pegada ecológica favorável em comparação com outras tecnologias devido à disponibilidade de material de chumbo reciclável, que apresenta um valor positivo no final da sua vida útil. Tipicamente, as baterias de chumbo têm uma vida útil típica que varia de 6 a 15 anos, com cerca de 1500 ciclos de carga e descarga. Exibem uma eficiência que oscila entre 80% e 90% e são conhecidas pelo custo relativamente acessível [10].

Um aspeto notável das baterias de chumbo é a ampla prática de reciclagem. Com um sistema estabelecido de recolha e reciclagem, praticamente todas as baterias de chumbo utilizadas são recolhidas no final da vida útil para serem recicladas. As baterias de chumbo exemplificam os princípios fundamentais do *design* ecológico, sendo concebidas com a reciclagem em mente. Mais de 90% dos materiais de uma bateria média de chumbo são

recuperados durante o processo de reciclagem, e grande parte do chumbo recuperado é reutilizado na fabricação de novas baterias de chumbo [6].

Desta forma, as baterias de chumbo não apenas oferecem uma fonte confiável de armazenamento de energia, mas também demonstram um compromisso sólido com a sustentabilidade e a conservação de recursos por meio de práticas de reciclagem eficientes.

2.3.3. BATERIAS *REDOX* FLUXO DE VANÁDIO (VRFB)

As Baterias *Redox* de Fluxo de Vanádio (VRFB) distinguem-se das baterias recarregáveis convencionais na medida que os materiais eletroativos não são armazenados dentro dos elétrodos. Em vez disso, armazenam energia através da oxidação e redução de espécies eletroativas solúveis em um eletrólito, que é armazenado em tanques específicos[6].

Este eletrólito é então bombeado através dos elétrodos, onde ocorrem as reações que armazenam energia durante o carregamento da bateria e a fornecem quando é descarregada.

As baterias de fluxo *redox* oferecem diversas vantagens em relação às baterias de lítio convencionais. São mais econômicas, confiáveis e seguras. Além disso, permitem que a potência e a energia sejam ajustadas de forma independente, tornando-as altamente competitivas tanto em termos de flexibilidade quanto em custos iniciais, em comparação com outras tecnologias. Quando ficam inativas por longos períodos, as baterias não sofrem um envelhecimento significativo e não são afetadas por problemas de autodescarga.

São, portanto, tecnologicamente confiáveis e podem ser carregadas e descarregadas por milhares de ciclos, resultando em uma vida útil prolongada e custos operacionais mais baixos [6].

As baterias de fluxo *redox* são particularmente promissoras para aplicações de armazenamento estacionário de energia, especialmente aquelas que exigem armazenamento por várias horas ou para enfrentar picos de procura. Uma das maiores vantagens destas baterias é a capacidade de dimensionamento adequado para suportar várias aplicações simultâneas, tornando-as altamente competitivas no contexto industrial.

Com uma expectativa de vida estimada superior a 20 anos, estas baterias destacam-se pela relação custo-benefício em relação à longevidade. É previsto um crescimento significativo de cerca de 50% no mercado dessas baterias nos próximos 10 anos [6].

2.3.4. BATERIAS DE NÍQUEL

As baterias de níquel são um tipo de bateria tradicional que passou por avanços periódicos na tecnologia de eletrodos e na sua estrutura para se manterem viáveis. São conhecidas como baterias de níquel-cádmio ou cádmio-óxido de níquel e têm sido amplamente utilizadas em dispositivos sem fio, como telefones, máquinas de barbear, máquinas fotográficas, dispositivos eletrônicos portáteis, ferramentas e outros equipamentos [6].

No entanto, atualmente, devido à baixa densidade de energia e ao facto de o cádmio ser um metal pesado altamente tóxico, mesmo em pequenas quantidades, a sua utilização está em declínio devido a preocupações com a saúde. Estas preocupações estão relacionadas aos problemas de saúde que o cádmio pode causar [6].

Apesar disso, as baterias de níquel ainda têm relevância devido à sua simplicidade de implementação, que não requer sistemas de gerenciamento complexos. Além disso, estas baterias oferecem uma longa vida útil e um serviço confiável. São utilizadas não apenas no armazenamento de energia, mas também desempenham um papel na estabilização de sistemas de energia eólica [6].

2.3.5. BATERIAS DE SÓDIO-ENXOFRE(NAS)

As baterias de sódio-enxofre (NaS), também conhecidas como baterias de sal fundido, não são propriamente uma novidade, sendo conhecidas há cinco décadas [10].

Estas baterias são do tipo de alta temperatura e utilizam sódio (Na) como ânodo e enxofre (S) como cátodo. São conhecidas pela impressionante densidade de energia e capacidade, tornando-as uma opção promissora para aplicações de armazenamento de energia em grande escala, como redes elétricas e fontes de energia renovável intermitente [10].

No entanto, ao longo do tempo, não foram amplamente consideradas uma alternativa viável às baterias de lítio devido à vida útil mais curta (devido a um menor número de ciclos) e à capacidade tradicionalmente inferior de armazenamento de energia. Além disso,

estas baterias requerem operação a alta temperatura, pois funcionam em temperaturas relativamente elevadas (300-350°C) para facilitar as reações eletroquímicas, uma vez que o eletrólito precisa estar em estado líquido [10].

A inovação recente está relacionada a uma nova fórmula química que permite um desempenho muito superior em temperaturas ambiente que é conseguido com a utilização de elétrodos de carbono e um processo simples de pirólise, onde a matéria se decompõe na ausência de oxigênio na presença de temperatura.

Num artigo publicado na *Advanced Materials*, os investigadores revelaram que esta abordagem otimiza a reatividade e a reversibilidade das reações entre o sódio e o enxofre, o que aponta para uma vida útil mais longa destas baterias [11]. Esta solução é de grande interesse não apenas para a indústria automóvel, mas também para as baterias estacionárias, que desempenham um papel crucial no armazenamento de energia em produções intermitentes, como centrais solares e eólicas [6].

2.4. SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Dentro das unidades de armazenamento com características elétricas destacam-se os Condensadores eletroquímicos. Esta tecnologia, também conhecida como condensadores de dupla camada, vem ganhando destaque como uma alternativa inovadora aos sistemas tradicionais de armazenamento, como as baterias.

2.4.1. CONDENSADORES ELETROQUÍMICOS

Os condensadores eletroquímicos, estão a ser objeto de estudo devido às suas notáveis vantagens. Estes dispositivos têm a capacidade de serem carregados e descarregados em velocidades muito elevadas, tornando-os ideais para aplicações que exigem uma libertação rápida de energia.

Além disso, oferecem uma vida útil significativamente mais longa em comparação com muitas baterias, uma vez que o armazenamento de energia se baseia na acumulação de carga elétrica e não envolve reações químicas [12].

Um condensador eletroquímico é composto por dois elétrodos capazes de armazenar carga elétrica, separados por um eletrólito, que é um líquido condutor que permite a movimentação de íons. Quando uma tensão elétrica é aplicada entre os elétrodos, o condensador carrega através da acumulação de íons na superfície dos elétrodos, resultando no armazenamento de carga elétrica. Durante o processo de descarga, os íons retornam, libertando energia elétrica [12].

Os mercados e as aplicações para condensadores eletroquímicos estão a crescer rapidamente, com destaque para as aplicações relacionadas à rede elétrica. São utilizados no armazenamento de energia em sistemas que requerem descargas rápidas e eficientes, como veículos híbridos e elétricos, dispositivos eletrônicos portáteis, sistemas de regeneração de energia e veículos.

Além disso, desempenham um papel fundamental em sistemas de armazenamento de energia de curto prazo com *backup* para estabilizar redes elétricas durante picos de procura. Os condensadores eletroquímicos representam uma tecnologia de armazenamento de energia com características únicas que preenchem lacunas e oferecem vantagens significativas em relação às baterias convencionais [12].

2.5. SISTEMAS DE ENERGIA TÉRMICA

Tecnologias de Armazenamento de Energia Térmica (TES) desempenham um papel crucial ao permitir o armazenamento temporário da energia produzida na forma de calor ou frio para uso posterior. O TES engloba uma variedade de tecnologias e faixas de temperatura. Nesse contexto, a energia pode ser armazenada de três maneiras distintas: como calor sensível, calor latente ou por meio de reações químicas, conhecido como armazenamento de energia termoquímica.

2.5.1. CALOR SENSÍVEL

O armazenamento de calor sensível é conseguido por aquecimento do meio de armazenamento, como sódio líquido, sal fundido ou água pressurizada, aumentando o conteúdo de energia sem passar por uma mudança de fase. A libertação ou absorção de

energia ocorre quando a temperatura do meio diminui ou aumenta, respetivamente. O calor sensível pode ser armazenado em meios sólidos, como o aço ou betão (que requerem um fluido para troca de calor), bem como em meios líquidos, como sal fundido ou água [6].

2.5.2. CALOR LATENTE

Por outro lado, o calor latente está associado a mudanças de fase. Durante o carregamento, a energia é utilizada para converter um material sólido em líquido (como no caso da parafina) ou um material líquido em gás. Os materiais de mudança de fase têm a vantagem de possuir uma alta capacidade térmica, mas também apresentam a desvantagem de alterar o comportamento após várias ciclos de mudança de fase. Para utilizar o armazenamento de calor latente, o material de armazenamento deve ter uma temperatura de fusão dentro da faixa das temperaturas de operação desejadas para o Fluido de Transferência de Calor (HTF) [6].

2.5.3. REAÇÕES QUÍMICAS

Similarmente, as reações químicas endotérmicas envolvem uma temperatura específica na qual um produto químico é dissociado numa reação química reversível, com a libertação de calor durante a síntese subsequente. No entanto, o desenvolvimento destas reações ainda está em estágios iniciais, uma vez que a temperatura de reação deve estar dentro do intervalo das temperaturas de carga e descarga do HTF. Portanto, a aplicação desta tecnologia precisa ser desenvolvida [6].

Estas diversas abordagens de armazenamento de energia térmica desempenham um papel crucial na gestão da energia e podem ser adaptadas para atender às necessidades específicas de uma ampla gama de aplicações.

2.6. SISTEMAS DE ENERGIA MECÂNICA

Os sistemas de armazenamento de energia mecânica aproveitam as forças cinéticas ou gravitacionais para armazenar energia.

2.6.1. VOLANTE DE INÉRCIA

Os volantes de inércia são dispositivos de armazenamento de energia com a capacidade de armazenar grandes quantidades de energia, sendo ideais para aplicações de descarga rápida e capazes de carregar e descarregar em altas taxas ao longo de inúmeros ciclos.

O princípio de funcionamento destes dispositivos consiste na rotação de uma massa com um elevado momento de inércia, acumulando energia na forma de energia cinética durante a rotação. Quando é necessário fornecer energia durante um curto período, essa energia cinética é convertida em energia elétrica por meio de um gerador elétrico. A capacidade energética do sistema depende do momento de inércia dessa massa e do quadrado da velocidade de rotação [6], [10].

Os volantes de inércia apresentam elevada densidade energética, alta potência específica, eficiência de conversão elevada, tempos curtos de carga e descarga, grande ciclo de vida e são dispositivos ecologicamente corretos, tornando-os muito úteis para diversas aplicações [10].

As aplicações variam desde sistemas em larga escala, como na rede elétrica, até sistemas em pequena escala para uso do consumidor. As aplicações mais comuns incluem o aperfeiçoamento da qualidade de energia, como a regulação da frequência e tensão, o controle de altitude em naves espaciais, unidades de alimentação ininterrupta (UPS), veículos híbridos e elétricos, bem como sistemas de armazenamento de energia [10].

2.6.2. AR COMPRIMIDO

Os sistemas de armazenamento de energia por ar comprimido (CAES) são tecnologias que convertem energia elétrica em energia potencial armazenada na forma de ar comprimido. Estes sistemas podem ser utilizados para armazenar energia proveniente de fontes intermitentes, como energia eólica ou solar, e libertá-la quando necessário, atuando como uma forma de armazenamento de energia. Desta forma, permitem aproveitar a energia gerada em períodos de baixa procura energética para ser usada em momentos de maior consumo [6], [10].

O conceito geral de armazenamento de energia com ar comprimido envolve três fases: compressão, armazenamento do ar comprimido e expansão. Os principais componentes

de um sistema CAES incluem o compressor, o gerador, a turbina e o reservatório de armazenamento do ar comprimido. Durante os períodos fora de pico, quando há excedente de eletricidade, o motor elétrico do sistema aciona o compressor, que comprime o ar ambiente, convertendo energia elétrica em energia potencial. Em seguida, o ar é armazenado em um reservatório. Quando há maior consumo de energia, especialmente durante as horas de pico, e, portanto, é necessário gerar eletricidade, o ar é libertado, aquecido e expandido na turbina, que está conectada a um gerador elétrico, produzindo energia elétrica que é reintegrada à rede [10].

Embora represente uma boa alternativa a outros sistemas tradicionais de armazenamento de energia, o potencial dessa tecnologia ainda está longe de ser totalmente explorado.

2.6.3. BOMBAGEM HIDROELÉTRICA

A gravidade é uma força poderosa e também uma das tecnologias de armazenamento de energia mais estáveis. Atualmente, as centrais hidroelétricas reversíveis (PHES) são o tipo mais comum de armazenamento de energia, e indiscutivelmente a tecnologia mais robusta para aplicações de armazenamento de energia que abrangem desde a faixa dos MW até GW [10].

As PHES são, de longe, a tecnologia mais amplamente implantada em termos de armazenamento de energia em grande escala. Armazenam energia sob a forma de energia potencial gravitacional, bombeando água entre dois reservatórios localizados em altitudes diferentes. Quando a procura por eletricidade é baixa, a água é bombeada do reservatório inferior para o reservatório superior, usando energia externa. A bomba e a unidade de turbina estão ligadas a um sistema de gerador elétrico reversível. Quando a procura por eletricidade é alta, o fluxo de água é revertido, e a água acumulada no reservatório superior é libertada em direção ao reservatório inferior, passando pela turbina geradora de eletricidade. A eletricidade gerada é então injetada na rede elétrica [6], [10].

A quantidade de energia armazenada em uma central PHES é diretamente proporcional ao volume de água armazenado no reservatório superior e à diferença de altura entre os reservatórios. Em muitos casos, grandes lagos ou rios são usados como reservatórios inferiores para reduzir custos, economizando na construção de um reservatório adicional.

As centrais PHES têm capacidades de descarga que variam de várias horas a alguns dias, eficiências típicas de ida e volta a variar entre 70% e 84%, e uma vida útil esperada muito longa, que varia de 40 a 60 anos, embora grandes renovações possam estender essa vida útil para até 100 anos [6], [10].

No passado, a maioria das centrais PHES era utilizada para equilibrar a discrepância entre a geração e a procura durante os períodos de alta e baixa procura em sistemas de energia que incluíam muitas turbinas de carga básica. Normalmente, os reservatórios eram preenchidos com eletricidade barata durante os períodos fora de pico, que era vendida durante as horas da manhã e da noite, quando a procura era máxima.

2.7. ARMAZENAMENTO QUÍMICO

O armazenamento químico ocorre quando se convertem fontes de energia renovável em gases combustíveis, incluindo combustíveis sintéticos, que podem ser armazenados ou utilizados diretamente em diversas aplicações [6]. A produção de hidrogénio a partir de fontes renováveis é amplamente vista como a chave para a transição energética, principalmente devido à sua complementaridade.

O hidrogénio é um elemento abundante em todo o planeta e apresenta uma pegada ambiental reduzida, tornando o foco global no aproveitamento do potencial do hidrogénio verde, especialmente na sua capacidade de armazenamento de energia. O hidrogénio oferece a vantagem de possibilitar o armazenamento de grandes quantidades de energia ao longo de períodos prolongados, ajudando a reduzir a variabilidade sazonal das fontes de energia, como solar e eólica.

De acordo com a Agência Internacional de Energia (AIE), a produção de hidrogénio verde pode levar à redução de 830 milhões de toneladas de CO₂ por ano, que são geradas quando o hidrogénio é produzido a partir de combustíveis fósseis [13].

A eletricidade pode ser convertida em hidrogénio por meio da eletrólise, e o hidrogénio resultante pode ser armazenado e, posteriormente, reconvertido em eletricidade. No

entanto, atualmente, a sua eficiência é considerada relativamente baixa em comparação com outras tecnologias de armazenamento [6].

Apesar da eficiência inferior e das preocupações sobre o alto custo de produção, armazenamento e transporte do hidrogénio verde, o interesse por este método de armazenamento está a crescer devido à sua capacidade significativamente maior em comparação com baterias ou sistemas de armazenamento hídricos ou mecânicos.

2.8. COMPARAÇÃO TECNOLÓGICA

Na tabela 1 observa-se um resumo das características técnicas dos principais tecnologias de sistemas de armazenamento de energia que foram utilizados no desenvolvimento do modelo. Através da análise da tabela 1 é possível verificar as vantagens e desvantagens de cada tecnologia discutidas anteriormente consoante o parâmetro analisado.

Tabela 1 - Características técnicas de cada sistema de armazenamento de energia [14]

ESS Tecnologia	Alcance Potência (MW)	Eficiência	Densidade Potência (W/kg)	Densidade Energia (Wh/kg)	Vida útil (anos)	Nr. Ciclos vida	Tempo descarga	Auto descarga (%)
<i>Flywheel</i>	Up to 0.25	0.93-0.95	1000	5-100	15-20	20,000-100,000	ms-15 min	100
Chumbo	Up to 20	0.75-0.85	75-300	30-50	5-15	2000-4500	s-h	0.1-0.3
NaS	0.05-8	0.80-0.90	150-230	150-250	10-15	2500-4500	s-h	20
Ni-Cd	Up to 40	0.60-0.70	50-1000	15-300	10-20	2000-2500	s-h	0.2-0.6
Lítio	Up to 0.01	0.85-0.95	50-2000	150-350	5-15	1500-4500	min-h	0.1-0.3
VRFB	0.03-3	0.75-0.85	166	out/35	5-10	10,000-13,000	s-10 h	Small
Supercondensadores	Up to 0.05	0.95-0.98	100	0.05-5	5-8	50	ms-60 min	40

3. MODELO

Este capítulo aborda a metodologia subjacente ao modelo utilizado, através do qual é feita uma análise ao modelo, incorporando a degradação e o impacto ambiental.

3.1. TRABALHOS RELACIONADOS

O tópico da otimização da programação dos sistemas de armazenamento de energia tem sido extensivamente abordado na literatura, frequentemente sendo incorporado em contextos como microrredes ou comunidades de energia. No entanto, em muitos casos, observa-se a utilização de estratégias simplificadas para a modelagem de BESS (Battery Energy Storage System), que consideram taxas de carga e descarga constantes e eficiência invariável. Estes modelos são amplamente discutidos em diversos artigos recentes, todos visando encontrar métodos eficazes de controlo para BESS [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22].

Em [23], os autores examinaram minuciosamente o impacto da modelagem dinâmica das baterias e da degradação eletroquímica nas estratégias de controlo ótimo de BESS, demonstrando que, embora os modelos simplificados sejam comuns, podem levar a avaliações imprecisas do desempenho técnico e económico. Adicionalmente, a revisão proposta da avaliação do ciclo de vida das tecnologias de armazenamento de energia, conforme discutida em [24], enfatiza a importância dos aspetos económicos na análise.

Apesar de serem abordados diferentes perspetivas na literatura relacionada ao controlo e operação de baterias, nota-se uma lacuna significativa na perspetiva de sistemas de armazenamento de energia híbridos, nomeadamente na comparação de custos e degradação. Este estudo propõe-se a preencher essa lacuna, fornecendo uma análise abrangente do desempenho relativo, tanto do ponto de vista económico quanto de ambiental, de sistemas de armazenamento de energia híbridos.

3.2. MODELIZAÇÃO

Os modelos de programação linear têm sido empregues de forma eficaz para aprimorar e identificar a solução ótima de uma função objetivo. O modelo de otimização adotado neste projeto consiste em duas funções objetivo, juntamente com restrições, utilizando uma abordagem de Programação Linear Inteira Mista (MILP). As funções objetivo deste modelo visa a minimização dos custos e das emissões associadas ao fornecimento de energia para um edifício.

O modelo baseia-se num trabalho anterior [25] em que se concentraram exclusivamente na minimização dos custos de fornecimento de energia da rede para uma carga, fazendo uso de uma bateria como *buffer*. No contexto deste projeto, o modelo atual incorpora o fator de degradação na função de minimização, juntamente com as restrições correspondentes.

Além disso, também, o impacto ambiental dos sistemas de armazenamento, quantificada em termos de emissões em gCO_2 , é um dos resultados gerados pelo nosso modelo.

Adicionalmente, o modelo abrange sistemas híbridos de armazenamento compostos por múltiplas tecnologias. São considerados *inputs* que englobam informações tarifárias e ambientais, expressas em unidades de €/kWh e gCO_2/kWh , respetivamente e o modelo considera o custo de capital inicial associado a cada tecnologia, expresso tanto em euros (€) como em emissões de dióxido de carbono (gCO_2).

São consideradas as seguintes tecnologias:

- Bateria de Vanádio
- Bateria de Lítio
- Bateria de Chumbo
- Bateria de Níquel-Cadmio (Ni-Cd)
- Bateria de Sódio Enxofre (NaS)
- Volante de Inercia / *Flywheel*
- Supercondensadores

O modelo de otimização inclui duas funções objetivas e oito restrições principais, as quais serão detalhadas a seguir. O modelo é alimentado com dois inputs: os preços de mercado, representados por λ -*t-market* para a função custo e λ -*t-emissions* para o impacto ambiental, bem como o consumo de carga do edifício.

A formulação geral compreende duas funções objetivo distintas: a minimização dos custos de fornecimento de carga (FO1, (1)) e a minimização das emissões GWP (FO2, (2)). Na função objetivo 1 (FO1), foi introduzido um peso para cada tecnologia (k_1 e k_2), representando o custo total de capital por unidade de capacidade de armazenamento, que é multiplicado pela degradação específica de cada bateria, dependendo da tecnologia escolhida. Para a avaliação do impacto ambiental na função objetivo 2 (FO2), como para a degradação, foi incorporado um peso de Análise de Ciclo de Vida (LCA) para cada tecnologia (C_1 e C_2), que reflete as emissões GWP ao longo do ciclo de vida do sistema.

Funções Objetivo:

Minimização do custo de fornecimento de carga (FO1, (1)):

$$\min \sum_{t \in T} (P_t^{abs} \hat{\lambda}_t^{market} + k_1 * eDeg + k_2 * eDeg_2) \Delta t \quad (1)$$

Minimização das emissões GWP (FO2, (2)):

$$\min \sum_{t \in T} (P_t^{abs} \hat{\lambda}_t^{emissions} + C_1 * eDeg + C_2 * eDeg_2) \Delta t \quad (2)$$

As restrições aplicadas na formulação geral incluem: (3), uma equação de equilíbrio, onde a potência absorvida pelo sistema é igual a diferença entre a potência injetada e a potência retirada; (4) limitar, se for caso disso, um limite máximo de potência na ligação à rede; (5) e (6) que impedem a carga e descarga simultâneas do BESS; (7) e (8) representam a potência máxima de carga e descarga da bateria; (9) e (10) atualizar a capacidade do BESS entre etapas (\hat{E}^{ini} é a capacidade inicial do BESS); e (11) limitar essa capacidade dentro dos limites da bateria. Quanto à degradação, que será discutida a seguir, a curva de degradação do ciclo de vida é linearizada por uma aproximação de mínimos quadrados, forçando-a a cruzar a origem. O declive da linha, \hat{m}^{deg} é utilizado para estimar a degradação causada por cada ciclo de descarga utilizando (12). A nomenclatura pode ser consultada no Anexo A.

Restrições:

$$P_t^{abs} = P_t^+ - P_t^- + \hat{P}_t^{load}, \quad \forall t \in T \quad (3)$$

$$P_t^{abs} \leq \widehat{PCC}^{limit} \delta_t^{PCC}, \quad \forall t \in T \quad (4)$$

$$P_t^+ \leq \overline{PAC,+} \delta_t^{BESS}, \quad \forall t \in T \quad (5)$$

$$P_t^- \leq \overline{PAC,-} (1 - \delta_t^{BESS}), \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$P_t^+ \hat{\eta}^+ \leq \overline{PDC,+}, \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$\frac{P_t^-}{\hat{\eta}^-} \leq \overline{PDC,-}, \quad \forall t \in T \quad (8)$$

$$E_{t=1} = \hat{E}^{ini} + \left(P_{t=1}^+ \hat{\eta}^+ - \frac{P_{t=1}^-}{\hat{\eta}^-} \right) \Delta t \quad (9)$$

$$E_t = E_{t-1} + \left(P_t^+ \hat{\eta}^+ - \frac{P_t^-}{\hat{\eta}^-} \right) \Delta t, \quad \forall t \in]1, T] \quad (10)$$

$$\underline{E} \leq E_t \leq \bar{E}, \quad \forall t \in T \quad (11)$$

$$E_t^{deg} = \hat{m}^{deg} \times \frac{P_t^-}{\hat{\eta}^-} \Delta t, \quad \forall t \in T \quad (12)$$

3.3. DEGRADAÇÃO

A degradação da bateria é influenciada por uma variedade de fatores, divididos entre não operacionais, como temperatura, humidade e tempo de calendário, e operacionais, como profundidade de descarga (DoD), ciclos de carga e descarga, sobrecarga ou descarga, corrente elétrica, nível de tensão e estado de carga (SOC). Embora o mecanismo de envelhecimento da bateria seja complexo, do ponto de vista da otimização, é possível afirmar que a degradação é predominantemente afetada pela DoD e pelos ciclos de carga e descarga, enquanto o impacto de outros fatores pode ser limitado pelo controlador da bateria ou negligenciado em aplicações conectadas à rede [14].

Portanto, é importante compreender que o carregamento e o descarregamento de uma bateria resultam na degradação da célula, reduzindo a sua vida útil. Do ponto de vista económico, traduz-se num custo associado à degradação da bateria.

O número máximo de ciclos de carga e descarga que uma unidade de armazenamento de energia em bateria pode suportar é determinado pelo número de ciclos que deve ser executado antes que a capacidade energética atinja um limite crítico (por exemplo, 70% da capacidade nominal). Neste ponto, a bateria deve ser substituída, o que constitui o custo de degradação da bateria.

Para otimizar a operação de BESS de forma ideal, é imperativo incorporar o custo de degradação da bateria ao problema de otimização, levando em consideração os ciclos equivalentes ao longo do horizonte de tempo de otimização e o efeito da profundidade de descarga na degradação. Neste estudo, o custo de degradação é modelado com base no fator de profundidade de ciclo, equilibrando assim a precisão da modelagem de degradação com a complexidade do problema de otimização. Dependendo da tecnologia escolhida, um peso é atribuído à função objetivo para cada tecnologia, representando o custo total de capital por unidade de capacidade de armazenamento, sendo depois multiplicada pela degradação da bateria, para obter o custo de degradação.

Tabela 2 - Custo Total de Capital para cada tecnologia [14]

ESS tecnologia	Configuração	Custo Total de Capital (TCC) por unidade de potência rating €/kW			Custo Total de Capital (TCC) por unidade de capacidade de armazenamento €/kW		
		Min	Média	Max	Min	Média	Max
<i>Flywheel</i>	<i>High-speed</i>	590	867	1446			
Chumbo	<i>Advanced</i>	1388	2140	3254	346	437	721
NaS	-	1863	2254	2361	328	343	398
Ni-Cd	-	2279	3376	4182	596	699	808
Lítio	-	2109	2512	2746	459	546	560
VRFB	-	1277	1360	1649	257	307	433
Supercondensadores	<i>Double layer</i>	214	229	247	691	765	856

As curvas de degradação foram obtidas a partir de [15], que apresenta uma metodologia para a seleção da tecnologia de armazenamento de energia mais apropriada para a integração na rede elétrica. Neste trabalho, várias tecnologias de Sistemas de Armazenamento de Energia foram comparadas em termos de ciclo de vida para uma determinada profundidade de descarga. É importante observar que, enquanto a curva de degradação da tecnologia de armazenamento de vanádio é linear, a curva de degradação associada às baterias de lítio segue um padrão não linear. Isso evidencia que, em situações de descargas intensas, as baterias de lítio tendem a sofrer uma degradação mais significativa em comparação com as baterias de vanádio. A Figura 2 ilustra as curvas de degradação específicas para as tecnologias de lítio e vanádio, respectivamente.

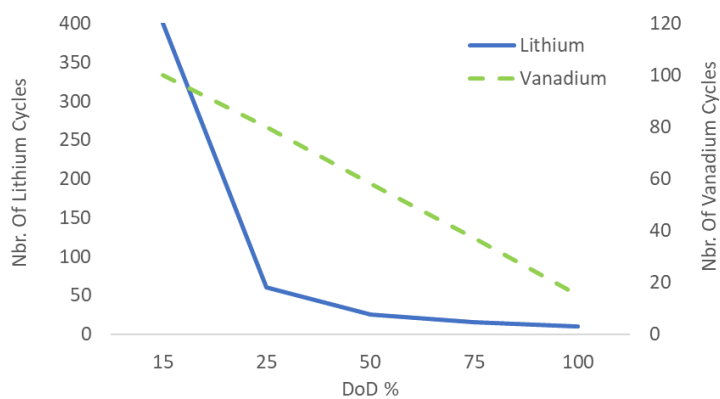


Figura 5 – Curvas de degradação Lítio e Vanádio [26]

3.4. IMPACTO AMBIENTAL

As energias renováveis, e conseqüentemente o armazenamento de energia através de baterias desempenham um papel crucial na redução das emissões de gases e na transição para um futuro de energia elétrica mais sustentável. No contexto desta transição para fontes mais sustentáveis, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) das baterias assume um componente importante para entender o impacto ambiental associado a estas tecnologias.

A ACV das baterias tem sido amplamente discutida na literatura. A ACV de sistemas de armazenamento de energia engloba a estimativa de diversos métodos, incluindo o

consumo de energia, emissões e a libertação de material em todas as etapas, desde a extração de materiais, fabricação, transporte e operação até o desmantelamento final[24].

A ACV segue quatro fases distintas: definição de objetivos e âmbito, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação. A fase de objetivos define o propósito central da realização da ACV e aplicação prevista. Inclui detalhes sobre o tipo de análise, a metodologia empregue, bem como a forma como os resultados são comunicados e para quem. A definição de âmbito engloba o sistema do produto, a unidade funcional, os limites do sistema, procedimentos de alocação, inclusão e critérios de exclusão do sistema [24].

A análise do inventário do ciclo de vida envolve a recolha de dados e o estabelecimento de balanços de material e energia para cada processo unitário considerado no limite do sistema. A quantidade de material e energia necessária varia conforme o tamanho do sistema. A necessidade de energia é estimada com base na procura específica de energia do material, após quantificar a necessidade de material [24].

A avaliação de impacto do ciclo de vida converte os resultados do inventário em categorias de impacto específicas, como acidificação, consumo cumulativo de energia, eutrofização, esgotamento de recursos fósseis, toxicidade humana e potencial de aquecimento global (PAG), entre outras [24].

A Figura 5 apresenta um esquema geral das fronteiras de um sistema de ACV para Sistemas de Armazenamento de Energia. As fronteiras do sistema incluem a produção e transporte de materiais, a construção, a operação e o descomissionamento.

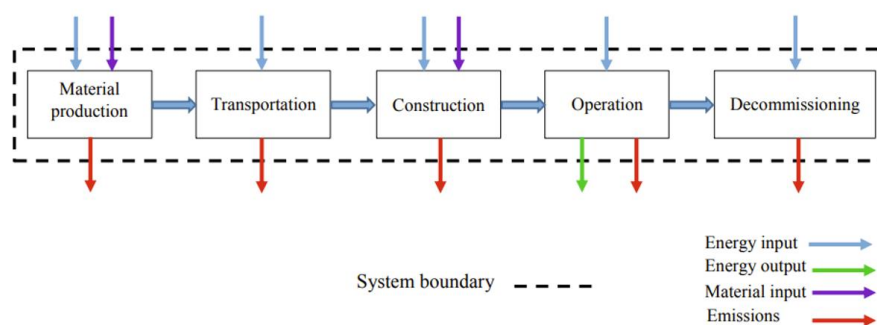


Figura 6- Fronteiras do sistema considerados [24]

Para este trabalho, considera-se o artigo [24] como referência. Os autores oferecem uma visão abrangente da ACV, abrangendo mais de 50 estudos, conforme resumido na Tabela 3. Nesta tabela, são apresentadas as ACV de diversas tecnologias de armazenamento de energia. Embora haja poucos estudos de ACV disponíveis, o trabalho de [24] fornece uma base de dados que incorpora os custos e emissões mais recentes relacionados a tecnologias de armazenamento de energia. Esse trabalho integra elementos económicos e ambientais das ESS para aplicações na rede elétrica. Os estudos realizados incluem aspetos técnicos e económicos das tecnologias de armazenamento de energia, abordando características técnicas, dimensionamento de várias ESS e desafios associados às aplicações.

As avaliações técnico-económicas (TEA) destas tecnologias avaliam o desempenho em termos de custo de capital, custo de ciclo de vida e custo nivelado de energia, auxiliando na tomada de decisões sobre desenvolvimento e implantação na rede elétrica. Dada a crescente conscientização ambiental e as regulamentações governamentais, a quantificação do consumo de energia e das pegadas ambientais tornou-se um aspeto crucial na implantação de sistemas energéticos na rede elétrica. Compreender o equilíbrio entre viabilidade económica e desempenho ambiental de um sistema de armazenamento de energia é essencial para decisões voltadas à sustentabilidade.

Embora alguns estudos tenham avaliado os impactos do "*cradle-to-grave*", isto é, o ciclo total de vida, desde a extração do material até ao fim da vida útil outros concentraram-se apenas no "*cradle-to gate*", ou seja, desde a extração até à porta da fábrica. Além disso, as emissões relacionadas ao Potencial de Aquecimento Global (GWP) são amplamente abordadas. O Consumo de Energia Direta (CED) e o GWP são as categorias de impacto mais comuns em estudos sobre ESS, dada sua ampla aceitação na comunidade científica. Outros fatores, como toxicidade humana, formação de partículas e esgotamento de recursos fósseis, também são considerados.

Para este trabalho, foram consideradas emissões GWP e foco em impactos do *cradle to grave*, uma vez que são amplamente reconhecidos na comunidade científica. Os valores foram levados em consideração para os pesos das emissões na função de otimização C1 e C2. Dado que o estudo apresenta uma ampla gama de estudos correspondentes a um intervalo amplo, para este estudo, foram considerados os valores médios de cada intervalo.

Tabela 3 – Sumario do LCA de cada tecnologia de armazenamento de energia [24]

Tecnologia	Unidade Funcional	Fronteiras do Sistema	Fontes de dados e modelos	Categorias de impacto consideradas	Sensibilidade/ Analise de incerteza	Emissões (gCO ₂ eq/kWh)
Pb-A	1 kWh	<i>Cradle to gate and operation</i>	Indústria e <i>ecoinvent database</i>	GWP	Y/Y	170-740
Li-ion	1 kWh	<i>Cradle to grave</i>	Existing studies and <i>ecoinvent studies</i>	GWP	Y/N	259-335
Na-S	1 MWh	<i>Cradle to gate and emission</i>	Literatura existente e <i>ecoinvent database</i>	CED and GWP	Y/N	201-937
VRFB	1 MWh	<i>Cradle to grave</i>	<i>ecoinvent database</i>	GWP, HT and abiotic depletion	N/N	52-279
Flywheel	150 kWh	<i>Cradle to gate</i>	Literatura existente	GHG	NA	173
Supercondensadores	150 kWh	<i>Cradle to gate</i>	Literatura existente	GHG	NA	416

4. IMPLEMENTAÇÃO

Neste capítulo, é descrito a implementação do código desenvolvido para a otimização dos sistemas de armazenamento de energia. A implementação é realizada em *Python* e para o processo de otimização foi utilizada a biblioteca PULP, e o solver CBC.

PULP é uma biblioteca *Python* para programação linear. Fornece uma interface fácil de utilizar para definir problemas de programação linear e resolver esses problemas utilizando solucionadores de otimização subjacentes. PULP é comumente utilizado para resolver problemas de programação linear e inteira linear, como otimização linear [27].

CBC é um solucionador de programação linear inteira e mista (ILP/MILP) desenvolvido pelo projeto Coin-OR (*Computational Infrastructure for Operations Research*). Pode ser integrado com PULP para resolver problemas mais complexos que envolvem variáveis inteiras [28].

4.1. LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO/ SOFTWARE

Após uma análise criteriosa, foi decidido que *Python* e *PyCharm* seriam a linguagem e o ambiente de desenvolvimento, respectivamente, a serem utilizados durante o projeto.

4.1.1. PYTHON

Python é uma linguagem de programação de alto nível, conhecida pela simplicidade e legibilidade, tornando-a uma escolha popular entre programadores de diversos níveis de experiência. Entre as principais características do *Python*, destacam-se a capacidade de lidar com uma ampla variedade de tarefas de programação, desde *scripts* simples até projetos complexos envolvendo computação científica, *machine learning* e análise de dados. Além disso, o *Python* é uma linguagem interpretada, o que permite que os programas sejam executados diretamente a partir do código-fonte, sem a necessidade de compilação prévia [29].

Outra característica fundamental do *Python* é a extensa biblioteca padrão, que abrange módulos para realizar tarefas comuns, como manipulação de arquivos, acesso à internet, processamento de texto, entre outras. Além disso, existem inúmeras bibliotecas de terceiros disponíveis, que podem ser facilmente instaladas utilizando o *pip*, o gerenciador de pacotes do *Python* [29].

Devido às suas características e ampla popularidade, o *Python* é amplamente utilizado em diversas áreas, incluindo desenvolvimento *web*, *data science*, *machine learning*, automação de tarefas e muito mais.

4.1.2. PYCHARM

O *PyCharm* é uma das IDEs (Ambientes de Desenvolvimento Integrado) mais populares para programação em *Python*, desenvolvida pela *JetBrains*. Esta ferramenta oferece inúmeros recursos valiosos para programadores *Python*, incluindo edição avançada de código, depuração, integração com sistemas de controlo de versão, suporte a testes e muito mais [30].

Uma das principais vantagens do *PyCharm* é a sua interface de utilizador intuitiva, que permite aos programadores gerir projetos complexos de maneira eficiente. Além disso, conta com um editor de código poderoso que oferece recursos como realce de sintaxe, sugestões de código, refatoração automática, verificação de erros e muito mais. O *PyCharm* também oferece ferramentas avançadas que auxiliam os programadores na identificação e correção rápida de erros.

Outra característica relevante do *PyCharm* é a sua integração com sistemas de controlo de versão, como *Git*, *Mercurial* e *SVN*, facilitando a gestão do histórico de revisões do projeto e permite colaboração eficaz em equipa [30].

Em resumo, o *PyCharm* é uma escolha excelente para programadores *Python* que procuram uma IDE poderosa e intuitiva para escrever código de alta qualidade e eficiência.

4.2. BESS

A estrutura do código é organizada em torno das classes *BESS* e *Optimizer*.

A classe *BESS* é um componente central do código e representa um sistema de armazenamento de energia. Tem muitos atributos que descrevem as características do sistema de armazenamento de energia, como a capacidade, eficiência, limites de potência e dados de degradação.

Além disso, existem vários outros atributos que armazenam informações relacionadas ao sistema de armazenamento de energia, como limites de potência, tensão nominal, capacidade nominal, eficiências, degradação, etc.

Essa classe é responsável por conter todas as informações relevantes sobre o sistema de armazenamento de energia. O código pode ser consultado na figura 14 do anexo B.

4.3. OPTIMIZER

A classe *optimizer* é responsável por realizar a otimização de programação linear inteira mista do sistema de armazenamento de energia.

Contém atributos para armazenar configurações, relacionados aos parâmetros do MILP, configurações do sistema, recebe previsões dos *inputs*, como a carga e os preços de mercado e atributos relacionados com as configurações das baterias do sistema.

Para além disso, contém dois atributos chamados *self.bess* e *self.bess2*, que cria as duas instâncias utilizadas para configurar e modelar sistemas de armazenamento de energia (BESS) no processo de otimização.

Os métodos associados a esta classe são responsáveis por realizar a otimização real com base nestas configurações.

Desta forma, a classe *optimizer* é dividida em 4 métodos:

- *Initialize*

Esta função é responsável por inicializar todas as variáveis internas da classe *Optimizer* com base nas entradas fornecidas, incluindo parâmetros do MILP, configurações do sistema, previsões da carga e dos preços de mercado ou emissões. Para além disso, duas instâncias da classe BESS que inclui a configuração das características do BESS como eficiências e curvas de degradação. O código pode ser consultado na figura 15 do anexo B.

- *Define_milp*

Esta função é responsável por definir o problema de otimização MILP onde definimos as variáveis de decisão, a função objetivo e as restrições do problema com base nas configurações e parâmetros definidos anteriormente. O código pode ser consultado nas figuras 16, 17 e 18 do anexo B.

- *Solve milp*

Depois da definição do problema de otimização, a função chama *self.milp.solve()* para resolver o problema MILP, iniciando desta forma, o processo de otimização. O código pode ser consultado na figura 19 do anexo B.

- *Generate_outputs*

Esta função é responsável por gerar os resultados da otimização e guardar esses resultados em um arquivo JSON. Em resumo, esta função verifica se a otimização foi bem-sucedida, obtém os valores das variáveis de decisão e cria um arquivo JSON com os resultados. O código pode ser consultado na figura 20 do anexo B.

4.4. MAIN

A função *main* é responsável por coordenar toda a execução do programa, podendo ser dividida em duas funções principais.

- *Read_data*

Dentro da *main* existe uma função responsável por ler e analisar dados de previsão de geração, carga e preços de mercado de um arquivo CSV e retorná-los como um *DataFrame* do pandas. Esta função é útil para preparar os dados de previsão necessários para as etapas de otimização do sistema, garantindo que os dados estejam no formato correto para serem utilizados em simulações e cálculos subsequentes. O código pode ser consultado na figura 21 do anexo B.

- *Optimize*

A função *optimize* é a função principal que coordena o processo de otimização.

Cria uma instância da classe *Optimizer* chamada *problem* e inicializa-a com os parâmetros e dados relevantes fornecidos como argumentos. Faz a configuração dos dados para o problema MILP, a resolução do MILP e por fim a geração de resultados. Esta função é o ponto de entrada principal para o processo de otimização, onde os dados são configurados, o problema MILP é resolvido e os resultados são gerados e retornados para uso posterior. O código pode ser consultado na figura 22 do anexo B.

5. DEMONSTRAÇÕES E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados alguns testes funcionais ao sistema, bem como interpretados os resultados obtidos dos diferentes componentes do trabalho prático desta dissertação e avaliar se estes vão de encontro com o pretendido.

5.1. DEMONSTRAÇÃO

Neste estudo, será demonstrado as aplicações práticas de um HESS em funcionamento por meio de um caso real. O HESS foi implantado nas instalações de um edifício, situado na sua cave, sendo cada componente interligado a inversores dedicados e a um Sistema de Gestão de Energia (EMS) já existente.

O HESS é composto por duas unidades de baterias: uma delas é uma bateria de fluxo de vanádio, com uma capacidade de 10 kW e 40 kWh de potência, enquanto a outra é um conjunto de baterias de lítio em segunda vida, fornecendo 100 kW e 100 kWh de capacidade. Cada conjunto de baterias é conectado aos seus próprios inversores e operado de acordo com as diretrizes estabelecidas pelo EMS, que está instalado num computador local.

O HESS está configurado de forma a operar "*behind-the-meter*", o que significa que a sua funcionalidade está intrinsecamente relacionada ao fornecimento de energia para o edifício. O um Sistema de Gestão de Energia Residencial (HEMS) recolhe os dados de consumo e, levando em consideração incentivos económicos ou ambientais, programa o HESS para operar de forma a minimizar os custos associados ao suprimento de energia para o edifício, ao mesmo tempo que procura reduzir a degradação das baterias. O HEMS utiliza previsões de incentivos baseadas em indicadores ambientais, com base em projeções de um dia à frente, para fornecer recomendações sobre os melhores momentos para carregar

e descarregar o HESS, a fim de otimizar os custos do fornecimento de energia para o edifício, enquanto maximiza a vida útil das baterias.

A figura 7, ilustra a arquitetura do sistema, destacando a configuração do sistema híbrido real, os fluxos de comunicação entre os blocos de monitoramento e processamento, bem como a conexão ao barramento.

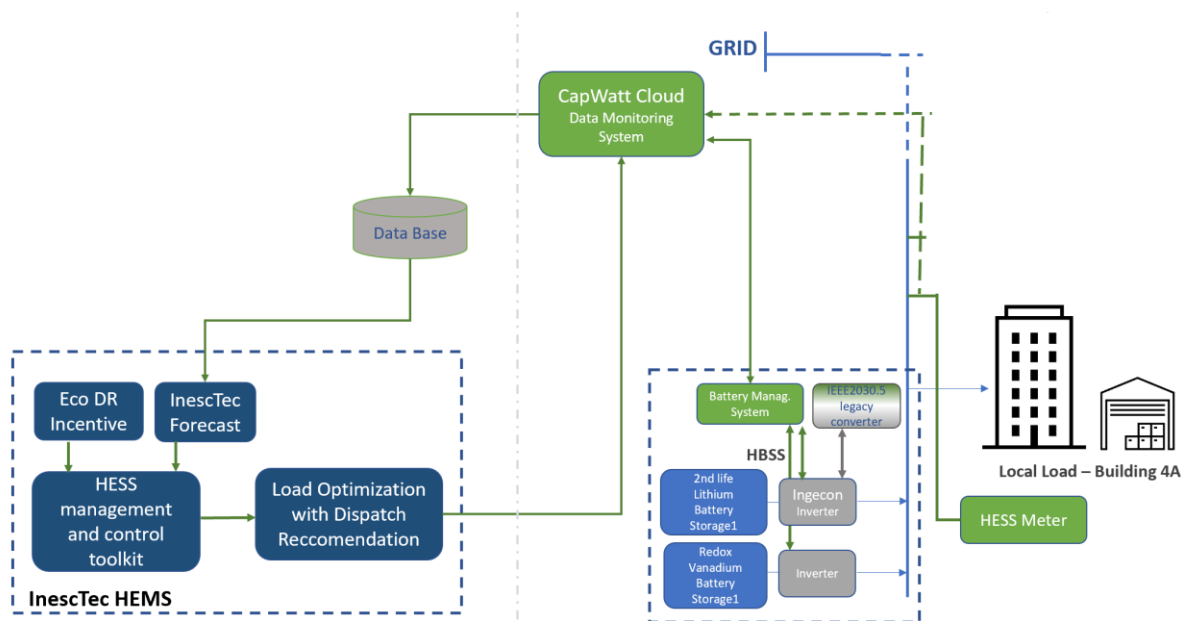


Figura 7 – Arquitetura do sistema

5.2. SIMULAÇÕES

Esta secção apresenta a aplicação dos dois cenários, cada um correspondente a cada função objetivo. O primeiro cenário refere-se à função objetivo do custo da energia (equação 1) e o segundo cenário à função de impacto ambiental (equação 2).

Para cada função objetivo, foi feita a comparação de um sistema singular composto por uma bateria de lítio, com um sistema híbrido composto por um grupo de uma bateria de lítio e uma de cada uma das outras 6 tecnologias. O sistema singular é composto por uma bateria única de lítio com 140 kWh de capacidade e 110 kW de potência enquanto que o sistema híbrido é composto por duas baterias (uma bateria de lítio) com 100 kWh de

capacidade e 100 kW de potência e (outra tecnologia) com 40 kWh e 10 kW, o par, ambas correspondentes ao tamanho e capacidade da unidade única.

As Tabelas 4 e 5 mostram os resultados para cada cenário e tecnologia para um mês inteiro de simulações, para que os resultados possam ser recorrentes e visíveis.

A figura 7 ilustra os preços diários de mercado e as variações das emissões consideradas como *inputs* para os cenários 1 e 2 correspondentes, enquanto na figura 8 é apresentada a carga prevista do edifício. A carga corresponde ao consumo de eletricidade de um edifício no local do parceiro industrial, baseia-se num módulo de previsão de aprendizagem automática, treinado com um ano inteiro de dados históricos e é o mesmo para ambos os cenários. Os preços de mercado e as emissões do dia seguinte, são extraídos diariamente da ENTSO-E *transparency platform* [31] e de uma plataforma denominada *Sentinel by InescTec*, que prevê as emissões para o dia seguinte com base na previsão de geração, na compensação do mercado e nas informações meteorológicas.

As curvas de degradação [26] e as eficiências [14], consideradas como *inputs* para o funcionamento do modelo, foram baseadas nos valores encontrados na literatura.

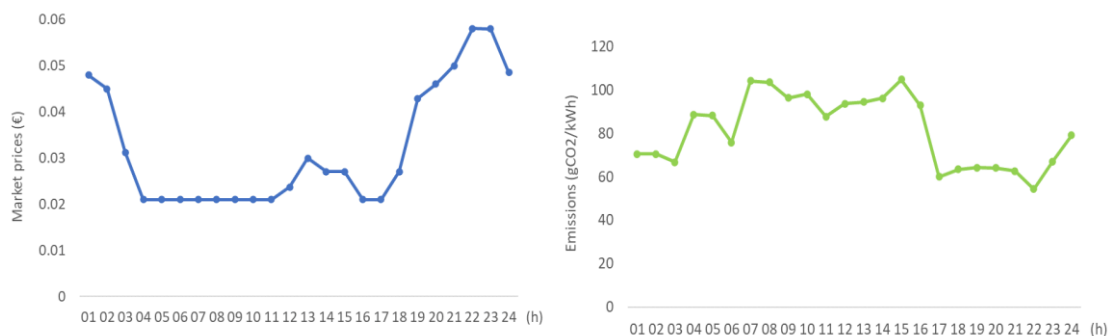


Figura 8 – Preços diários de mercado ENTO-E (esquerda) e os incentivos das emissões (direita)

Como pode ser visto na Figura 8, a previsão de carga demonstra uma redução acentuada por volta do meio-dia. Isto porque o edifício considerado está a utilizar a energia gerada pelo sistema fotovoltaico local ilustrado na Figura 9 para autoconsumo. O restante consumo é solicitado à rede e é a referência para o despacho das baterias.

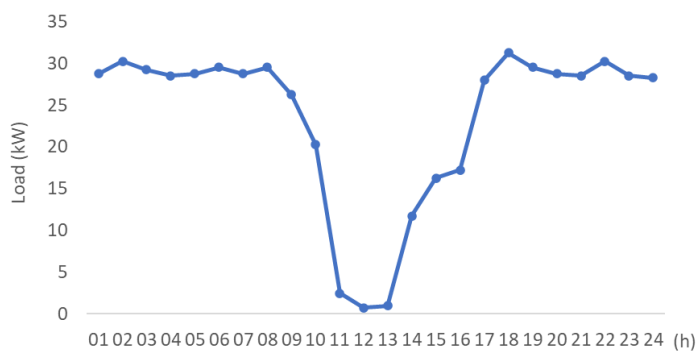


Figura 9 – Input previsão de carga do edifício do parceiro industrial

A Tabela 4 mostra os resultados para todas as tecnologias considerando a função objetivo do custo da energia. As colunas mostram uma gama de resultados, pois ambos os valores (limites superior e inferior) de eficiência encontrados na literatura, foram considerados, para capturar o amplo espectro de possibilidades de resultados.

Os resultados comparativos, mostram que dois sistemas híbridos se destacam. Os sistemas híbridos lítio-vanádio e lítio-supercondensadores superam o sistema singular.

As baterias de vanádio aproveitam a sua curva de degradação parcialmente menos intensa e Supercondensadores a sua alta eficiência. A introdução de uma bateria de vanádio oferece um desempenho relevante devido à degradação mais lenta da bateria de vanádio. Embora tenha uma eficiência ligeiramente inferior (75-85%) ao lítio (85-95%), a redução substancial dos custos de degradação (-18,3%) é compensada pelo aumento dos custos energéticos (+0,8%).

O menor valor da coluna de custo total é observado no limite superior dos supercondensadores, com um custo de 1188.8€, enquanto o maior custo total é observado tanto nas baterias de chumbo quanto nas baterias níquel-cadmio, com 1249.3€ no limite inferior do intervalo.

Tabela 4- Resultados para cada tecnologia considerando custos de energia (FO1)

Tecnologia	Eficiência (%)	Cenário 1 (FO1)		
		Custo energético (€)	Custo degradação (€)	Custo total (€)
Uma bateria de Lítio	0.85-0.95	1185.8-1143.5	55.6 -74.1	1241.3-1217.6
Duas baterias de Lítio	0.85-0.95	1190.4- 1145.7	52.4-73.1	1242.8-1218.8
Baterias de Lítio e Vanádio	0.75-0.85	1195.1-1152.9	44.4-60.6	1239.5-1213.5
Bateria de Lítio e Chumbo	0.75-0.85	1208.2-1175.0	41.1-55.4	1249.3-1230.4
Baterias de Lítio e Ni_Cd	0.60-0.70	1208.2-1175.0	41.1-55.4	1249.3-1230.4
Baterias de Lítio e NaS	0.80-0.90	1203.9-1166.1	43.7-62.0	1247.5-1228.1
Bateria de Lítio e <i>Flywheel</i>	0.80-0.95	1208.1-1173.3	41.1-57.0	1249.2-1230.3
Bateria de Lítio e Supercondensadores	0.85-0.98	1170.1-1134.4	40.8-54.5	1224.8-1188.8

Quando comparado com a bateria única de lítio, existem duas combinações híbridas que podem claramente ter menor custo total, como pode ser visto na última coluna, analisando os valores mais baixos da gama. Estes correspondem aos pares lítio-vanádio (-0,3% de custo) e lítio-supercondensadores (-2,4% de custo). É interessante observar, no entanto, que a maioria das tecnologias tem menores custos de degradação quando comparado com a tecnologia do Lítio. No entanto, o seu peso relativo quando comparado com o custo da energia da função de otimização, é duas ordens de grandeza inferior e, portanto, contribui com pouco efeito no resultado da função objetivo.

Quando duas baterias de lítio são emparelhadas como um sistema híbrido, o desempenho em custo é pior. Mesmo que a diferença seja mínima, isso acontece porque o sistema singular, para carregar totalmente a sua bateria só precisa de dois ciclos de carregamento completos para o fazer. Por sua vez, para que o sistema híbrido carregue a mesma quantidade de energia, uma vez que a bateria menor só pode carregar a uma taxa de 10 kW por ciclo, precisa fazer 4 ciclos de carregamento (40 kWh). Embora o sistema singular

faça menos ciclos de carregamento, tem um melhor custo de energia. Isso acontece por causa da intermitência de preços entre cada ciclo. A bateria de maior potência tem um *C-rate* mais alta, o que lhe permite carregar totalmente na hora menos dispendiosa. O mesmo não acontece na outra bateria que tem uma *C-rate* mais baixa, resultando num aumento do custo energético do sistema híbrido.

Na degradação, apesar da mesma curva de degradação, o sistema singular sofre uma degradação ligeiramente pior (+1,6%) porque a pequena bateria do sistema híbrido, como mencionado anteriormente, tem apenas uma potência de 10 kW, pelo que a profundidade de descarga em ciclos, no sistema híbrido é menor causando menos degradação.

No Cenário 2 (FO2), com uma mudança de foco para as emissões de impacto ambiental, a dinâmica de desempenho vê mudanças leves. O sistema de baterias de lítio simples e os Supercondensadores destacam-se como os melhores desempenhos, no entanto o sistema híbrido com baterias de vanádio e lítio também revelam um forte desempenho, particularmente no que diz respeito à degradação.

Tabela 5 - Resultados para cada tecnologia considerando emissões (FO2)

Tecnologia	Eficiência (%)	Cenário 2 (FO2)		
		Custo energia (kgCO ₂)	Custo degradação (kgCO ₂)	Emissões totais (kgCO ₂)
Uma bateria de Lítio	0.85-0.95	5123.7- 4877.2	19.1- 91.8	5142.8-4968.0
Duas baterias de Lítio	0.85-0.95	5124.2-4879.8	18.8.3-91.8	5143.0-4971.6
Baterias de Lítio e Vanádio	0.75-0.85	5125.2-4891.7	18.3-87,4	5143.5-4979.1
Bateria de Lítio e Chumbo	0.75-0.85	5125.2-4891.9	18.3-87.4	5143.5-4979.3
Baterias de Lítio e NaS	0.80-0.90	5125.2-4891.9	18.3-87.4	5143.5-4979.3
Bateria de Lítio e <i>Flywheel</i>	0.93-0.95	5125.2-4877.8	18.2-80.4	5143.4-4958.2
Bateria de Lítio e Supercondensadores	0.95-0.98	5123.2-4853.6	16.1-75.0	5139.3-4928.6

Todas as tecnologias têm, menor degradação em termos de emissões do que as baterias de lítio, sendo os supercondensadores os mais baixos que variam entre (-18,3%) e (-15,7%) menos degradação. O impacto total, no entanto, dificilmente pode ser visto na última coluna para a maioria das tecnologias, exceto para o par de Supercondensadores-Lítio que demonstram menos 0,8% de emissões de CO₂, seguido pelo par Lítio-Flywheel com (-0,2%) de emissões de CO₂.

Nas figuras 10 e 11 está representado o despacho de recomendação e o estado de carga das baterias para um dia, respectivamente, para o sistema singular e HESS. Os sistemas escolhidos foram um sistema Singular (Bateria de Lítio) vs Sistema Híbrido (Baterias de Lítio e Vanádio).

Cenário 1 (FO1)

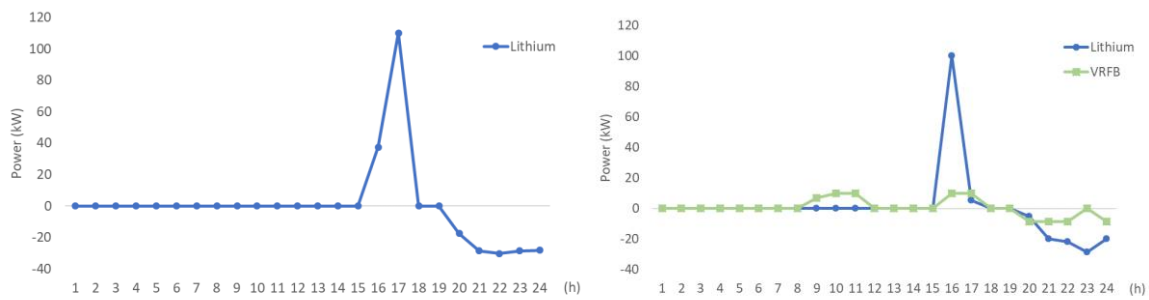


Figura 10 – Exemplo de um despacho diário de uma bateria Lítio única (esquerda) e do sistema híbrido Li e VRFB (direita) utilizando FO1

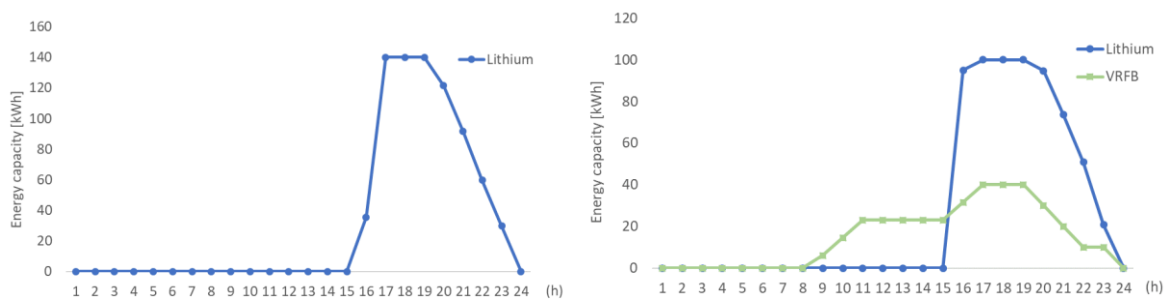


Figura 11 – Exemplo do estado de carga (SOC) de uma bateria Lítio única (esquerda) e do sistema híbrido Lítio e VRFB (direita) utilizando FO1

As Figuras 12 e 13 mostram os resultados ao aplicar a função de otimização de emissões (FO2). Os resultados mostram apenas um único dia de despacho, com uma bateria lítio e quando o sistema é operado como um HESS. Os incentivos e a carga ditarão as entradas de cada bateria. Neste caso diário, como exemplo, pode-se ver na Figura 12 à direita, a segunda bateria carregando às 19h a 3 kW e descarregando imediatamente depois também a 3 kW.

Cenário 2 (FO2)

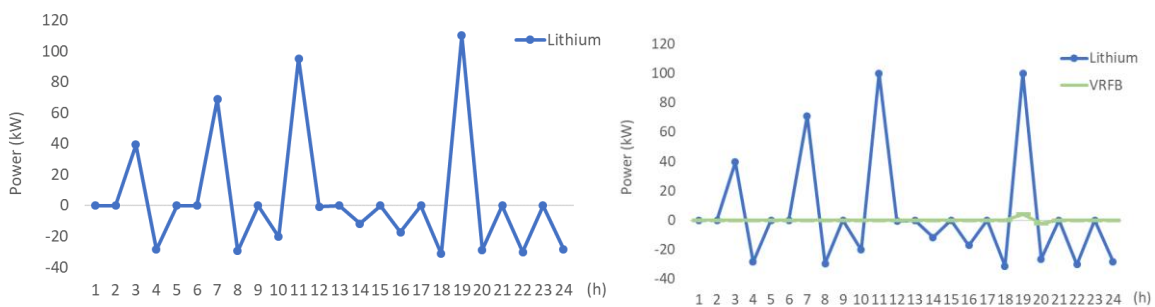


Figura 12 - Exemplo de um despacho diário de uma bateria Lítio única (esquerda) e do sistema híbrido Li e VRFB (direita) utilizando FO2

A Figura 13 mostra o estado de carga da operação de uma única bateria lítio e, à direita, a operação HESS. Conseqüentemente, a bateria VRFB só carrega 3 kWh às 19h e descarrega a zero na hora seguinte. A contribuição relativamente pequena da segunda bateria é explicada pelo peso relativamente alto da bateria de vanádio no termo de energia da função de otimização quando comparada com a de lítio. O segundo termo relativo à degradação, embora menor no caso do VRFB, sua contribuição para o FO2 é muito pequena e acaba sendo chamada muito raramente.

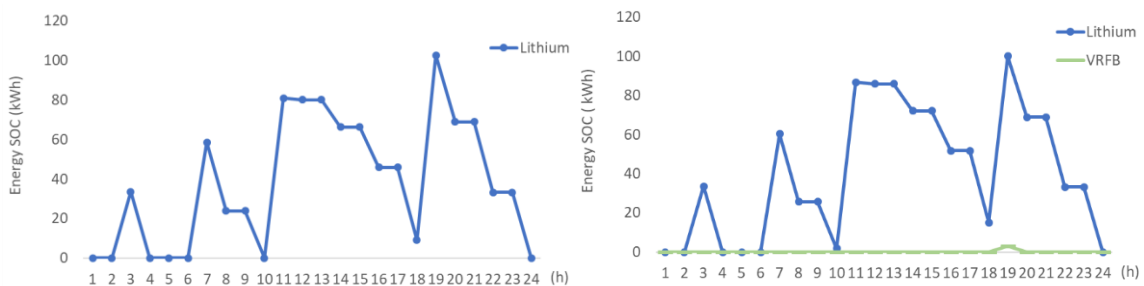


Figura 13– Exemplo do estado de carga (SOC) de uma bateria Lítio única (esquerda) e do sistema híbrido Lítio e VRFB (direita) utilizando FO2

O custo das emissões no sistema híbrido com vanádio aumenta porque, agora, o *input* não são os preços de mercado, mas as emissões. Esta entrada exige que o sistema híbrido realize mais ciclos de carga e devido à baixa eficiência da bateria de vanádio e provoca um aumento no custo de emissões.

Neste ponto, também é importante complementar a análise do ponto de vista do *C-rate* da bateria. O *C-rate* pode ser considerada como a relação entre a potência nominal e a capacidade energética. Determina a velocidade a que uma bateria é totalmente carregada ou descarregada.

No par HESS existente do parceiro industrial considerado na verificação deste trabalho, a bateria de lítio tem um *C-Rate* 1 (100 kW/100 kWh), demorando uma hora a carregar, enquanto a VRFB tem um *C-rate* de 0,25, que demora quatro horas a carregar (10 kW/40 kWh).

A escolha das duas baterias deve ter em conta o *C-Rate* dedicada a cada uma, cuja maior distância na taxa significará maior custo. Isto porque, quando existe uma capacidade energética muito superior em comparação com a potência nominal, como no exemplo estudado, a bateria baseada em energia demora mais tempo a carregar totalmente, o que significa que necessita de mais faixas horárias com preços potencialmente diferentes (mais elevados), resultando num custo global de energia mais elevado.

Se o mesmo modelo for executado, mas assumindo valores semelhantes para as *C-Rates* por exemplo 0,785 que corresponde a lítio com 55kW, 70 kWh e VRFB com 55kW 70 kWh, obtém-se resultados diferentes para cada cenário como mostrado na Tabela 6.

Para o cenário 1, como agora tem-se um aumento da capacidade da bateria de vanádio, e diminuição da bateria de lítio, a eficiência do sistema diminui, aumentando desta forma o custo energético. No entanto, o custo da degradação vai diminuir pois agora são necessários menos ciclos de carregamento, resultando numa melhoria no custo total.

No cenário 2, como a parcela do custo energético tem mais influência no resultado total, o sistema piora com a alteração do *c-rate*.

Tabela 6 - Resultados considerando semelhantes C-rates (FO1 e FO2)

Tecnologia	Eficiência %	Cenário 1 (FO1)		
		Custo energético €	Custo degradação €	Custo total €
Uma bateria de Lítio	0.85-0.95	1185.8-1143.5	55.6 -74.1	1241.3-1217.6
Baterias de Lítio e Vanádio	0.75-0.85	1196.9-1157.6	35.6-48.4	1232.5-1206
Tecnologia	Eficiência %	Cenário 2 (FO2)		
		Energia (kgCO ₂)	Degradação (kgCO ₂)	Emissões totais (kgCO ₂)
Uma bateria de Lítio	0.85-0.95	4877.2- 4877.2	32.3- 91.8	5116.4-4968.0
Baterias de Lítio e Vanádio	0.75-0.85	5134.3-4945.9	14.0-67.9	5148.3-5013.8

6. API

No decorrer do projeto foi desenvolvida uma REST API que permitiu, de forma ágil e segura, integrar a aplicação Web que estava a ser paralelamente desenvolvida.

O projeto, centrado no desenvolvimento de um modelo de otimização, exigiu uma solução eficiente para facilitar a comunicação entre o modelo e a aplicação *Web*.

A implementação de uma API (Interface de Programação de Aplicações) surgiu pela necessidade de proporcionar uma interface eficiente e flexível para servir de ponto de entrada para a execução das simulações através da aplicação *web*. Mais tarde outras plataformas e serviços vão poder ligar-se à REST API desenvolvida.

Neste sentido, a adoção de uma API promove a eficiência do código e a manutenção simplificada, características essenciais para o desenvolvimento de software escalável e de alta qualidade.

Nesta secção, são descritas as tecnologias fundamentais que foram empregues no desenvolvimento da API, as principais funcionalidades da API, incluindo a descrição dos *endpoints* e a estratégia de testes adotada para garantir a funcionalidade e confiabilidade da API.

6.1. API

Uma API é um conjunto de regras e definições que permite que diferentes *softwares* comuniquem entre si. Atua como um intermediário, permitindo que sistemas distintos troquem informações e solicitações de maneira padronizada. A API define as maneiras pelas quais os componentes de software devem interagir, oferecendo uma abstração consistente que simplifica a complexidade subjacente [32].

Portanto, uma API é um programa que envia e recebe informações entre um site ou aplicação e os utilizadores. Ou seja, as APIs funcionam como elo entre as diferentes aplicações ao serviço do utilizador. Possibilitam a integração entre distintos sistemas e tornam as ações dos utilizadores mais rápidas, com as respostas esperadas. A API funciona sempre em segundo plano, por isso o utilizador comum não chega sequer a ver a API em funcionamento. Toma apenas partido da sua utilidade - quando utiliza um site ou uma *app*.

No contexto deste projeto, a API serve como um ponto de acesso unificado para os recursos do modelo, facilitando a interação com o sistema sem a necessidade de compreender a complexidade interna da sua implementação. Ela oferece um conjunto estruturado de *endpoints*, métodos e formatos de dados que permitem a solicitação e resposta de informações de maneira eficiente.

6.2. REST API

As REST APIs (Interfaces de Programação de Aplicações baseadas em Transferência de Estado Representacional) são uma abordagem segura e eficaz para permitir a comunicação entre diferentes *softwares*. Utilizando o protocolo HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*), essas APIs possibilitam o acesso e manipulação de informações provenientes de serviços externos [33]. Os métodos principais empregues nestas operações incluem:

- GET: Utilizado para obter dados
- POST: Criar dados
- PUT: Atualizar dados
- DELETE: Eliminar dados

No contexto de segurança, as REST APIs incorporam mecanismos para controlar quais softwares têm acesso a elas. Esse controlo é frequentemente implementado através de Autenticação HTTP Básica, onde as credenciais do utilizador são enviadas codificadas no cabeçalho do pedido [33].

Para facilitar o desenvolvimento e garantir a segurança, ferramentas como o *Swagger* são frequentemente utilizadas. O *Swagger* oferece benefícios como geração automática de documentação da API e validação de funcionalidades durante o desenvolvimento.

Comparativamente, outro método de acesso a serviços é o SOAP (Simple Object Access Protocol), que se baseia em troca de informações utilizando XML. Em contraste com o REST, o SOAP requer um documento XML com chamadas de procedimento remoto (RPC) e segue um conjunto padrão de regras para definir mensagens, conexões e operações [33].

Os serviços REST destacam-se pela facilidade de integração com outras aplicações e são particularmente úteis em sistemas com controlo de acesso restrito, como dispositivos móveis. Estas características, juntamente com a ausência de um conjunto padronizado de regras para descrever a interface, tornam os serviços REST altamente recomendados para diversas aplicações [34].

6.3. FASTAPI

O desenvolvimento da API foi realizado utilizando o *framework FastAPI*.

O *FastAPI* é uma *framework* moderna e eficiente para o desenvolvimento rápido de APIs com *Python* [35]. A escolha do *FastAPI* foi motivada pela sua facilidade de uso, suporte para assincronismo, e ênfase em manter a segurança e a validação de dados integradas.

Além do *FastAPI*, foram utilizadas algumas bibliotecas e ferramentas para otimizar o desenvolvimento e garantir a segurança da API. Algumas das principais bibliotecas incluem:

Pydantic: Utilizado para definir esquemas de dados e validar entradas e saídas da API, fornecendo uma abordagem declarativa e eficiente.

Uvicorn: Um servidor assíncrono que foi empregue para servir a API de forma assíncrona, alinhando-se com as capacidades assíncronas do *FastAPI*.

Swagger UI: Integrados para gerar documentação automática e interativa da API, simplificando o processo de compreensão e teste.

Estas tecnologias foram escolhidas não apenas pela sua eficiência técnica, mas também pela capacidade de promover um desenvolvimento ágil e sustentável. A combinação do FastAPI com as restantes ferramentas ofereceu uma base sólida para a implementação da API, alinhada com os objetivos de desempenho, segurança e documentação eficaz.

6.4. IMPLEMENTAÇÃO/ FUNCIONALIDADES DA API

A API é composta por um conjunto de *endpoints* que abrangem diversas operações, que possibilitam a configuração do sistema, a execução de simulações e a obtenção de resultados. Cada *endpoint* desempenha um papel específico, contribuindo para a funcionalidade global da API.

Esta seção apresenta as funcionalidades da API, detalhando cada *endpoint* disponível para interações.

Inicialmente, o primeiro *endpoint*, *api/objective_function*, permite a obtenção da função objetivo atualmente configurada no sistema. A opção selecionada é passada como parâmetro na requisição, e a resposta inclui a função objetivo correspondente, sendo utilizado o método GET.

- **Endpoint 1:** *GET /api/objective_function*

O *endpoint* *api/settings* é utilizado para configurar as opções do sistema, definindo parâmetros como limites de carga da bateria, eficiência, curva de degradação e dados de entrada para a simulação. A resposta inclui resultados da simulação, como *status*, custos, degradação, entre outros. Para isso é utilizado o método POST.

- **Endpoint 2:** *POST /api/settings*

Por fim, o *endpoint* *api/get_data_for_chart* que retorna dados específicos destinados à geração de gráficos ou visualizações. Os dados incluem informações relevantes para análises visuais, como valores de carga, o estado de carga e o despacho de recomendação de carregamento e descarregamento. Utilizado o método GET

- **Endpoint 3:** *GET /api/get_data_for_chart*

Estes *endpoints* proporcionam uma interface clara para interagir com a API, oferecendo funcionalidades específicas para configuração, execução e visualização de resultados. Cada *endpoint* atende a uma parte fundamental do processo, contribuindo para a utilidade geral da API.

Na tabela 6 são apresentados os *endpoints*, juntamente com o métodos utilizados e as respectivas funcionalidades.

Tabela 6 – *Endpoints*

Método	Endpoint	Funcionalidade
POST	<i>/api/objective_function</i>	Escolha da função objetivo
POST	<i>/api/settings</i>	Configuração dos parâmetros das baterias
GET	<i>/api/get_data_for_chart</i>	Geração de gráficos ou visualizações

6.5. TESTES API

A estratégia de testes foi projetada para abranger diferentes aspectos da API, incluindo funcionalidades principais, manipulação de erros e desempenho. Foi utilizado o *software Postman* como ferramenta valiosa para testes manuais a APIs REST.

O *Postman* é uma ferramenta versátil utilizada para facilitar o desenvolvimento, teste e documentação de APIs. Com uma interface amigável, o *Postman* permite a criação, execução e automação de solicitações HTTP, proporcionando uma abordagem eficaz para validar o comportamento da API em diferentes cenários [36].

- Resultados dos Testes:

Durante os testes, a API demonstrou consistência e confiabilidade nas operações esperadas. Os testes garantiram que cada *endpoint* respondesse conforme o esperado, manipulando corretamente os parâmetros e fornecendo respostas coerentes. Os testes foram bem-sucedidos na verificação da comunicação entre os diferentes componentes da API.

- Utilização do *Postman*:

O *Postman* desempenhou um papel crucial na validação da robustez da API. Com a interface intuitiva, pudemos realizar solicitações HTTP para cada *endpoint*, testar diferentes cenários e validar as respostas recebidas. A funcionalidade de *scripts* no *Postman* permitiu a automação de testes repetitivos, melhorando a eficiência do processo de teste.

- Conclusões dos Testes:

Os resultados positivos dos testes oferecem uma conclusão otimista sobre a robustez da API. Tanto em termos de funcionalidade quanto de segurança, a API demonstrou ser confiável e capaz de atender às expectativas, validando assim sua adequação para implementações futuras.

7. CONCLUSÕES

Os sistemas de armazenamento de energia ajudam a reduzir a incerteza associada ao sistema elétrico e a operações na rede elétrica. No entanto para incorporar sistemas de armazenamento de energia na rede, é essencial compreender os seus parâmetros técnicos, bem como os seus desempenhos económicos e ambientais.

Desta forma, os sistemas híbridos podem desempenhar um papel importante porque a combinação de duas tecnologias pode gerar um melhor desempenho em termos de custos e emissões do que um sistema singular.

O objetivo do estudo foi desenvolver um modelo que demonstrasse que um sistema híbrido tem um melhor desempenho económico e ambiental do que um sistema singular.

Os resultados mostram que o caso da bateria única de lítio é ligeiramente melhorado com a adição de uma bateria de vanádio ou supercondensadores. Isto porque a eficiência e degradação das baterias desempenham um papel impactante e estas tecnologias têm bons fatores de eficiência e degradação.

O método proposto mostra que a estratégia de utilização do sistema de armazenamento energia pode ter um elevado impacto na vida útil do ativo e no custo esperado do sistema, dependendo de fatores como a tecnologia utilizada, eficiência e o custo de degradação considerado. Com base no projeto conclui-se que melhorar a eficiência e a vida útil do ciclo pode reduzir os custos de fornecimento e as pegadas ambientais. Assim, a estratégia utilizada para as tecnologias escolhidas precisa ser baseada nesses parâmetros devido a essa influência.

Por outro lado, o surgimento de baterias de estado sólido, que são um tipo de tecnologia de baterias que usa materiais sólidos, como eletrólitos e elétrodos sólidos, em vez de eletrólitos líquidos ou de gel encontrados nas baterias tradicionais, pode fornecer soluções potenciais para os muitos problemas das baterias.

Apesar dos desafios a superar no desenvolvimento e comercialização de baterias de estado sólido, as baterias de estado sólido têm um enorme potencial para revolucionar o armazenamento de energia e alimentar várias aplicações, abrindo caminho para um futuro com tecnologias de baterias mais seguras, eficientes e duradouras.

Outra abordagem que pode ser considerada é o *value stacking*, onde combinando baterias, que se destacam no armazenamento de energia de longa duração e integração de energia renovável, com baterias projetadas para entrega rápida de energia e aplicações de alta potência, um sistema híbrido pode atender eficientemente a diversas procuras. Esta combinação de tecnologias permite maximizar o valor do sistema de armazenamento de energia e aumentar a relevância da hibridização de baterias.

Adicionalmente, a implementação bem-sucedida da API utilizando *FastAPI* proporcionou uma experiência de desenvolvimento ágil e eficiente, demonstrando a eficácia destas ferramentas. Esta implementação permitiu apresentar uma solução bastante completa, com funcionalidades robustas e uma interface de utilizador amigável, destacando-se como um marco significativo no contexto deste projeto.

Em relação às dificuldades encontradas no desenvolvimento do projeto, destaca-se a aprendizagem de uma nova linguagem de programação. O desafio de aprender e explorar funcionalidades específicas tornou-se uma tarefa exigente. Adicionalmente, a escassez de dados disponíveis na literatura para sustentar aspetos cruciais do modelo, como características de degradação de baterias específicas ou informações ambientais detalhadas, representou igualmente um desafio.

Além disso, a integração e comunicação eficientes utilizando *FastAPI* exigiram uma compreensão aprofundada de como cada componente funcionava. Investir tempo na compreensão dessas integrações foi crucial para o sucesso do projeto.

Relativamente ao trabalho futuro, a implementação de funcionalidades de autenticação e autorização na API pode ser explorada para garantir a segurança das interações.

Por fim, é gratificante saber que os desenvolvimentos deste projeto contribuíram para a escrita de um artigo, que se encontra atualmente em revisão no *Journal of Energy Storage*.

Em suma, considerando a solução apresentada e o objetivo do projeto na fase inicial, é possível afirmar que os objetivos propostos foram cumpridos, fazendo um balanço positivo do trabalho realizado.

REFERÊNCIAS

- [1] I. Energy Agency, “Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector,” 2050. [Online]. Available: www.iea.org/t&c/
- [2] BloombergNEF, “Global Energy Storage Market to Grow 15-Fold by 2030,” New York, Oct. 12, 2022. Accessed: Aug. 24, 2023. [Online]. Available: <https://about.bnef.com/blog/global-energy-storage-market-to-grow-15-fold-by-2030/>
- [3] “Energy Storage,” *International Energy Agency: IEA*, 2023, Accessed: Sep. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/electricity/grid-scale-storage>
- [4] “Energy Storage,” *International Energy Agency: IEA*, 2023, Accessed: Sep. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/electricity/grid-scale-storage>
- [5] M. DA Eletricidade, “ÍNDICE PANORAMA ENERGÉTICO NACIONAL E COMUNITÁRIO TROCAS INTERNACIONAIS DE PORTUGAL IMPACTO DO SETOR RENOVÁVEL NA DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA E NA ECONOMIA NACIONAL.”
- [6] P. Ferrão *et al.*, “Armazenamento de energia em Portugal.”
- [7] International Renewable Energy Agency., “Electricity storage and renewables : costs and markets to 2030,” Oct. 2017.
- [8] J. I. Leon, E. Dominguez, L. Wu, A. Marquez Alcaide, M. Reyes, and J. Liu, “Hybrid Energy Storage Systems: Concepts, Advantages, and Applications,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 15, no. 1, pp. 74–88, Mar. 2021, doi: 10.1109/MIE.2020.3016914.

- [9] Marlin O. Thurston, *BATTERY TECHNOLOGY HANDBOOK*.
- [10] G. Chaudhary, J. J. Lamb, O. S. Burheim, and B. Austbø, "Review of energy storage and energy management system control strategies in microgrids," *Energies*, vol. 14, no. 16. MDPI AG, Aug. 02, 2021. doi: 10.3390/en14164929.
- [11] "Batteries Overview," *Advanced Materials*.
- [12] N. P. Santos, "Supercondensadores-"O que são? Como Funcionam?"," 2013, doi: 10.13140/RG.2.2.27255.98729.
- [13] "Hidrogénio Verde," *TopSun Energia Solar*, 2023, Accessed: Dec. 21, 2023. [Online]. Available: <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/especial-publicitario/top-sun/top-sun-energia-solar/noticia/2023/06/13/saiba-o-que-e-hidrogenio-verde-combustivel-do-futuro-produzido-com-energia-solar.ghtml>
- [14] B. Zakeri and S. Syri, "Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42. Elsevier Ltd, pp. 569–596, 2015. doi: 10.1016/j.rser.2014.10.011.
- [15] Y. Li and J. Wu, "Optimum Integration of Solar Energy with Battery Energy Storage Systems," *IEEE Trans Eng Manag*, vol. 69, no. 3, pp. 697–707, Jun. 2022, doi: 10.1109/TEM.2020.2971246.
- [16] P. Siano and D. Mohammad, "MILP Optimization model for assessing the participation of distributed residential PV-battery systems in ancillary services market," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 348–357, Mar. 2021, doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.01170.
- [17] T. Pippia, J. Sijs, and B. De Schutter, "A Single-Level Rule-Based Model Predictive Control Approach for Energy Management of Grid-Connected Microgrids," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 28, no. 6, pp. 2364–2376, Nov. 2020, doi: 10.1109/TCST.2019.2945023.
- [18] P. Liu, Z. Cai, P. Xie, X. Li, and Y. Zhang, "A computationally efficient optimization method for battery storage in grid-connected microgrids based on a power

- exchanging process," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 8, 2019, doi: 10.3390/en12081512.
- [19] M. Farrokhifar, F. H. Aghdam, A. Alahyari, A. Monavari, and A. Safari, "Optimal energy management and sizing of renewable energy and battery systems in residential sectors via a stochastic MILP model," *Electric Power Systems Research*, vol. 187, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106483.
- [20] M. Andrychowicz, "The impact of energy storage along with the allocation of RES on the reduction of energy costs using MILP," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 13, Jul. 2021, doi: 10.3390/en14133783.
- [21] X. Wu, W. Zhao, X. Wang, and H. Li, "An MILP-Based Planning Model of a Photovoltaic/Diesel/Battery Stand-Alone Microgrid Considering the Reliability," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 12, no. 5, pp. 3809–3818, Sep. 2021, doi: 10.1109/TSG.2021.3084935.
- [22] IEEE Power & Energy Society. and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *ICPEA 2019 : 2019 IEEE 2nd International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA) : April 27-30, 2019, Singapore*.
- [23] J. M. Reniers, G. Mulder, S. Ober-Blöbaum, and D. A. Howey, "Improving optimal control of grid-connected lithium-ion batteries through more accurate battery and degradation modelling," *J Power Sources*, vol. 379, pp. 91–102, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.01.004.
- [24] M. M. Rahman, A. O. Oni, E. Gemechu, and A. Kumar, "Assessment of energy storage technologies: A review," *Energy Conversion and Management*, vol. 223. Elsevier Ltd, Nov. 01, 2020. doi: 10.1016/j.enconman.2020.113295.
- [25] R. Silva, C. Gouveia, L. Carvalho, and J. Pereira, "Improved battery storage systems modeling for predictive energy management applications," *22 Power Systems Computation Conference*, Jul. 2022.

- [26] M. Swierczynski, D. I. Stroe, A. I. Stan, R. Teodorescu, and D. U. Sauer, "Selection and performance-degradation modeling of limo2/li 4ti5o12 and lifepo4/c battery cells as suitable energy storage systems for grid integration with wind power plants: An example for the primary frequency regulation service," *IEEE Trans Sustain Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 90–101, Jan. 2014, doi: 10.1109/TSTE.2013.2273989.
- [27] pulp documentation team, "Optimization with PuLP." Accessed: Nov. 17, 2023. [Online]. Available: <https://coin-or.github.io/pulp/>
- [28] "CBC User Guide." Accessed: Nov. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.coin-or.org/Cbc/>
- [29] KENZIE, "PYTHON", Accessed: Nov. 12, 2023. [Online]. Available: <https://kenzie.com.br/blog/o-que-e-python/>
- [30] ALURA, "PYCHARM." Accessed: Nov. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.alura.com.br/apostila-python-orientacao-a-objetos/introducao-ao-pycharm>
- [31] "Entsoe Transparency Platform", Accessed: Oct. 26, 2023. [Online]. Available: <https://transparency.entsoe.eu/>
- [32] Abdulazeez Abdulazeez Adeshina, *Building Python Web APIs with FastAPI*. 2022.
- [33] IBM, "What is a REST API?", Accessed: Dec. 29, 2023. [Online]. Available: <https://www.ibm.com/topics/rest-apis>
- [34] Wikipedia, "REST", Accessed: Dec. 29, 2023. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/REST>
- [35] Sebastián Ramírez, "FastAPI." Accessed: Nov. 17, 2023. [Online]. Available: <https://fastapi.tiangolo.com/>
- [36] Postman, "Postman", Accessed: Jan. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.postman.com/>

ANEXO A.

Nomenclatura

Índices e conjuntos

$t \in T$ Conjunto de intervalos de tempo

Parâmetros

Δt	Duração dos intervalos de tempo (h)
$\hat{\lambda}_t^{market}$	Previsão preços de mercado (€/kWh)
\widehat{PCC}^{limit} (kW)	Máxima injeção/absorção de potência no ponto de conexão comum (PCC)
\hat{E}^{ini}	BESS energia inicial (kWh)
\bar{E}	BESS energia máxima (kWh)
\underline{E}	BESS energia mínima (kWh)
\hat{m}^{deg}	Declive de linearização da curva de degradação
$\hat{\eta}^+$	Eficiência da constante de carregamento ($\hat{\eta}^+ = \hat{\eta}^{inv} \cdot \hat{\eta}^c$)
$\hat{\eta}^-$	Eficiência da constante de descarregamento ($\hat{\eta}^- = \hat{\eta}^{inv} \cdot \hat{\eta}^d$)
$\overline{P_{(s)}^{AC,+}}$	BESS Potência máxima de carregamento (VA)
$P_{(s)}^{AC,-}$	BESS Potência máxima de descarregamento (VA)
$\underline{P_s^{AC,+}}$	BESS Potência mínima de carregamento (VA)

$\underline{P_s^{AC,-}}$ BESS Potência mínima de descarregamento (VA)

Variáveis

P_t^{abs} Potência absorvida no PCC (kW)

P_t^+ BESS Potência ativa de carregamento (kW)

P_t^- BESS Potência ativa de descarregamento (kW)

δ_t^{BESS} Variável binária auxiliar para não simultaneidade de fluxos inversos no BESS

δ_t^{PCC} Variável binária auxiliar para não simultaneidade de fluxos inversos PCC

E_t BESS Energia (kWh)

E_t^{deg} Energia degradada pelo BESS como resultado de um evento de descarga
(kWh)

ANEXO B.

```
class BESS:
    def __init__(self):
        # Input data
        self.bess_asset = None # Object to harbour the BESS's main characteristics
        self.bess_soc = None # Object to harbour measured BESS SoC
        self.deg_curve = None # Object to harbour BESS degradation curve

        # BESS's data
        self.nominal_voltage = None # Vdc
        self.initial_energy = None # BESS initial energy capacity, before any degradation (kWh)
        self.nominal_energy = None # kWh
        self.nominal_capacity = None # kAh
        self.max_e_bess = None # BESS's maximum E content (kWh)
        self.maximum_e_bess = None # BESS's maximum E content before any degradation (kWh)
        self.min_e_bess = None # BESS's minimum E content (kWh) or BESS's reserve SoC (>= minimum SoC) (kWh)
        self.initial_e_bess = None # BESS's initial E content (kWh)
        self.c_rate_max_ch = None # Maximum charging c-rate
        self.c_rate_max_disch = None # Maximum discharging c-rate
        self.p_dc_max_c = None # Maximum power rate for charging the battery from DC view point (kW)
        self.p_dc_max_d = None # Maximum power rate for discharging the battery from DC view point (kW)

        self.charge_slope = None # Line slope parameter for maximum BESS energy limit
        self.charge_origin = None # Line origin parameter for maximum BESS energy limit
        self.discharge_slope = None # Line slope parameter for minimum BESS energy limit
        self.discharge_origin = None # Line origin parameter for minimum BESS energy limit
        self.v_nom_charge = None # BESS's nominal charge voltage
        self.v_nom_discharge = None # BESS's nominal discharge voltage
        self.constant_eff_flag = None # Flag for considering efficiency as constant

        self.default_deg_slope = 4.5E-5 # Default degradation slope for when no data is provided
        self.deg_curve = None # Placeholder for degradation curves data provided
        self.deg_slope = None # Degradation curve linearization slope
        self.lifetime = None # Desired lifetime in years
        self.degradation_level = None # End Of Life Criterion in %
        self.capacity_loss = None # 100 - EOL Criterion
```

Figura 14 – Classe BESS

```

class Optimizer:
    def __init__(self, plot=False, solver='CBC'):
        # *****
        # MILP PARAMETERS: PULP PARAMETERS
        # *****
        self.solv = solver # solver chosen for the MILP
        self.mipgap = None # controls the solvers tolerance; intolerant [0 - 1] futile
        self.timeout = None # solvers temporal limit to find optimal solution, in seconds
        # *****
        # MILP PARAMETERS: TIME PARAMETERS
        # *****
        self.horizon = None # optimization horizon in hours
        self.step_in_seconds = None # time interval of each step, in seconds
        self.step_in_min = None # time interval of each step, in minutes
        self.step_in_hours = None # time interval of each step, in hours
        #self.step_in_days = None
        self.time_intervals = None # number of time intervals per horizon
        self.time_series = None # ex.: for 1 day, range(96)
        self.start_at = None # datetime for initial time step
        # *****
        # MILP PARAMETERS: OTHER
        # *****
        self.milp = None # stores the entire MILP problem (variables, objective function, restrictions and results)
        self.opt_val = None # stores the milp numeric solution
        self.stat = None # stores the status of the milp solution
        self.varis = None # Dictionary to store all output variables values
        self.outputs = None # Dictionary with the same structure as the outputs JSON that will be sent to the client
        self.plot = plot # If True, the results will be plotted after solving the MILP; only for test mode
        # *****
        # SYSTEM SETTINGS
        # *****
        self.pcc_limit_value = None # power limit that can be transacted with the grid at PCC in kW
        # *****
        # BESS PARAMETERS
        # *****
        self.bess = None # harbours a class with methods and parameters used for all bess in the system
        self.bess2 = None # harbours a class with methods and parameters used for all bess in the system
        # *****
        # FORECASTS
        # *****
        self.load_forecasts = None # forecasted_demand, in kWh, of the inflexible load
        self.market_prices = None # forecasted market prices in €/kWh

```

Figura 15 – Classe *Optimizer* (método: *Initialize*)

```

def __define_milp(self):

    T = self.time_series
    S = self.seg_series

    # *****
    #      OPTIMIZATION PROBLEM
    # *****
    self.milp = LpProblem(f'{self.common_fname}', LpMinimize)

    # *****
    #      INITIALIZE DECISION VARIABLES
    # *****
    # P absorption at the PCC (kW)
    p_abs = [LpVariable(f'p_abs_{t:03d}', lowBound=0) for t in T]
    # P injection at the PCC (kW)
    p_inj = [LpVariable(f'p_inj_{t:03d}', lowBound=0) for t in T]
    # Aux. binary variable for non simultaneity of PCC flows
    delta_pcc = [LpVariable(f'delta_pcc_{t:03d}', cat=LpBinary) for t in T]
    # Energy content of the BESS (kWh)
    e_bess = [LpVariable(f'e_bess_{t:03d}', lowBound=0) for t in T]
    # Energy content of the BESS (kWh)
    e_bess2 = [LpVariable(f'e_bess2_{t:03d}', lowBound=0) for t in T]
    # Energy degraded per time step (kWh)
    e_deg = [LpVariable(f'e_deg_{t:03d}', lowBound=0) for t in T]
    # Energy degraded per time step (kWh)
    e_deg2 = [LpVariable(f'e_deg2_{t:03d}', lowBound=0) for t in T]
    # Max E content for p_ch set point (kWh)
    max_e_bes = [LpVariable(f'max_e_bes_{t:03d}', lowBound=0) for t in T]
    # Min E content for p_disch set point (kWh)
    min_e_bes = [LpVariable(f'min_e_bes_{t:03d}', lowBound=0) for t in T]
    # Max E content for p_ch set point (kWh)
    max_e_bes2 = [LpVariable(f'max_e_bes2_{t:03d}', lowBound=0) for t in T]
    # Min E content for p_disch set point (kWh)
    min_e_bes2 = [LpVariable(f'min_e_bes2_{t:03d}', lowBound=0) for t in T]

```

Figura 16 – Definição do problema e das variáveis de decisão

```

# *****
#      OBJECTIVE FUNCTION
# *****
# Eq. (1)
if objective_function == "Cost":
    self.milp += lpSum((p_abs[t] * self.market_prices[t] + k1 * e_deg[t] + k2 * e_deg2[t]) for t in self.time_series) * self.step_in_hours, 'Objective Function'
else:
    self.milp += lpSum((p_abs[t] * self.market_prices[t] + C1 * e_deg[t] + C2 * e_deg2[t]) for t in self.time_series) * self.step_in_hours, 'Objective Function'

```

Figura 17 – Função Objetivo

```

# *****
#          CONSTRAINTS
# *****
for t in self.time_series:
    # Eq. (2)
    # -- define P charged - P discharged for each t, depending on the activation of addOnInv
    if not self.add_on_inv:
        bess_flows = p_ch[t] - p_disch[t]
        bess_flows2 = p_ch2[t] - p_disch2[t]
    else:
        bess_flows = lpSum((p_ch[s][t] - p_disch[s][t]) for s in S)
        bess_flows2 = lpSum((p_ch2[s][t] - p_disch2[s][t]) for s in S)

    # -- define the liquid consumption as load - generation (without bess flows)
    generation_and_demand = (self.load_forecasts[t] - self.pv_forecasts[t])
    self.milp += p_abs[t] == bess_flows + bess_flows2 + generation_and_demand, f'Equilibrium_{t:03d}'

    # Eq. (3)
    self.milp += p_abs[t] <= self.pcc_limit_value * delta_pcc[t], f'PCC_abs_limit_{t:03d}'

    if not self.add_on_inv:
        # Define variables for charging and discharging at DC-side
        bes_charge = p_ch[t] * self.bess.const_eff_ch
        bes_discharge = p_disch[t] * 1 / self.bess.const_eff_disch
        bes_charge2 = p_ch2[t] * self.bess2.const_eff_ch
        bes_discharge2 = p_disch2[t] * 1 / self.bess2.const_eff_disch

    # Eq. (5)
    self.milp += p_ch[t] <= self.bess.p_ac_max_c * delta_bess[t], \
        f'Max_AC_charge_rate_{t:03d}'
    self.milp += p_ch2[t] <= self.bess2.p_ac_max_c * delta_bess2[t], \
        f'Max_AC_charge2_rate_{t:03d}'

```

Figura 18 – Restrições do problema

```

def solve_milp(self):
    """
    Function that heads the definition and solution of the optimization problem.
    :return: None
    :rtype: None
    """
    logger.debug(' - defining MILP')
    self.milp = self.__define_milp()

    logger.debug(' - actually solving MILP')
    # noinspection PyBroadException
    try:
        self.milp.solve()
        stat = LpStatus[self.milp.status]
        opt_val = value(self.milp.objective)

    except Exception:
        logger.warning('Solver raised an error. Considering problem as "infeasible".')
        stat = 'Infeasible'
        opt_val = None

    self.stat = stat
    self.opt_val = opt_val

```

Figura 19 – Classe *Optimizer* (método: *Solve milp*)

```

def generate_outputs(self):
    """
    Function for generating the outputs of optimization, namely the set points for each asset and all relevant
    variables, and to convert them into JSON format.
    :return: None
    :rtype: None
    """
    if self.opt_val is None:
        # To avoid raising error whenever encountering the puLP solver error with CBC
        self.outputs = {}
    else:
        self.__get_variables_values()
        self.__initialize_and_populate_outputs()

    # Generate the outputs JSON file
    master_path = os.path.abspath(os.path.join(__file__, '..', '..', '..'))
    #structures_path = os.path.join('json', 'outputs.json')
    structures_path = os.path.join('outputs.json')
    output_path = os.path.join(master_path, structures_path)
    with open(output_path, 'w') as outfile:
        json.dump(self.outputs, outfile)

```

Figura 20 - Classe *Optimizer* (método: *Generate_outputs*)

```

def read_data(step):
    """Reader and parser for forecasted data:
    - generation (normalized 0-1),
    - load (inflexible; normalized 0-1),
    - price for energy consumed from the retailer (€/kWh) and
    - tariff for energy sold to the retailer (€/kWh)
    :param step: data and forecast step in minutes
    :type step: int
    :return: parsed dataframe with forecasts
    :rtype: pandas.core.frame.DataFrame"""

    t = time()
    logger.info('Reading and parsing forecasts ... ')

    # Read data in .csv as a dataframe; read index as datetime
    # dateparse = lambda x: dt.datetime.strptime(x, '%d/%m/%Y %H:%M:%S')
    dateparse = lambda x: dt.datetime.strptime(x, '%Y-%m-%d %H:%M:%S') # Adapte o formato conforme necessário
    data = pd.read_csv('arquivo_final.csv', parse_dates=['date'], index_col='date', decimal=',', sep=';',
                      date_parser=dateparse)
    data.index.rename('datetime', inplace=True)

    # Fix lacking market and feed-in values
    data['market'].replace(to_replace=0, method='ffill', inplace=True)

    data['load'] *= GeneralSettings.scale_load # Load nominal power in kW - load set points now in kWh

    # Resample data to step
    # To up-sample (H -> min) a last row must be included with the last index hour + 1
    # e.g. when upsampling from [01/01/2022 00:00, 01/01/2022 23:00] to a 15' step, [02/01/2022 00:00]
    # must be added so that the resample does not end at [01/01/2022 23:00] but at [01/01/2022 23:45]
    idx_freq = pd.infer_freq(data.index)
    new_entry_idx = data.index[-1] + pd.Timedelta(1, unit=idx_freq)
    data.loc[new_entry_idx, :] = data.loc[data.index[-1]]
    data = data.resample(f'{step}T').ffill()
    data = data.iloc[:-1]

    logger.info(f'Reading and parsing forecasts ... OK! ({time() - t:.3f}s)')

    return data

```

Figura 21 – Função `read_data`

```

def optimize(_settings, _assets, _assets2, _milp_params, _measures, _measures2, _forecasts):
    """
    Main optimization orchestrator.
    :param _settings:
    :param _assets:
    :param _assets2:
    :param _milp_params:
    :param _measures:
    :param _measures2:
    :param _forecasts:

    :return:
    """
    config_t = time()
    logger.info(f'Configuring data for MILP...')
    problem = Optimizer(plot=GeneralSettings.plot, solver='CBC')
    problem.initialize(_settings, _assets, _assets2, _milp_params, _measures, _measures2, _forecasts)
    logger.info(f'Configuring data for MILP ... OK! ({time() - config_t:.3f}s)')

    solve_t = time()
    logger.info(f'Solving MILP ...')
    problem.solve_milp()
    logger.info(f'Solving MILP ... OK! ({time() - solve_t:.3f}s)')

    outputs_t = time()
    logger.info(f'Generating outputs ...')
    problem.generate_outputs()
    logger.info(f'Generating outputs ... OK! ({time() - outputs_t:.3f}s)')

    return problem

```

Figura 22 – Função *optimize*