



SISTEMA DE ARMAZENAMENTO POR BATERIAS ? OPTIMIZAÇÃO DE FUNCIONAMENTO EM REDE PRIVADA

LUÍS PEDRO CRUZ COSTA

novembro de 2021

SISTEMA DE ARMAZENAMENTO POR BATERIAS – OPTIMIZAÇÃO DE FUNCIONAMENTO EM REDE PRIVADA

Luís Pedro Cruz Costa
Nº 1191162

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



SISTEMA DE ARMAZENAMENTO POR BATERIAS – OPTIMIZAÇÃO DO FUNCIONAMENTO EM REDE PRIVADA

Luís Pedro Cruz Costa
Nº 1191162

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Energias Sustentáveis, realizada sob a orientação do Doutor Carlos Felgueiras.

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutora Nídia de Sá Caetano

Professora Coordenadora do Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutor Manuel Carlos Malheiro de Carvalho Felgueiras

Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia do Porto

Supervisor

Engenheiro Pedro Mota

Strategic Development Manager na CapWatt Sonae Capital

Arguente

Doutor Luís Filipe de Oliveira Gomes

Investigador GECAD

AGRADECIMENTOS

Aproveito esta oportunidade para agradecer a todos aqueles que me ajudaram ao longo deste percurso universitário.

Agradeço à CapWatt pela disponibilidade e abertura de me receber. Um especial agradecimento ao colega Pedro Matos por toda a ajuda, simpatia e paciência que demonstrou sempre que precisei.

Agradecer também ao meu supervisor da CapWatt, Pedro Mota, pela ajuda, simpatia e principalmente pelo esforço que demonstrou para a realização desta dissertação, para além dos múltiplos conhecimentos passados.

Agradecer ainda ao meu orientador do ISEP, Prof. Carlos Felgueiras, pela ajuda dada na realização desta dissertação.

Quero agradecer ainda à minha família e amigos. À minha mãe pela paciência que teve comigo em momentos de maior *stress*, à minha namorada pelo apoio ao longo de todo este percurso, e aos meus grandes amigos Diogo Moreira e João Sousa, que estavam sempre lá quando necessário.

O Prof. Carlos Felgueiras, orientador desta dissertação, é membro integrado do CIETI– Centro de Inovação em Engenharia e Tecnologia Industrial, financiado pela Unidade de Investigação.

PALAVRAS CHAVE

Arbitragem; Armazenamento de energia; Baterias; CapWatt; Energias renováveis; Reutilizar.

RESUMO

A energia, tanto a nível global, como em Portugal, para além de fundamental para a produção de riqueza industrial, comercial e social, proporciona igualmente conforto e mobilidade pessoal. No entanto, os impactos negativos resultantes da sua produção e consumo, exercem pressões no meio ambiente. Ainda nos dias de hoje, a grande maioria das atividades energéticas realizadas pela Humanidade requerem ainda o uso de combustíveis fósseis, com efeito no aumento da temperatura média no planeta.

Uma vez que a procura e consumo de energia no planeta está a aumentar de modo a permitir melhorar a qualidade de vida, estes impactos serão cada vez mais severos e frequentes. O grande desafio da humanidade neste século passa pelo estudo e implementação de substitutos dos combustíveis fósseis como matéria-prima para produção energética. As fontes renováveis de energia, apesar da frequente evolução, ainda apresentam problemas que precisam de ser ultrapassados de maneira a ser possível tornar-se uma fonte de energia alternativa à dos combustíveis fósseis.

A energia elétrica pode ser facilmente gerada, transmitida e transformada, mas até ao presente não foi possível armazená-la de forma prática, fácil e barata. Isto implica que a energia elétrica deva ser sempre gerada em conformidade com a demanda. Consequentemente, as energias renováveis, como a solar e a eólica, vão necessitar do apoio de sistemas para se integrarem, evitando assim descargas de energia limpa em períodos de necessidade mínima e dando maior eficiência e segurança ao sistema elétrico.

O armazenamento de energia surge então como uma das soluções para este problema, sendo considerado por muitos autores a solução para ultrapassar as limitações decorrentes da geração intermitente inerente a uma parte substancial das fontes renováveis, tal como a energia solar ou a eólica. A principal função para estes sistemas de armazenamento de energia é compensar demandas no sistema elétrico, através da estabilização das variações de tensão que ocorrem nas redes de distribuição ou da eliminação de sobrecargas nas linhas de transmissão.

A presente Dissertação de Mestrado tem como objetivo fazer o estudo de optimização de sistemas de armazenamento de energia em baterias, num funcionamento em rede privada. No caso em apreço e disponível na CapWatt, analisaram-se diversas vertentes possíveis de serem optimizadas, nomeadamente a nível técnico, económico e ambiental, para aplicação em futuros sistemas de armazenamento de energia em baterias em redes privadas. O modo de optimização varia no que toca à proveniência da energia usada para carregar as baterias e também no tipo de funções que este sistema pode assumir. Os resultados obtidos demonstram diversas possibilidades de optimização em todas as vertentes.

KEYWORDS

Arbitrage; Batteries; CapWatt; Energy storage; Renewable energy; Reuse.

ABSTRACT

Energy, both globally and in Portugal, in addition to being fundamental for the production of industrial, commercial and social wealth, also provides comfort and personal mobility. However, the negative impacts resulting from its production and consumption exert pressure on the environment. Even today, most energy activities carried out by humanity still require the use of fossil fuels, with the effect of increasing the average temperature on the planet.

As the demand and consumption of energy on the planet is increasing in order to improve the quality of life, these impacts will be increasingly severe and frequent. The greatest challenge for humanity in this century is the study and implementation of substitutes for fossil fuels as raw material for energy production. Renewable energy sources, despite their frequent evolution, still present problems that need to be overcome in order to become an alternative energy source to fossil fuels.

Electric energy can be easily generated, transmitted and transformed, but until now it has not been possible to store it in a practical, easy and cheap way. This implies that electrical energy must always be generated in accordance with demand. Consequently, renewable energies (with a non-controllable typology) will need support from storage systems to integrate, thus avoiding clean energy discharges in periods of minimal need and providing greater efficiency and safety to the electrical system.

Energy storage emerges as one of the solutions to this problem, being considered by many authors as the solution to overcome the limitations arising from the intermittent generation inherent to a substantial part of renewable sources, such as solar or wind energy. The main function for these energy storage systems is to offset demands on the electrical system, by stabilizing the voltage variations that occur in the distribution networks or eliminating overloads in the transmission lines.

This Master's Thesis aims to study the optimization of energy storage systems in batteries, operating in a private network. In the case in question and available at CapWatt, several possible aspects of optimization were analyzed, namely at a technical, economic and environmental level, for application in future energy storage systems in batteries in private networks. The optimization mode varies regarding the origin of the energy used to charge the batteries and also the type of functions that this system can assume. The results obtained demonstrate several possibilities for optimization in all aspects.

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

Lista de Siglas

AC	Alternate Current
BESS	Battery Energy Storage Systems
BFR	Baterias de Fluxo Redox
BMU	Battery Management Unit
BNEF	BloombergNEF
BOP	Balance of Plant
BTM	Behind-The-Meter
CO ₂	Dióxido de Carbono
C&I	Commercial and Industrial
DC	Direct Current
DER	Distributed Energy Resources
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
DPV	Distributed Photovoltaic
ESS	Electric Storage Systems
EV	Electric vehicle
FTM	Front-off-The-meter
GEE	Gases com Efeito de Estufa
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
N ₂	Azoto
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
O ₂	Oxigénio
O&M	Operation and Maintenance
PCS	Power Conversion System
PNEC	Plano Nacional Integrado de Energia e Clima
PV	Photovoltaic
RMI	Rocky Mountain Institute
RNC	Roteiro para a Neutralidade Carbónica
Stor	Storage
TOU	Time of Use
UE	União Europeia
UPAC	Unidade de Produção de energia para Autoconsumo
UPS	Uninterruptible Power Supply
V2X	Vehicle to Everything

Lista de Abreviaturas

η_{sys}	Rendimento do sistema
B	Benefícios anuais totais
C_{BOP}	Balanço dos custos da planta
C_{cap}	Custo de capital total
C_{D}	Custo de desmantelamento
$C_{\text{D,PCS}}$	Custo de desmantelamento PCS
$C_{\text{D,stor}}$	Custo de desmantelamento stor
C_{L}	Custo de contabilização de perdas
$C_{\text{O\&M}}$	Custo de operação e manutenção
$C_{\text{O\&M,f}}$	Custos fixos O&M
$C_{\text{O\&M,v}}$	Custos variáveis O&M
C_{PCS}	Custo do sistema de conversão de energia
C_{perdas}	Coeficiente de perdas
C_{stor}	Custo para a secção de armazenamento
DoD	Depth of Discharge
E_{cap}	Energy Capacity
hp	Horas de ponta
i	Taxa de inflação
n	Ciclos de descarga completos por ano
P_{cap}	Power Capacity
P_{carr}	Perdas no carregamento
PR	Período de retorno
r	Taxa de desconto aplicável
SoH	State of Health
T	Vida útil do projeto
t	Imposto
t_{c}	Tempo de carga/descarga
TIR	Taxa interna de retorno
T_{PCS}	Tempo de vida do PCS
T_{stor}	Tempo de vida do stor
VAL	Valor presente líquido
WACC	Custo médio ponderado de capital

Lista de Símbolos

\$	Dólar
η	Eficiência
€	Euro
%	Porcentagem

Lista de Unidades

€/kW	Euro por quilowatt
€/kWh	Euro por quilowatt hora
\$/kW	Dólar por quilowatt
\$/kWh	Dólar por quilowatt hora
Ah	Ampere-hora
°C	Grau Celsius
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt hora
kg/MWh	Quilograma por megawatt hora
kW	Quilowatt
ktep	Quilo tonelada equivalente de petróleo
M€	Milhões de euros
MW	Megawatt
MWh	Megawatt hora
ppm	Partes por milhão
TWh	Teraatt hora
Wh	Watt hora
V	Volt

GLOSSÁRIO DE TERMOS

Distributed Energy Resources	Tecnologias e serviços que operam na distribuição ao nível da rede elétrica. Geralmente, abaixo da subestação onde a tensão transmitida é convertida para tensão distribuída: Geração distribuída, na resposta de demanda, eficiência energética, armazenamento distribuído, gestão de energia, veículos elétricos, otimização de tensão, etc.
Intergovernmental Panel on Climate Change	O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas é uma organização científico-política no âmbito das Nações Unidas pela iniciativa do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e da Organização Meteorológica Mundial;
National Oceanic and Atmospheric Administration	A Administração Nacional Oceânica e Atmosférica é uma instituição que faz parte do Departamento de Comércio dos Estados Unidos.
Net Metering	Procedimento no qual um consumidor de energia elétrica instala pequenos geradores em sua unidade consumidora e a energia gerada é usada para abater o consumo de energia elétrica da unidade. Diferentemente do <i>Feed-In Tariff</i> (FIT) ou medição por <i>Time of Use</i> (TOU), o net metering pode ser implementado sem requerer nenhuma medição especial, ou mesmo qualquer acordo ou notificação prévia. É uma política destinada a promover o investimento privado em energia renovável.
Plano Nacional Integrado de Energia e Clima	Instrumento de política nacional decisivo para a definição das linhas estratégicas para a próxima década rumo à neutralidade carbónica.
Roteiro para a Neutralidade Carbónica	Documento para assegurar a neutralidade das suas emissões até 2050, traçando uma visão clara relativamente à descarbonização profunda da economia nacional.
Time Of Use	Segregação das tarifas de energia com base no tempo em que a energia está sendo consumida. TOU é uma maneira pela qual os provedores de serviços públicos tentam aliviar a demanda durante os períodos de pico, aplicando uma estrutura tarifária que cobra uma taxa aumentada dentro dos períodos de consumo de pico típicos.

Unidade de
Produção de
energia para
Autoconsumo

Uma ou mais unidades de produção para autoconsumo, que tem como fonte primária a energia renovável associada(s) a uma ou várias instalações elétricas de utilização, destinada primordialmente à satisfação de necessidades próprias de abastecimento de energia elétrica, podendo ser propriedade ou gerida por terceiros para a colocação, exploração, incluindo a contagem, e manutenção, desde que a instalação continue sujeita às instruções do autoconsumidor de energia renovável, não sendo os terceiros considerados em si mesmos autoconsumidores de energia renovável.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - EVOLUÇÃO DA POTÊNCIA INSTALADA NOS CENTROS ELECTROPRODUTORES DE PORTUGAL CONTINENTAL [6].....	9
FIGURA 2 - EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO ELÉTRICA EM PORTUGAL CONTINENTAL [7].....	10
FIGURA 3 - CONSUMO DE ENERGIA PRIMÁRIA E FINAL EM 2019 [8]	11
FIGURA 4 - CONSUMO FINAL DE ENERGIA POR SETOR ECONÓMICO 2019 [8].....	12
FIGURA 5 - EVOLUÇÃO DO SALDO IMPORTADOR [11]	12
FIGURA 6 - TAXA DE DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA [8]	13
FIGURA 7 - EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES ESPECÍFICAS DO SETOR [12]	13
FIGURA 8 - ANOMALIAS GLOBAIS NA TEMPERATURA DA TERRA ENTRE 1880 E 2020 [17].....	14
FIGURA 9 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA ANUAL GLOBAL DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂) NA ATMOSFERA, MEDIDA EM PARTES POR MILHÃO (PPM) [16]	15
FIGURA 10 - ARMAZENAMENTO GLOBAL DA CAPACIDADE DE ENERGIA EM ARMazenada EM BATERIAS (2020-2050) [33]	21
FIGURA 11 - RESUMO DOS CAMPOS DE APLICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA [91]	25
FIGURA 12 - CATEGORIAS DE AÇÕES POLÍTICAS [39]	26
FIGURA 13 - PRINCÍPIO BÁSICO DO FUNCIONAMENTO DE UM ESS [40]	27
FIGURA 14 - SOLUÇÃO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA DA EDP, EM ÉVORA [42]	30
FIGURA 15 - SOLUÇÃO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NA ILHA GRACIOSA [46].....	31
FIGURA 16 - SISTEMAS FTM E BTM [52].....	39
FIGURA 17 - CAPACIDADE INSTALADA POR TIPO DE APLICAÇÃO (GW/ANO) [55].....	40
FIGURA 18 - TENDÊNCIA DO CUSTO DOS ESSS EM BTM A NÍVEL GLOBAL [54]	41
FIGURA 19 - CAPACIDADE INSTALADA DE ENERGIA DA REDE BESS EM 2018 [56].....	43
FIGURA 20 - FUNCIONAMENTO DPV BTM [59]	44
FIGURA 21 - APLICAÇÕES BESS NO SETOR DE C&I [61]	45
FIGURA 22 - FLUXOS DE VALOR DOS ESSS [66]	47
FIGURA 23 - TIPOS DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO INSTALADOS [68].....	48
FIGURA 24 - REPRESENTAÇÃO DA IMPORTÂNCIA DO VALUE STACKING [68].....	48
FIGURA 25 - APLICAÇÕES BESS [56].....	49
FIGURA 26 - DESPACHO COM E SEM BESS [70].....	50
FIGURA 27 - FONTES USADAS PARA SUAVIZAÇÃO DE POTÊNCIA PV [71].....	51

FIGURA 28 - SUAVIZAÇÃO DE POTÊNCIA COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA [70].....	51
FIGURA 29 - REGULAÇÃO DE FREQUÊNCIA POR BESS [70]	52
FIGURA 30 - DEMONSTRAÇÃO DE FUNCIONAMENTO DA APLICAÇÃO PEAK SHAVING [52].....	54
FIGURA 31 - CICLOS SEMANAIS DISPONÍVEIS PARA CLIENTES MT EM PORTUGAL CONTINENTAL.....	55
FIGURA 32 - PREÇO DAS TARIFAS TRANSITÓRIAS DE VENDA A CLIENTES FINAIS [79].....	56
FIGURA 33 - CONCEITO DE ARBITRAGEM DE ENERGIA [80].....	57
FIGURA 34 - CUSTOS DE SUBSTITUIÇÃO E DESMANTELAMENTO – VALORES UTILIZADOS.....	59
FIGURA 35 - SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA CAPWATT	64
FIGURA 36 - TOPOLOGIA DO SISTEMA DE BATERIAS	64
FIGURA 37 - EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE DO SISTEMA DE BATERIAS (1 CICLO)	65
FIGURA 38 - EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE DO SISTEMA DE BATERIAS (2 CICLOS).....	66
FIGURA 39 - FIGURA REPRESENTATIVA DE PEAK SHAVING (SITE: WWW.EDF-RE.DE)	67
FIGURA 40 - FIGURA REPRESENTATIVA DA ARBITRAGEM DE ENERGIA (FONTE: EE PUBLISHERS).....	67
FIGURA 41 - SECÇÃO PRINCIPAL DO ESS E PERDAS DE ENERGIA [82].....	69
FIGURA 42 - ETAPAS NA ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO.....	70

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - INSTALAÇÕES DE ARMAZENAMENTO EM PORTUGAL COM CAPACIDADE SUPERIOR A 500 KW [37].....	29
TABELA 2 - APLICAÇÕES DE BTM ESSS [54]	42
TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS GLOBAIS DO SISTEMA DE BATERIAS.....	65
TABELA 4 - CONDIÇÕES FINANCEIRAS: VALORES UTILIZADOS	70
TABELA 5 - EQUIVALÊNCIA ENTRE DOCUMENTOS	71
TABELA 6 - CUSTO TOTAL DE CAPITAL: VALORES UTILIZADOS.....	71
TABELA 7 - VALORES FIXOS E VARIÁVEIS DE O&M [82].....	72
TABELA 8 - VALORES USADOS DE O&M	72
TABELA 9 - CUSTOS DE SUBSTITUIÇÃO E DESMANTELAMENTO – VALORES TÍPICOS ANALISADOS.....	73
TABELA 10 - CUSTOS DE SUBSTITUIÇÃO E DESMANTELAMENTO – VALORES UTILIZADOS.....	73
TABELA 11 - VALORES DE INPUT.....	78
TABELA 12 - NÚMERO DE CICLOS ANUAIS	79
TABELA 13 - PERÍODOS DE COMPRA E VENDA DE ENERGIA	79
TABELA 14 - Nº DE HORAS DE PONTA DIÁRIO.....	79
TABELA 15 - PARÂMETROS <i>MÉTODO A</i>	80
TABELA 16 -PARÂMETROS DO <i>MÉTODO A</i>	81
TABELA 17 - VALORES DE ENTRADA DE ENERGIA DO <i>MÉTODO A</i>	81
TABELA 18 - PARÂMETROS DO <i>MÉTODO B</i>	82
TABELA 19 - VALORES DE ENTRADA DE ENERGIA DO <i>MÉTODO B</i>	82
TABELA 20 - PARÂMETROS DO <i>MÉTODO A</i>	83
TABELA 21 - VALORES DE SAÍDA DE ENERGIA NO <i>MÉTODO A</i>	83
TABELA 22 - PARÂMETROS DO <i>MÉTODO B</i>	84
TABELA 23 - VALORES DE SAÍDA DE ENERGIA NO <i>MÉTODO B</i>	84
TABELA 24 - VALORES DE COMPRA ESTIMADOS NO <i>MÉTODO B</i>	85
TABELA 25 - VALORES DE VENDA ESTIMADOS NO <i>MÉTODO B</i>	86
TABELA 26 - VALORES DE VENDA ESTIMADOS NO <i>MÉTODO B</i>	87
TABELA 27 - BENEFÍCIOS ANUAIS TOTAIS NO <i>MÉTODO B</i>	88
TABELA 28 - BENEFÍCIOS ANUAIS TOTAIS NO <i>MÉTODO C</i>	88
TABELA 29 - RESULTADOS ECONÓMICOS DO <i>MÉTODO B</i> NO ANO 2020	96

TABELA 30 - RESULTADOS ECONÓMICOS DO <i>MÉTODO B</i> NO ANO 2025	96
TABELA 31 - RESULTADOS ECONÓMICOS DO <i>MÉTODO C</i> NO ANO 2025	96

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento e motivação.....	1
1.2	Objetivos da dissertação	2
1.3	Metodologia de investigação.....	2
1.4	Apresentação da empresa	2
1.5	Conteúdo da dissertação	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Panorama energético atual.....	7
2.1.1	Energia na Europa	8
2.1.2	Energia em Portugal	8
2.2	Evolução do mundo energético	14
2.2.1	Alterações climáticas.....	14
2.2.2	Transição energética	18
2.3	Sistemas de armazenamento de energia.....	22
2.3.1	Definição de sistemas de armazenamento de energia	22
2.3.2	Mercados no armazenamento de energia	25
2.3.3	Funcionamento de um sistema de armazenamento de energia.....	27
2.3.4	Custos de armazenamento de energia em baterias.....	28
2.3.5	Viabilidade financeira dos sistemas de armazenamento de energia	28
2.3.6	Principais sistemas de armazenamento em Portugal	29
2.4	Sistemas de baterias	32
2.4.1	Características de uma bateria.....	32
2.4.2	Comparação entre tipologias de baterias	33
3	SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA	37
3.1	Objetivos energéticos na indústria	37

3.2	Soluções para os desafios energéticos.....	38
3.2.1	Cogeração.....	38
3.2.2	Sistemas de baterias.....	38
3.3	Utilização de sistemas de baterias em mercado industrial.....	39
3.3.1	Sistemas behind-the-meter (BTM) e front-of-the-meter (FTM)	39
3.3.2	Sistemas BTM	40
3.3.3	Sistemas de armazenamento em baterias BTM.....	43
3.3.4	Sistemas BTM BESS em C&I.....	45
3.3.5	Evolução no mercado BTM no setor C&I.....	45
3.4	Serviços BTM ESS utilizados em mercado industrial.....	47
3.4.1	Definição dos serviços BTM BESS em mercado industrial.....	50
3.5	Análise de impactes ambientais das baterias	58
4	CASO DE ESTUDO CAPWATT	63
4.1	Sistema ESS-CAPWATT	63
4.1.1	Aplicações do sistema BESS CapWatt.....	63
4.1.2	Tecnologia e componentes	64
4.1.3	Descrição técnica do sistema de baterias	65
4.1.4	Vida cíclica	65
4.1.5	Eficiência.....	66
4.1.6	Exploração alternativa do sistema de baterias	66
4.2	Serviços do sistema ESS-CAPWATT	67
4.2.1	Peak shaving.....	67
4.2.2	Arbitragem de energia	67
4.3	Metodologia.....	68
4.3.1	Metodologia vertente técnica e ambiental.....	68
4.3.2	Metodologia vertente económica.....	68
4.4	Optimização técnica de sistema.....	75
4.4.1	Propostas de optimização de sistema	75
4.4.2	Sistemas de carregamento de veículos elétricos	76

4.4.3	Gestão de Cargas	77
4.5	Optimização económica de sistema.....	78
4.5.1	Dados.....	78
4.5.2	Definição do funcionamento do sistema	79
4.5.3	Benefícios	80
4.6	Optimização ambiental de sistema.....	89
4.6.1	Avaliação das baterias em fim de vida	89
4.6.2	Atualidade	90
4.6.3	Tendências Globais.....	91
5	ANÁLISE DE RESULTADOS	95
5.1	Análise dos resultados da optimização técnica	95
5.2	Análise dos resultados da optimização económica	95
5.3	Análise dos resultados da optimização ambiental.....	97
6	CONCLUSÕES.....	101
6.1	Propostas de trabalhos futuros.....	102
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
	ANEXOS.....	113
	Tecnologias e aplicações dos ESS.....	113
	Análise económica	114
	Tabela de preços de energia.....	114
	Dados 2020	114
	Cálculo económico 2020.....	114
	Dados 2025	115
	Cálculo económico 2025.....	115
	Cálculo económico 2025 – 30% ER	115

INTRODUÇÃO

- 1.1 ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO
- 1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO
- 1.3 METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO
- 1.4 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA
- 1.5 CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO

1 INTRODUÇÃO

A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito da unidade curricular Dissertação, que integra o segundo ano do Mestrado de Energias Sustentáveis, do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Esta Dissertação foi desenvolvida, na empresa CapWatt, cuja atividade incide na promoção de soluções integradas de energia, otimizando a relação entre a produção descentralizada, a comercialização de energia, o fornecimento de serviços de gestão energética e postos de carregamento para veículos elétricos, centralizando todas as informações numa multiplataforma digital e contribuindo para um paradigma energético sustentável.

Neste capítulo é descrito o enquadramento e motivação, os objetivos, a metodologia de investigação, a apresentação da empresa e os conteúdos da dissertação.

1.1 Enquadramento e motivação

A Humanidade, desde a sua origem, dependeu sempre de alguma forma de energia para se poder desenvolver. Só ao longo dos últimos séculos, é que a forma como criamos e utilizamos a energia se desenvolveu mais rapidamente. Estas mudanças ocorreram desde a utilização de combustíveis de biomassa, como a madeira, nos primórdios da Humanidade, à utilização de combustíveis fósseis, introduzidos durante a revolução industrial, e de momento a aposta ao que se chamam energias renováveis, como a energia solar, a eólica e a hídrica. A aposta neste tipo de energias aconteceu uma vez que a utilização de combustíveis fósseis como fonte de energia provou ser prejudicial para o ambiente, onde a queima destes para produção de energia elétrica é um dos maiores contribuidores para as alterações climáticas.

Apesar da solução encontrada ajudar a mitigar alguns problemas impostos pela utilização destes combustíveis, outros problemas foram surgindo à medida que a sua implementação aumentava. Os problemas mais significativos que surgiram advêm da variabilidade e imprevisibilidade que este tipo de energias apresentam.

De forma a encontrar e analisar soluções para estes problemas, este estudo apresenta diversos sistemas de armazenamento de energia, onde se focará num em particular, presente na empresa CapWatt. Estes sistemas podem ajudar a resolver estas questões, e quanto mais eficaz e otimizada for a sua utilização, melhores resultados serão obtidos.

1.2 Objetivos da dissertação

Este trabalho tem como objetivo principal a otimização técnica, económica e ambiental de sistemas de armazenamento de energia, considerando a sua integração com os sistemas de produção e consumo existentes em polo industrial, para um funcionamento otimizado. Tudo isto é realizado com base nas características técnicas do sistema presente na CapWatt.

1.3 Metodologia de investigação

De modo a atingir o objetivo proposto para este estudo, a metodologia utilizada, tanto para a otimização técnica como para a ambiental, consistiu na procura de soluções através da análise de sistemas otimizados nas duas vertentes e perceber de que maneira essa otimização poderia ser replicada no sistema apresentado. Na vertente económica seguiu-se uma metodologia de análise económica com base na tese *Techno-economic analysis of the deployment potential of energy storage for grid connected applications*, de Niklas Sebastian Güntern, no âmbito do Mestrado de Engenharia e Gestão de Energia, no Instituto Superior Técnico de Lisboa, utilizando as características e especificações técnicas similares ao sistema de armazenamento de energia instalado na CapWatt. Esta vertente têm também por base um artigo que será usado *Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis*. Outro artigo usado neste capítulo é *The new rules of competition in energy storage* da empresa *Mckinsey&Company*.

1.4 Apresentação da empresa

A CapWatt é uma empresa integralmente detida pela Sonae Capital, constituída em 2008 tirando partido da experiência e *know-how* existente no desenvolvimento, operação e manutenção de projetos de produção descentralizada de energia no Grupo, que remonta ao final da década de 80, transformando assim um conjunto de ativos e competências num negócio autónomo e focado na otimização da eficiência energética dos nossos clientes. Esta empresa promove soluções integradas de energia, otimizando a relação entre a produção descentralizada, a comercialização de energia, o fornecimento de serviços de gestão energética e postos de carregamento para veículos elétricos, centralizando todas as informações numa multiplataforma digital e contribuindo para um paradigma energético sustentável. A CapWatt está ainda a desenvolver diversos projetos piloto na área da energia, entre eles, um sistema de armazenamento de energia por baterias de Lítio-Fosfato, o qual será o principal foco deste estudo.

1.5 Conteúdo da dissertação

O presente documento divide-se em cinco capítulos.

No capítulo Revisão bibliográfica, fez-se um enquadramento energético global, com apresentação dos impactos e objetivos globais. São apresentados diversos sistemas de armazenamento de energia, nomeadamente os sistemas de baterias, e o seu papel no cumprimento desses objetivos. Dentro destes sistemas o foco passa pelos sistemas de armazenamento em baterias, onde são apresentadas comparações entre os tipos de baterias utilizados.

No capítulo Sistemas de armazenamento de energia na indústria, é feito um enquadramento do mercado industrial a nível energético, focado em sistemas de baterias em contexto industrial e as suas aplicações. Para além disso são apresentados os principais serviços fornecidos por estes sistemas, bem como a sua definição. Por fim é feita uma consideração sobre o impacto ambiental das baterias utilizadas neste tipo de sistemas.

No capítulo Caso de estudo CapWatt apresenta-se o projeto da CapWatt com a sua descrição e caracterização. É apresentado também os serviços fornecidos por este sistema e apresentada a metodologia utilizada para a optimização do sistema em estudo. Por fim é demonstrado o trabalho desenvolvido da optimização deste sistema nas 3 vertentes propostas.

No capítulo Análise de resultados, são apresentados os resultados obtidos em todas as vertentes, a validação do trabalho e as métricas utilizadas na elaboração deste trabalho.

No capítulo Conclusões, discutem-se os resultados obtidos e propõem-se novos trabalhos que poderão acrescentar algo a este estudo.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 PANORAMA ENERGÉTICO ATUAL
- 2.2 EVOLUÇÃO DO MUNDO ENERGÉTICO
- 2.3 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA
- 2.4 SISTEMAS DE BATERIAS

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo faz-se um enquadramento energético global, com apresentação dos impactos e objetivos globais. São apresentados diversos sistemas de armazenamento de energia, nomeadamente os sistemas de baterias, e o seu papel no cumprimento desses objetivos. Dentro destes sistemas o foco passa pelos sistemas de armazenamento em baterias, onde são apresentadas comparações entre os tipos de baterias utilizados.

2.1 Panorama energético atual

A energia, tanto a nível global, como no nosso país, para além de fundamental para a produção de riqueza industrial, comercial e social, proporciona igualmente conforto e mobilidade pessoal. O desenvolvimento económico mundial ao longo dos tempos está diretamente ligado ao uso da energia. Tem, no entanto, impactos negativos resultantes da sua produção e consumo, pois exercem pressão no ambiente através das emissões de Gases com Efeito de Estufa (GEE), uso dos solos, geração de resíduos e acidentais derrames de petróleo. Estes impactos contribuem para as alterações climáticas, danificam diversos ecossistemas naturais e têm efeitos adversos na saúde humana. Ainda hoje, a maior parte das atividades energéticas realizadas pela Humanidade são baseadas na utilização de combustíveis fósseis, aumentando as concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂), que, por sua vez, tem efeito no aumento da temperatura média no planeta. São igualmente libertados poluentes atmosféricos (e.g., dióxido de enxofre, óxidos de azoto e partículas), que têm impacto na qualidade do ar. Este aumento tem repercussão nas alterações climáticas, que será abordado posteriormente [1].

Uma vez que a procura e consumo de energia no planeta está a aumentar, de modo a permitir melhorar a qualidade de vida, as emissões daqueles gases irão também aumentar, como consequência. O grande desafio da humanidade neste século passa pelo estudo e implementação de substitutos dos combustíveis fósseis como matéria-prima para produção energética, já com metas europeias e nacionais muito ambiciosas, como será visto mais à frente. As fontes renováveis de energia têm um amplo papel na satisfação destas necessidades, tendo vindo a evoluir, melhorar, e são cada vez mais importantes no panorama energético global, mas têm que ser integradas em associação com outros mecanismos para que sejam viáveis.

2.1.1 Energia na Europa

A taxa de dependência energética da União Europeia (UE) em 2017 foi de 55%, o que significa que mais de metade da energia necessária dos 28 Estados-membros teve de ser coberta por importações. As principais importações são de petróleo e derivados, quase 2/3, seguindo-se o gás natural e os combustíveis fósseis sólidos, como o carvão [2].

A Rússia dispõe de um papel central no que toca ao abastecimento energético da UE, onde representa 30% das importações de petróleo, 39% das de gás natural e 40% das de carvão, o que demonstra a grande dependência energética da UE neste país [2]. A Noruega também tem um papel fundamental no abastecimento europeu de combustíveis fósseis, representando 25% do gás natural e mais de 11% do petróleo.

Embora haja variabilidade de país para país, em 2017, o petróleo e os seus derivados representaram 41% do consumo final na UE, seguindo-se o gás natural com 22%. O uso direto de fontes de energia renováveis como a madeira ou o solar térmico representou apenas 9% do consumo final, mas quando temos em conta a transformação da água, sol e vento em eletricidade esta representou 21% do consumo. Os combustíveis fósseis sólidos representam apenas 3%. As famílias europeias são responsáveis por 25% do consumo energético, a indústria consome uma fatia de 31% e os transportes 28%. Aos serviços cabe 13% e à agricultura 2% [2].

A produção de eletricidade na UE traduz realidades muito distintas: França é campeã do nuclear e Chipre depende em larga escala do petróleo. Na Estónia e Polónia, quase 80% da produção é assegurada pelo uso do carvão, enquanto na Dinamarca as renováveis, essencialmente a eólica, já representam quase 71%. No conjunto, 44% da eletricidade produzida na UE em 2017 resultaram da queima de combustíveis fósseis, 31% tiveram origem em fontes renováveis e 25% provieram de centrais nucleares. Nas renováveis, a eólica contribuiu com 11%, a hídrica com 10%, a biomassa com 6% e a solar com 4% [2].

2.1.2 Energia em Portugal

O setor energético em Portugal é um pilar fundamental da economia nacional, quer do ponto de vista do cidadão quer do ponto de vista das empresas. Dada a sua natureza, é um sistema complexo que envolve diversas instituições e agentes, e que está em constante mudança para se adaptar aos desafios globais e europeus [3].

Portugal, não sendo um país com recursos fósseis conhecidos, tem apostado em domínios mais inovadores e disruptivos no setor energético. Nos últimos anos tem vindo a estabelecer objetivos ambiciosos a todos os níveis, desde a eficiência energética, a produção de energia através de fontes renováveis, ao desenvolvimento das infraestruturas de rede e interligações nas redes inteligentes ou na estratégia para os gases renováveis, incluindo o hidrogénio.

Esta é uma política de verdadeiro investimento na transição energética, virada para a redução da dependência energética, do aumento da sustentabilidade da produção e uso da energia e que tem como objetivo de longo prazo atingir a neutralidade carbónica da sociedade portuguesa em 2050 [4].

As três transições fundamentais no setor energético em Portugal passam pela descarbonização da sociedade, o desenvolvimento de uma economia circular e eficiente na utilização de recursos e a valorização do território nacional. Estas transições impõem uma forte visão transversal e colaborativa, que permita ao país atingir as metas de desenvolvimento sustentável que ambiciona.

2.1.2.1 Produção elétrica em Portugal

Como referido anteriormente, as relações existentes entre o setor energético e o ambiente são bastante significativas, visto que alguns dos principais impactos da atividade humana no ambiente são provenientes tanto da produção como do consumo de energia. Alguns dos problemas mais relevantes estão associados às emissões para a atmosfera de gases com efeito de estufa, bem como de outros poluentes, como o dióxido de carbono, o dióxido de enxofre e os óxidos de azoto [5].

As medidas necessárias para a garantir o mais elevado nível de eficiência energética possível e atenuar o problema das emissões devem estar presentes nas fases de produção, de transformação, de distribuição e de utilização da energia [5]. Tudo isto leva a uma aposta nas energias renováveis, como podemos observar na Figura 1 através da evolução da potência instalada nos centros electroprodutores em Portugal Continental, nos últimos 20 anos [6].

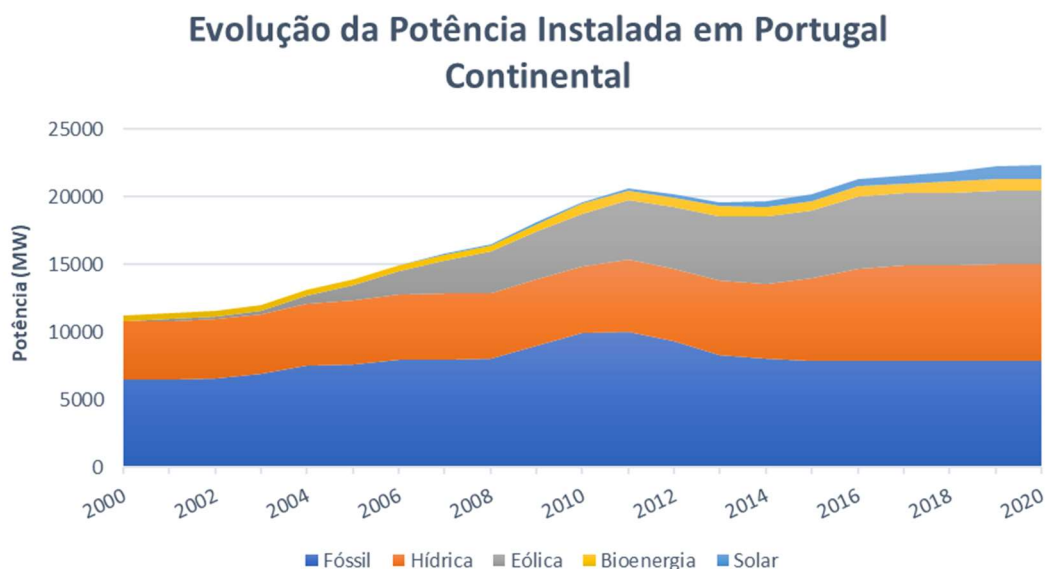


Figura 1 - Evolução da Potência Instalada nos Centros Electroprodutores de Portugal Continental [6]

Desde 2005 verificou-se um acréscimo da potência renovável instalada, sendo que o parque electroprodutor conta hoje com mais 56 % da potência instalada que a verificada nesse ano. Por sua vez, desde 2011 a potência fóssil instalada tem vindo a apresentar uma redução [6].

Nestes últimos vinte anos notamos uma tendência em relação ao grande aumento de produção de energia de fonte renovável, principalmente da eólica, desempenhando um papel cada vez mais determinante para redução da dependência de energias fósseis no que diz respeito a eletricidade produzida [7]. Isto pode ser observado na Figura 2.

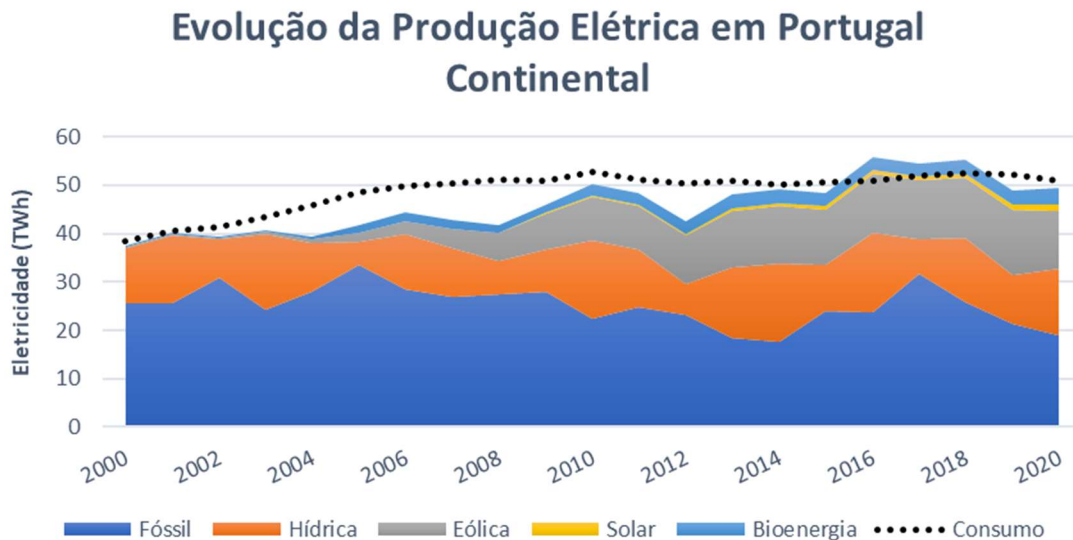


Figura 2 - Evolução da Produção Elétrica em Portugal Continental [7]

Mesmo com os esforços realizados na exploração das energias renováveis, e apesar dos bons resultados, Portugal é ainda dependente do exterior quando falamos em produção de energia, como podemos perceber através da curva de consumos apresentada na Figura 2. Sendo um país de escassos recursos energéticos de origem fóssil, como referido anteriormente, a sua importação representa ainda um fardo substancial a nível económico e ambiental, que é imperativo reduzir.

2.1.2.2 Consumo de energia em Portugal

Em 2019 o consumo de energia primária desceu 0,9% em relação a 2018, principalmente devido à menor utilização do carvão nas centrais termoelétricas. O consumo de energia final aumentou 1,9% relativamente a 2018, sobretudo com o aumento do consumo de derivados de petróleo, nomeadamente combustíveis rodoviários. Analisando a Figura 3, o consumo tanto de energia primária como na energia final, denotamos ainda uma grande dependência dos combustíveis fósseis [8].

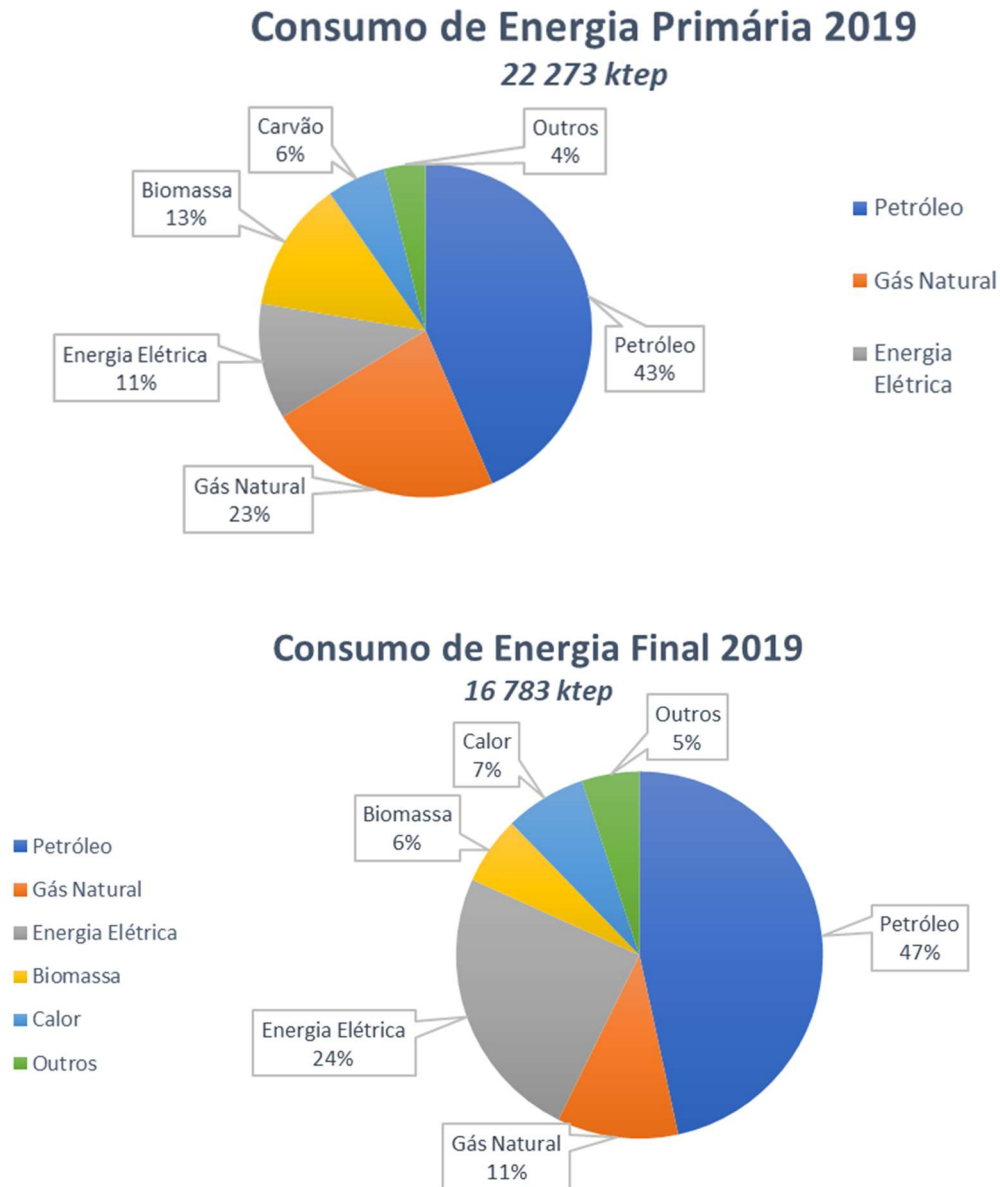


Figura 3 - Consumo de Energia Primária e Final em 2019 [8]

O setor dos transportes e da indústria são os sectores de atividade com maior peso no consumo final de energia, correspondendo respetivamente a 36% e 29,7%, sendo por isso os maiores contribuintes para pressões ambientais como as alterações climáticas, na base do aquecimento global [8]. Estes valores podem ser observados na Figura 4.

Consumo final de energia por setor económico 2019

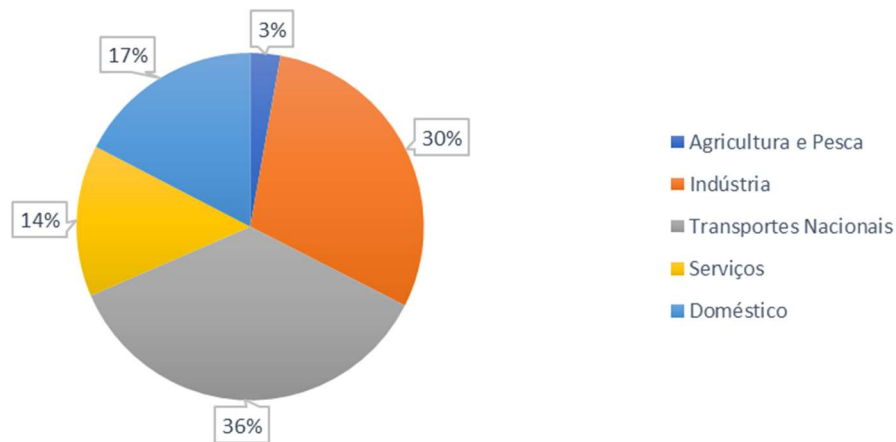


Figura 4 - Consumo final de energia por setor económico 2019 [8]

2.1.2.3 Saldo importador e dependência energética

Em termos médios e para os últimos dez anos, o nosso saldo importador em produtos energéticos tem sido cerca de 5 000 M€/ano, onde a maior responsabilidade por este défice reside nos produtos petrolíferos. Já a eletricidade tem vindo a dar um contributo favorável, mas é, ainda assim, residual face ao montante global do saldo importador. Importa ainda referir que no período 2012 – 2016 o saldo importador caiu cerca de 13%/ano em termos médios, aspeto a que o aumento da penetração das renováveis e baixa do preço do petróleo não foram alheios [9]. Estas mudanças na evolução do saldo importador nacional entre 2007 e 2019 podem ser observadas na Figura 5 [10][11]. Mais recentemente, e contrariando a tendência dos dois anos anteriores, em 2019, face a 2018, ocorreu uma melhoria de 3,8% em euros [11].

Evolução do saldo importador em milhões de euros

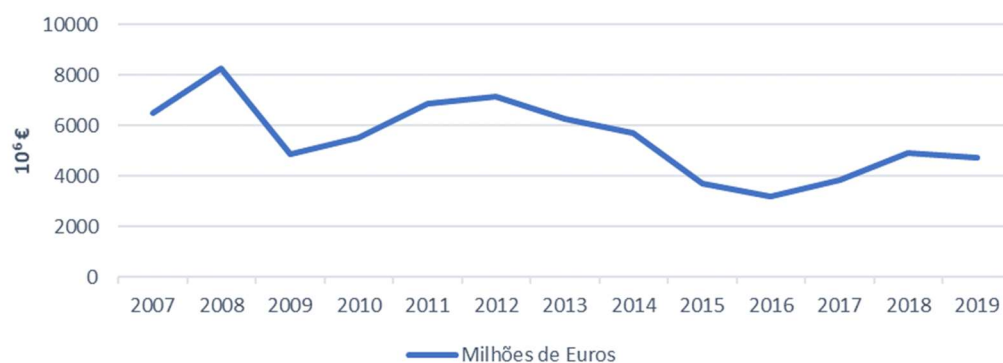


Figura 5 - Evolução do saldo importador [11]

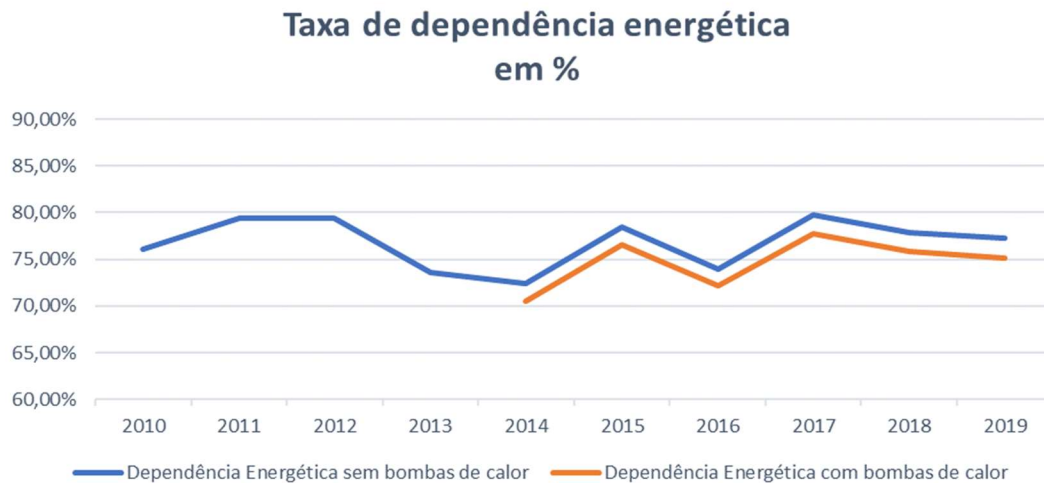


Figura 6 - Taxa de dependência energética [8]

Embora a taxa de dependência energética, observada na Figura 6 [8], tenha caído nestes últimos dois anos, Portugal continua a ser um dos países da União Europeia mais dependentes de terceiros. Com estes pontos de partida e tendo em conta o objetivo de atingir neutralidade carbónica em 2050, a ideia de transição energética é um imperativo nacional no que respeita à segurança do abastecimento, interface energia/ambiente e eficiência e competitividade do sector energético.

2.1.2.4 Emissões específicas do setor elétrico

O acréscimo de produção renovável tem permitido reduzir as emissões específicas do setor electroprodutor nacional, que, juntamente com a redução no consumo verificada em 2020 resultante da pandemia da COVID-19, permitiu que o valor de 2020 caísse para os 162 kgCO₂/MWh, uma redução de 69 % face ao valor registado no início do século, observável na Figura 7 [12]. Nos próximos anos prevê-se que a eletricidade renovável continue a influenciar a descarbonização da sociedade portuguesa, motivada pela previsão de aumento da produção de energia elétrica de origem renovável e de descontinuação das centrais a carvão [12].

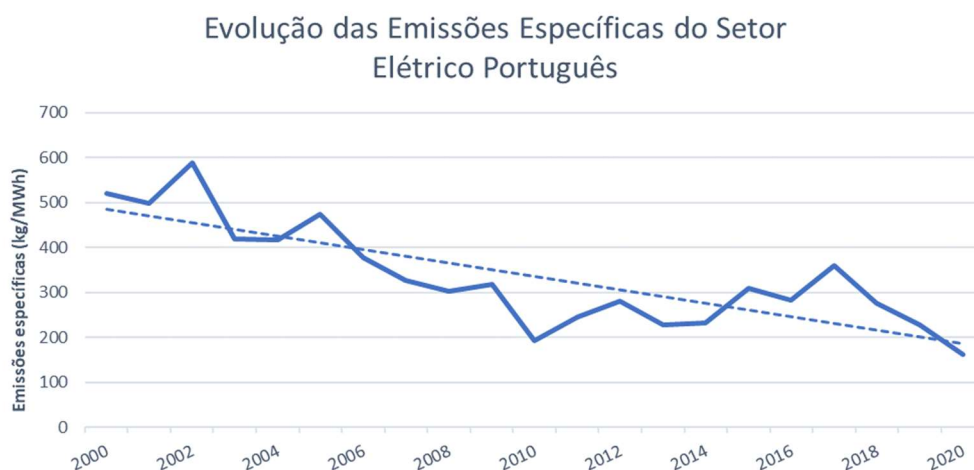


Figura 7 - Evolução das Emissões Específicas do Setor [12]

2.2 Evolução do mundo energético

Neste capítulo são abordadas as mudanças ao nível energético pela qual o nosso mundo têm passado, quais as razões para estas mudanças e a finalidade dessas mudanças.

2.2.1 Alterações climáticas

O clima na Terra está a sofrer diversas alterações demonstradas em mudanças nos padrões de temperatura, oceanos, ecossistemas e muito mais. São estas mudanças com efeitos nefastos, a que se dá o nome de alterações climáticas [13].

A temperatura da Terra tem vindo a aumentar, mas os últimos cinco anos foram os mais quentes desde que há registos. Se 2016 continua a ser o ano que registou maior variação da temperatura global [14], 2020 é o segundo ano mais quente já registado para o planeta, derrubando 2019 para o terceiro ano mais quente, de acordo com uma análise feita por cientistas da NOAA [15]. A crise climática é o maior desafio que o nosso mundo enfrenta. Se quisermos manter o aumento da temperatura global abaixo de 1,5 graus Celsius em comparação com os níveis pré-industriais, a emissão de gases de efeito estufa causadas pelo homem precisam de cair pelo menos 50% até 2030, de acordo com o IPCC [16].

O termo anomalia de temperatura significa um desvio face a um valor de referência ou à média de longo prazo. Uma anomalia positiva indica que a temperatura observada foi mais quente que o valor de referência, enquanto uma anomalia negativa indica que a temperatura observada foi mais baixa que o valor de referência. Nos últimos 30 anos as anomalias mensais foram sempre superiores à média do século XX [14]. Esta evolução pode ser vista na Figura 8 [17].

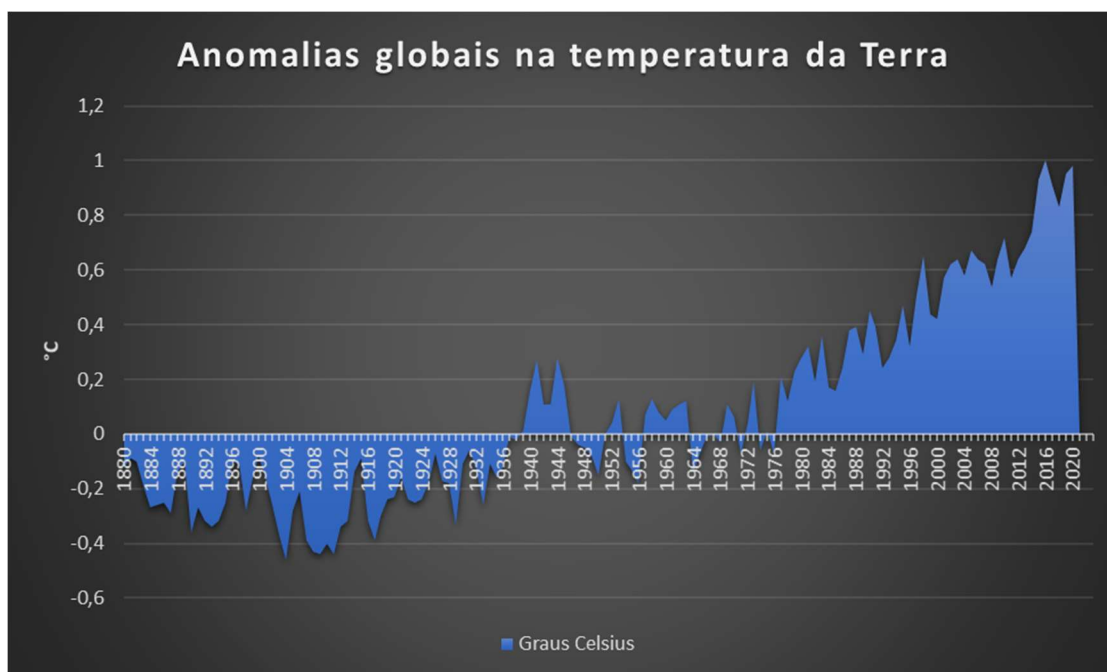


Figura 8 - Anomalias globais na temperatura da Terra entre 1880 e 2020 [17]

A atmosfera é uma camada constituída por vários gases que envolve o planeta, sendo os principais o Azoto (N_2) e o Oxigénio (O_2) que, juntos, compõem cerca de 99% da atmosfera. Alguns outros gases encontram-se presentes em pequenas quantidades, entre eles os GEE que causam o fenómeno denominado efeito de estufa [13].

O aumento das emissões de GEE deve-se, na sua maioria a [13]:

- Queima de carvão, petróleo ou gás que produz CO_2 e N_2O ;
- Desflorestação, uma vez que as árvores ajudam a regular o clima absorvendo o CO_2 presente na atmosfera. Quando são abatidas, esse efeito benéfico desaparece e o carbono deixa de ser armazenado e permanece na atmosfera, reforçando o efeito de estufa;
- Aumento da atividade pecuária: produz grandes quantidades de CH_4 durante a digestão dos alimentos;
- Utilização de fertilizantes que contêm azoto, estes produzem emissões de N_2O ;

O aumento destas emissões intensificam o fenómeno denominado aquecimento global. Segundo o IPCC, *“Estima-se que as atividades humanas tenham causado cerca de 1,0°C de aquecimento global, acima dos níveis pré-industriais, com uma variação provável de 0,8°C a 1,2°C. É provável que o aquecimento global atinja 1,5°C entre 2030 e 2052, caso continue a aumentar no ritmo atual”* [16]. Este aumento pode ser verificado na Figura 9 [16].

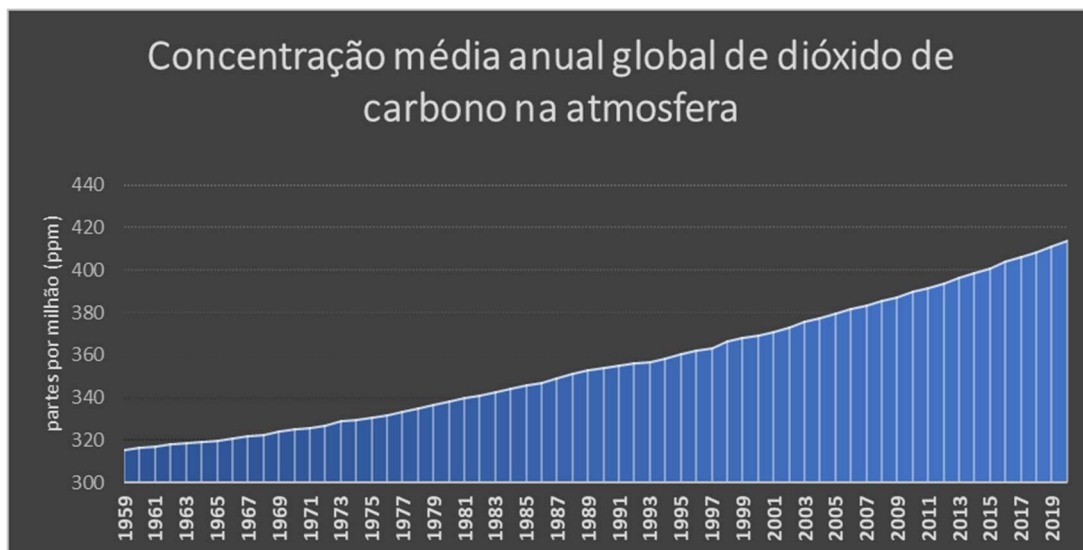


Figura 9 - Concentração média anual global de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, medida em partes por milhão (ppm) [16]

Atualmente, o aquecimento global antrópico estimado vem aumentando em 0,2°C por década, devido a emissões passadas e atuais, sendo os últimos valores de janeiro de 2021 de 0,80°C [17]. Um aumento de 2 °C em relação à temperatura na era pré-industrial é considerado pelos cientistas como o limite acima do qual existe um risco muito mais elevado de consequências ambientais à escala mundial perigosas e, eventualmente, catastróficas. Por esta razão, a comunidade internacional reconheceu a necessidade de manter o aquecimento global abaixo de 2 °C [13].

Consequências das alterações climáticas [13] :

- Custos para a sociedade e a economia: Os danos patrimoniais, para as infraestruturas e para a saúde humana representam pesados encargos para a sociedade e economia;
- Fusão do gelo e subida das águas do mar: O aquecimento global provoca a fusão dos lençóis de gelo e dos glaciares polares levando a uma subida do nível do mar que tem como resultado a inundação e a erosão de zonas costeiras e de baixa altitude;
- Fenómenos meteorológicos extremos, alterações nos padrões de pluviosidade: As chuvas torrenciais e outros fenómenos meteorológicos extremos estão a tornar-se cada vez mais frequentes;
- Riscos para a vida selvagem: As alterações climáticas estão a ser tão rápidas que estão a pôr em causa a capacidade de adaptação de muitas plantas e animais. A acidificação dos oceanos diminuiu o rendimento da indústria pesqueira e destrói os recifes de coral.

Para evitar estes acontecimentos, temos a nível internacional acordos assinados, como é o caso do Acordo de Paris, a nível mundial, e do *Green Deal*, a nível europeu, com o objetivo de evitar estas projeções.

2.2.1.1 Acordo de Paris

O Acordo de Paris trata-se de um compromisso com o principal objetivo de alcançar a descarbonização das economias mundiais e estabelecer o limite do aumento da temperatura média global a níveis abaixo dos 2 graus centígrados acima dos níveis pré-industriais [18]. Este acordo determina que cada país deva apresentar, de cinco em cinco anos, planos nacionais com os objetivos a que se propõe cumprir para mitigar as alterações climáticas [19].

Em 2015, quando o Acordo de Paris foi assinado, Portugal já tinha assumido metas de redução de emissões enquadradas no pacote 2030 da união europeia. Nesse ano Portugal contou com emissões de gases com efeito de estufa da ordem das 68 milhões de toneladas, sendo a produção e transformação de energia e os transportes os principais responsáveis pelas emissões a nível nacional. As renováveis contribuíram, então, para 53% da produção de eletricidade e Portugal revelou estar mais dependente das importações de energia do que a maioria dos países europeus (78%) [19].

Principais resultados do Acordo de Paris em Portugal de 2015-2019

- Diminuição em 16% da intensidade energética (tep/M€);
- Diminuição em 20% da intensidade carbónica (tCO₂eq/M€);
- Diminuição em 26% das emissões nacionais (MtonCO₂eq);
- Aumento em 5% na produção de energia de fontes renováveis.

2.2.1.2 Green deal

O pacto ecológico europeu - *Green Deal*, é uma iniciativa da comissão europeia que propõe 50 medidas para que a Europa se torne o primeiro continente do mundo a atingir a neutralidade climática até 2050 [20]. As medidas, acompanhadas de um roteiro de políticas fundamentais, vão desde a redução das emissões até ao investimento em investigação e inovação e a preservação do ambiente da Europa [21]. As primeiras iniciativas de ação climática no âmbito do *Green Deal* incluem [22][23]:

- A Lei Europeia do Clima, que tem por objetivo consagrar na lei o objetivo de neutralidade climática até 2050 para a economia e sociedade europeias, estabelecido no Pacto Ecológico Europeu;
- O Pacto Europeu para o Clima, que visa envolver os cidadãos e todos setores da sociedade na ação climática;
- O Plano para atingir a Meta Climática fixada para 2030, que visa reduzir ainda mais as emissões líquidas de gases com efeito de estufa em pelo menos 55 % até 2030.

Tendo em conta estas iniciativas, surgiram planos em Portugal para o cumprimento das metas como o PNEC 2030 e o RNC 2050. O Plano Nacional Integrado de Energia e Clima - PNEC 2030 - é o principal instrumento de política energética e climática para o período 2021-2030 [24]. Os objetivos, metas e medidas nele definidos visam as 5 dimensões da união da energia: descarbonização; eficiência energética; mercado interno de energia; segurança energética; e investigação, inovação e competitividade [24]. O Roteiro para a Neutralidade Carbónica - RNC 2050, apresenta uma visão estratégica e narrativa para a descarbonização da economia nacional e consequente neutralidade carbónica até 2050 [25].

Metas nacionais definidas para 2030 e 2050, respectivamente:

- Emissões GEE: 2030 – redução entre 45% a 55% / 2050 – redução em 99%
- Eficiência energética: 2030 e 2050 - Valores de 35%;
- Renováveis: 47%;
- Renováveis nos transportes: 20%;
- Interligações elétricas: 15%;
- Dependência energética: 2030 – redução para 65% / 2050 – redução para 20%

Para garantir o cumprimento das metas e dos objetivos, foram definidos alguns objetivos estratégicos nacionais, estando igualmente articulados/relacionados com as cinco dimensões da união da Energia [24] :

- Descarbonizar a economia nacional;
- Dar prioridade à eficiência energética;
- Reforçar a aposta nas energias renováveis e reduzir a dependência energética do país;
- Promover a mobilidade sustentável;
- Desenvolver uma indústria inovadora e competitiva.

2.2.2 Transição energética

Como vimos, a vertente mais importante em que assentam os objetivos energéticos falados anteriormente passa pela transição energética. Uma transição energética representa uma mudança gradual na composição e estrutura do sistema energético, passando por uma mudança na utilização de combustíveis com necessidade de redução de emissões de gases de efeito estufa em foco [26]. Na prática é a aposta nas energias renováveis e num consumo mais sustentável e eficiente.

A descarbonização do sistema de energia é crítico para atingir os objetivos climáticos pretendidos em 2030 e 2050. O setor elétrico deverá assentar crescentemente em energias renováveis, complementado pelo rápido abandono do carvão e da descarbonização do gás natural, ao mesmo tempo que o fornecimento de energia é seguro e acessível aos consumidores e empresas [27]. O crescimento na demanda global de energia tem uma base ampla em todos os principais setores da economia global. O setor industrial atualmente consome cerca de metade de toda a energia global e matéria-prima combustíveis, com residenciais e edifícios comerciais e transporte contabilizando para o restante [28].

Uma transição energética nas próximas décadas que reduza a importância dos combustíveis fósseis depende fortemente do desenvolvimento da mobilidade elétrica e de uma elevada penetração das energias renováveis na produção de eletricidade [26].

2.2.2.1 O papel das energias renováveis

As energias solares e eólicas demonstram uma elevada maturidade tecnológica e competitividade económica, condições essenciais para a sua expansão, mas dependem de fatores como a meteorologia, que aumenta o risco de a sua disponibilidade não se adequar aos ciclos/picos de consumo. Uma crescente penetração das energias renováveis, em particular da eólica e solar, representa um desafio colossal para o sistema elétrico e para a segurança dos abastecimentos por duas razões principais [26]:

1. são menos estáveis do que os combustíveis fósseis e nuclear, já que a sua produção tem flutuações importantes (variações diárias, sazonais e geográficas);
2. com a descentralização da sua produção (crescimento do número de produtores dispersos geograficamente), as redes de transmissão e distribuição elétricas têm de ser bidirecionais (satisfazer o consumo e receber/distribuir a produção).

Além disso, a transição para a mobilidade elétrica provocará um crescimento importante do consumo de eletricidade, exigindo o reforço, modernização e expansão das infraestruturas elétricas que terão de ser altamente eficientes [26].

Face aos desafios identificados, a par do desenvolvimento de novos e mais potentes sistemas de armazenamento de energia e da necessidade de garantir elevados ganhos de eficiência, as redes inteligentes de energia desempenharão um papel central e prometem transformações radicais [26].

2.2.2.2 Restrições das energias renováveis

As restrições derivadas da variabilidade e imprevisibilidade (intermitência) do vento e do sol criam o desafio de se equilibrar oferta e consumo, de forma instantânea [29]:

- Variabilidade

A produção de energia proveniente da eólica varia ao longo do tempo devido às flutuações da velocidade do vento. A produção de energia fotovoltaica, por sua vez, varia em função da posição do sol ao longo do dia, da estação do ano, e da ocorrência ou não de nuvens. Além disto, durante a noite não há produção de energia. Estas flutuações fazem com que a geração de outras fontes e a carga tenham de ser modificadas mais rapidamente e/ou mais frequentemente do que o que já é requerido de forma a manter o equilíbrio entre oferta e demanda. Ou seja, o sistema precisa responder rápido o suficiente para responder a estas rápidas e relevantes mudanças [29].

- Incerteza

A incerteza está relacionada com o grau de previsibilidade da produção de eletricidade. Não é possível de se prever completamente a velocidade do vento e a irradiação solar. Portanto, o nível de produção proveniente destas fontes, eólica ou solar fotovoltaica, não pode ser determinado com certeza [29].

De maneira geral, a geração solar é mais previsível que a geração eólica. Medidas que reduzam a incerteza podem afetar o tipo e a quantidade de reserva requerida de forma a manter a confiabilidade do sistema. Estas medidas têm dois principais objetivos: primeiro, ter a previsão de dados disponível; segundo, usar as informações de forma a influenciar as decisões operacionais [29].

2.2.2.3 Produção descentralizada

Entende-se por produção descentralizada, um modelo de produção de energia elétrica que difere do padrão tradicional de produção de energia a partir de infraestruturas ligadas a uma rede de transmissão e distribuição para o consumidor final, seja ele privado ou empresarial [30]. Um sistema de produção de eletricidade para autoconsumo ou venda da energia à rede permite produzir energia solar fotovoltaica ou eólica em instalações elétricas em empresas, instituições ou casas.

No regime de autoconsumo, durante o dia a eletricidade produzida é consumida pelos equipamentos em funcionamento e, se existir algum excedente de eletricidade esta poderá ser utilizada através de um sistema de gestão de energia, ativando equipamentos da instalação (climatização, bombas, etc.) ou em alternativa o excedente pode ser vendido à rede e a produção remunerada, de acordo com o tarifário definido [31].

O conceito de *prosumer* — alguém que produz e consome energia — ganha contornos cada vez mais precisos e operativos graças a uma conjugação ímpar entre, por um lado, o aumento, a diversificação e, conseqüentemente, a redução de custo de tecnologias de apoio à produção e, por outro lado, o aumento constante da produção elétrica através de fontes renováveis, como a energia solar ou eólica. Estes fatores podem levar a que consumidores passivos se tornem consumidores autossustentáveis, produzindo, pelo menos em parte, aquilo que consomem [30].

A produção descentralizada de energia possui inúmeras vantagens a nível ambiental, social e económico, entre as quais se destacam [31] [32]:

- Redução das emissões de gases com efeito de estufa, uma vez que esta energia é produzida a partir de fontes renováveis;
- Melhoria da balança comercial nacional, pois prevê-se uma redução na importação de energia e no pagamento de direitos de emissão de CO₂;
- Possibilidade de redução da potência contratada e custo com potência de horas de ponta;
- Abrir a possibilidade de armazenamento de energia.

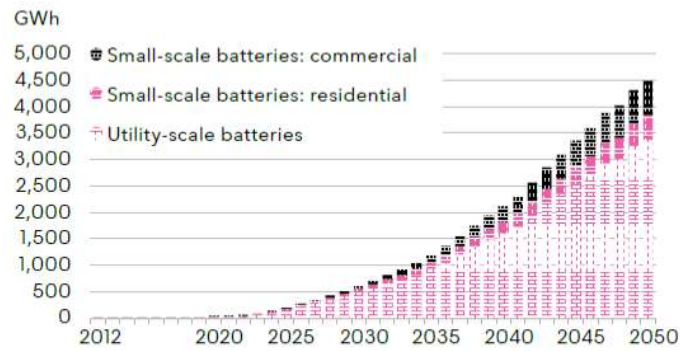
O nosso país apresenta condições ímpares para a produção descentralizada de energia a partir de fontes renováveis, destacando-se a energia solar. Sendo que o modelo clássico de produção e transmissão de energia se depara com um número cada vez maior de dificuldades, a produção descentralizada recorrendo a fontes renováveis responde a esses problemas e permite uma maior flexibilidade na escolha das fontes de produção de energia mais adequadas [32].

2.2.2.4 O papel do armazenamento de energia

O armazenamento de energia terá uma grande importância nas próximas décadas, como podemos observar na Figura 10. As energias renováveis e as baterias serão base fulcral para a evolução nos sistemas de armazenamento. A energia fotovoltaica cria uma oportunidade para a energia eólica e para as baterias através do colapso dos preços durante o dia, forçando as centrais térmicas tradicionais a desacelerar ou até mesmo a desligar. Os custos adicionais incorridos para a produção voltar a subir para a noite, eleva os preços da energia, criando horas de alto valor que a energia eólica ou as baterias podem usar [33].

A explosão expectável de tecnologias renováveis, incluindo baterias, antecipa o grande consumo de materiais metálicos. O relatório do banco mundial de 2017 projetou um aumento de mais de 1000% na procura por metais para tecnologias de armazenamento de bateria de energia, e de 200% para tecnologias eólica e solar para responder aos objetivos do Acordo de Paris [34]. Importa refletir que a transição energética deve ser desenvolvida alinhada com a sustentabilidade do planeta, para que o novo sistema energético não origine novos problemas ambientais.

Figure 3: Global cumulative battery storage energy capacity, 2020-2050



Source: BloombergNEF

Figura 10 - Armazenamento global da capacidade de energia em armazenada em baterias (2020-2050) [33]

2.3 Sistemas de armazenamento de energia

O armazenamento de energia é considerado por muitos autores a solução para o problema da geração intermitente através da maior parte das fontes renováveis, tais como a energia solar e a eólica. A principal função para estes sistemas de armazenamento de energia é equilibrar a produção/demanda no sistema elétrico, através da estabilização das variações de tensão que ocorrem nas redes de distribuição ou da eliminação de sobrecargas nas linhas de transmissão [35].

A energia elétrica pode ser facilmente gerada, transmitida e transformada, mas até hoje não foi possível armazená-la de forma prática, fácil e barata. Isto implica que a energia elétrica deva ser sempre gerada em conformidade com a demanda e, conseqüentemente, as energias renováveis, como a solar e a eólica, vão precisar de apoio dos sistemas de armazenamento para se integrarem, evitem descargas de energia limpa em períodos de necessidade mínima e darem maior eficiência e segurança ao sistema elétrico [36]. Deste modo, o armazenamento de energia é apenas uma das ferramentas de flexibilização numa nova lógica para manter a estabilidade das diferentes redes de transporte e distribuição de energia nas diferentes escalas temporais otimizando o custo desse processo [37].

2.3.1 Definição de sistemas de armazenamento de energia

O termo - *armazenamento de energia* - refere-se ao armazenamento de energia num qualquer tipo de forma (e.g., térmico, químico, elétrico), junto com um mecanismo adequado de conversão da energia armazenada. Os dispositivos de armazenamento são geralmente caracterizados pela quantidade máxima de energia que conseguem carregar e depois descarregar, num determinado intervalo de tempo, pela taxa máxima a que essa energia pode ser usada, que é dado pela relação entre a energia armazenada e a potência à qual o dispositivo opera [38]. A sua implementação traz benefícios para a produção, para as redes de transporte, distribuição e também para os consumidores, promovendo também benefícios no planeamento e operação do sistema elétrico [38].

Os benefícios da utilização de sistemas de armazenamento podem ser divididos pelos seguintes campos [38]:

- Estabilização de rede: o armazenamento pode ser usado para apoiar a rede de transporte ou distribuição a voltar ao funcionamento normal após uma perturbação;
- Qualidade e fiabilidade de abastecimento - podem ser utilizados para melhorar a qualidade e a fiabilidade dos sistemas elétricos;
- Transferência de carga - obtida através de uma estratégia de armazenamento de energia durante os períodos de vazio para libertar essa energia nos períodos de pico. A forma mais comum de proceder é através da suavização dos picos da curva de carga;

- Suporte na integração de energia renovável intermitente - algumas das aplicações de sistemas de armazenamento em fontes de energia renovável são:
 - Suporte de frequência e sincronismo com reserva girante - a intermitência e a sua variabilidade das energias renováveis podem levar a desequilíbrios entre geração e carga que por sua vez causam desvios de frequência. O armazenamento pode oferecer uma resposta rápida para este tipo de desequilíbrios sem o nível de emissões relacionadas com as soluções convencionais;
 - Redução das perdas de transmissão - a geração de energia eólica é muitas vezes localizada em zonas remotas que são mal servidas em termos de capacidade de transporte e distribuição. Um sistema de armazenamento pode permitir controlar o excesso de energia, reentregando-o à rede quando o sistema de transporte e/ou distribuição não estiver congestionado;
 - Arbitragem (time shifting) – os sistemas de armazenamento podem ser usados para armazenar a energia gerada durante os períodos de vazio para entregar essa energia nas horas de ponta.
- Suporte operacional de rede: o armazenamento de energia também pode ser usado em operações de suporte de rede tais como:
 - Serviço de regulação de frequência - os sistemas de armazenamento podem carregar ou descarregar energia da rede para manter a frequência da rede face a flutuações na produção e na carga;
 - Reserva de contingência - ao nível do transporte a reserva de contingência inclui a reserva que fornece energia até duas horas em resposta a uma súbita falha de geração ou transmissão;
 - Suporte de tensão - envolve a injeção ou absorção de energia reativa da rede, para que a mesma mantenha a tensão do sistema dentro dos limites regulados;
 - Unidades black start - fornecem a capacidade de arranque de um sistema após um encerramento completo, sem o apoio da rede.

Nos dias de hoje, o armazenamento é geralmente usado em cinco aplicações, com utilizações *atrás do medidor* – BTM (Behind-The-Meter) e em utilizações *à frente do medidor* – FTM – (Front-of-The-Meter) [35]:

No que respeita ao caso de FTM, podemos distinguir as seguintes aplicações:

- No armazenamento centralizado, que tem como objetivo substituir máquinas geradoras a gás ou diesel/óleo, que são acionadas em horários de maior demanda;
- No suporte à transmissão e distribuição, através da instalação de sistemas de armazenamento próximos a subestações, com a finalidade de estabilizar a rede elétrica;
- No suporte a sistemas de produção de energia renováveis de geração centralizada, com sistemas de armazenamento de energia capazes de amortecer a intermitência da geração solar ou eólica.

No que respeita ao caso BTM, podemos ter as seguintes aplicações:

- Em instalações comerciais e industriais, que visam reduzir o custo da energia na ponta e o custo na procura;
- Em instalações residenciais, para consumidores interessados em ter mais autonomia da rede elétrica e no melhor aproveitamento dos sistemas fotovoltaicos.

Os sistemas de armazenamento podem conferir um valor agregado a todos os elos da cadeia de suprimentos. Dependendo da sua capacidade, os sistemas de armazenamento de energia podem ser divididos em [36]:

- Armazenamento em grande escala, utilizado em lugares onde se trabalha com escalas de GW;
- Armazenamento em redes e ativos de geração, onde se trabalha com escalas de MW e;
- Armazenamento a nível de utilizador final, usado em níveis residenciais e com kW.

Tecnologias de armazenamento de grande escala [38]:

- Centrais hídricas equipadas com bombagem - armazenando energia sob forma de potencial hidráulico. Atualmente é a tecnologia mais utilizada para aplicações que necessitam de elevada energia;
- Térmico ou sistemas solares fotovoltaicos - Armazena energia solar sob forma de calor;
- Baterias de fluxo regenerativo ou pilhas de combustível reversível - Esta tecnologia liberta e armazena energia através de reações eletroquímicas reversíveis, sendo uma das maiores vantagens destas baterias a possibilidade em serem recarregadas quase que instantaneamente com a troca da solução eletrolítica;
- Hidrogénio - A energia do hidrogénio é a energia que se obtém da combinação do hidrogénio com o oxigénio produzindo vapor de água e libertando energia que é convertida em eletricidade.

Tecnologias de armazenamento de pequena escala [38]:

- Volantes de inércia ou flywheels - Consiste em fazer girar uma massa com elevada constante de inércia no veio de um motor ou gerador elétrico, promovendo assim o armazenamento de energia sob a forma de energia cinética durante variações de potência;
- Condensadores eletromecânicos ou supercondensadores - Têm as mesmas funções do condensador e da bateria eletroquímica, apenas não têm reações químicas. O armazenamento de energia é efetuado na dupla camada elétrica de dois condensadores em série, que é formada entre cada eletrodo e eletrólito de iões respetivamente;
- Químico (baterias) - Conjunto de duas ou mais células eletroquímicas (eletrodo positivo e eletrodo negativo em contato através de um eletrólito) que permite obter energia elétrica a partir de energia química; Exemplos de baterias de estado sólido são as de iões de lítio (Li-íon), Níquel-Cádmio (Ni-Cd) e as baterias de sal fundido (NaS);
- Supercondensadores magnéticos (SMES) - São sistemas que armazenam energia através de um campo magnético, criada circulação de corrente contínua numa indutância supercondutora, que foi criogenicamente arrefecida até uma temperatura abaixo da sua temperatura crítica supercondutora. Embora o objetivo final de um sistema de energia seja o armazenamento da mesma durante um período de tempo para fornecer a mesma num período posterior, existem diversos modos de aplicação.

O resumo dos campos de aplicação das tecnologias de armazenamento de energia pode ser observado na Figura 11.

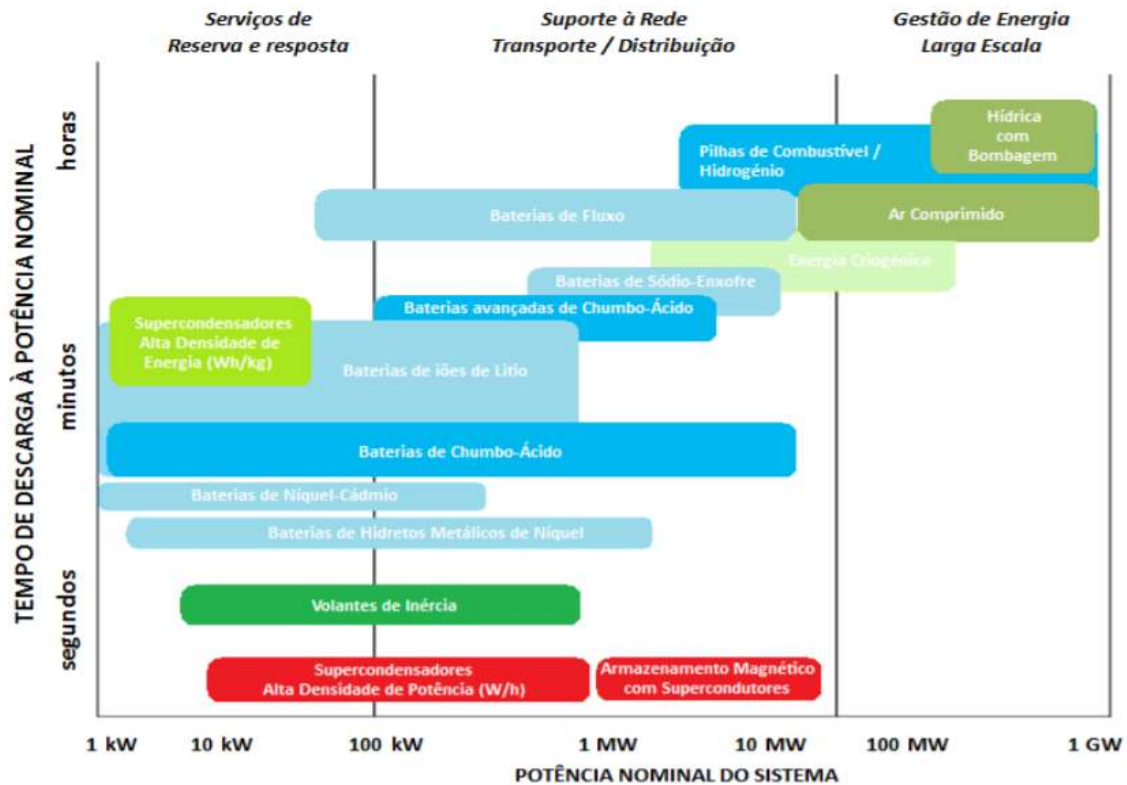


Figura 11 - Resumo dos campos de aplicação das tecnologias de armazenamento de energia [91]

2.3.2 Mercados no armazenamento de energia

Antes do foco nos mercados de armazenamento de energia, é importante entender que os mercados de energia, e os mercados de eletricidade em específico, sempre foram fortemente regulamentados com regras regulatórias de acordo com a infraestrutura tradicional de geração e transmissão. Essas regras regulatórias costumavam criar mercados artificiais que faziam a lucratividade dos projetos depender fortemente da legislação aplicável atualmente. A entrada de armazenamento de energia no mercado apresenta novos desafios para os reguladores que tentam integrar essa tecnologia relativamente nova às regulamentações do mercado [39].

Como o mercado de armazenamento de energia ainda está em um estágio inicial, o seu desenvolvimento precisa de ser acompanhado por novos regulamentos e políticas proativas que são criadas de acordo com o potencial dos ESSs para fornecer serviços múltiplos. Na abordagem para um mercado de armazenamento de energia funcional, as ações políticas realizadas por um país passam por diferentes etapas que Stanfield e Vanega resumiram em quatro categorias gerais ilustradas na Figura 12 [39].

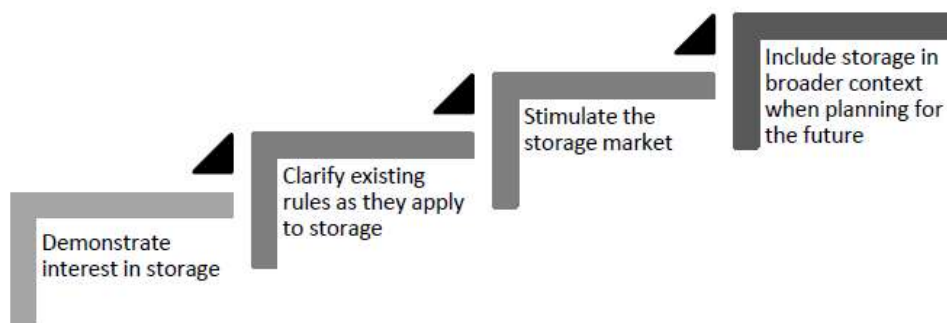


Figura 12 - Categorias de ações políticas [39]

Muitos países enquadram-se na primeira categoria, demonstrando interesse no armazenamento de energia e explorando seu possível potencial considerando custos, benefícios, serviços e questões regulatórias. As ações de política na segunda categoria enfocam a revisão das regras e regulamentos existentes para esclarecer se e como se aplicam ao armazenamento de energia, a fim de garantir que os requisitos e padrões de interconexão sejam claramente definidos. Na terceira categoria, os países influenciam diretamente o mercado, estimulando a implantação de armazenamento de energia por meio de incentivos financeiros, outros subsídios e mandatos. A quarta e mais avançada categoria de ações políticas trata da inclusão do armazenamento de energia nos processos de planejamento para a modernização da rede e o futuro do setor elétrico, onde também pode servir como uma ferramenta para a expansão da implantação das energias renováveis [39].

A viabilidade econômica da implantação de ESSs depende fortemente do mercado aplicável e das estruturas regulatórias, bem como dos mecanismos de remuneração. Os mercados diferem entre os países e até mesmo dentro de um país entre diferentes zonas de transmissão e estados. Em países como EUA, Japão e Alemanha, são oferecidos subsídios para a instalação deste tipo de sistemas. Este tipo de subsídio poderá fazer toda a diferença e tornar um investimento à partida sem viabilidade, num investimento viável [39]. Em Portugal, o Decreto-Lei n.º 172/2006, de 23 de agosto, alterado e republicado pelo Decreto-Lei n.º 76/2019, de 3 de junho, estabelece o regime jurídico aplicável às atividades de produção, armazenamento, transporte, distribuição e comercialização de eletricidade, bem como à operação logística de mudança de comercializador, à organização dos respetivos mercados e aos procedimentos aplicáveis ao acesso àquelas atividades. Em nenhum momento são referidos benefícios no que toca a subsídios de ajuda a implementação de sistemas de armazenamento de energia.

Segundo [39], com a análise dos mercados atuais e futuros possíveis para ESSs, torna-se óbvio que as regras e regulamentações atuais do mercado entre os mercados não são consistentes e têm uma forte influência sobre se a implantação de ESS é ou não economicamente viável. Pode ainda concluir-se que os mercados e as regras do mercado em todo o mundo estão em mudança em favor do armazenamento de energia. No entanto, como os mercados de eletricidade são altamente regulamentados e a formulação de regras é um processo muito político, as mudanças acontecem lentamente e exigem uma mudança de mentalidade dos formuladores de políticas.

2.3.3 Funcionamento de um sistema de armazenamento de energia

Os ESS's, quando integrados num sistema elétrico, são unidades cuja utilização é destinada a duas funções, ou seja, podem funcionar como carga, caso estejam a armazenar energia elétrica, ou podem funcionar como gerador nos períodos em que estes estão a descarregar energia elétrica para a rede [40]. A importância dos ESS's passa por aproveitar a energia produzida em excesso, e assim ter a possibilidade de a utilizar numa fase posterior de maior necessidade energética ou, caso seja mais vantajoso, vendê-la [40].

Um ESS é constituído por quatro principais componentes, como é visível na Figura 13. Verifica-se, portanto, que os quatro componentes correspondem aos sistemas de carregamento e de descarregamento, ao processo de monitorização e controlo, e claro, aos próprios mecanismos de armazenamento [40]:

- Mecanismo de armazenamento - corresponde ao próprio meio de armazenamento, e como tal, estabelece os limites da capacidade de armazenar energia do sistema.
- Sistema de carregamento - tem a função de converter a energia proveniente do sistema num outro tipo de energia, de modo que esta possa ser armazenada.
- Sistema de descarregamento - com funções contrárias às do anterior, ou seja, este equipamento permite pegar na energia armazenada e convertê-la de forma a poder ser utilizada na rede.
- Sistema de controlo - que por sua vez, consiste em dois subsistemas. O primeiro corresponde à fase de monitorizar e controlar o equipamento em si e o segundo diz respeito ao sistema de controlo do sistema de armazenamento.

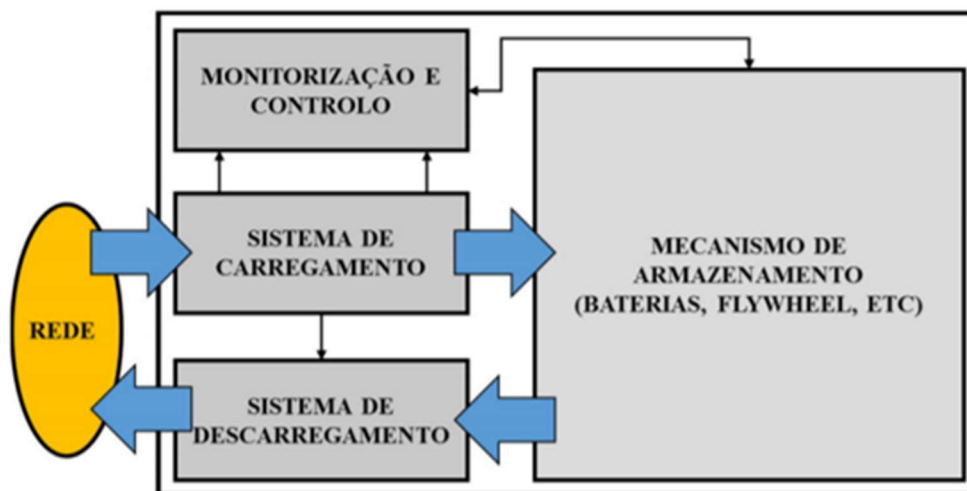


Figura 13 - Princípio básico do funcionamento de um ESS [40]

2.3.4 Custos de armazenamento de energia em baterias

O armazenamento de energia em baterias é um exemplo de como a aplicação em escala pode levar a reduções de custo. O BNEF estimou que no início de 2020, a nível mundial, a capacidade média de projetos de armazenamento ronde os 30/MWh, um aumento de quatro vezes em comparação com apenas 7/MWh por projeto nos quatro anos anteriores. Desde 2018, o aumento do tamanho dos projetos, combinado com uma base de fabricação em rápida expansão e químicas mais densas em energia, reduziu pela metade o custo nivelado do armazenamento de energia. Essa vantagem competitiva depende principalmente da proximidade dos desenvolvedores à cadeia de suprimentos de equipamentos e do uso mais difundido de produtos químicos mais baratos de fosfato de ferro e lítio [41].

Quanto maior for a capacidade de armazenamento existente, para um dado nível de oferta/procura, maior será a importância do armazenamento na atenuação da volatilidade dos preços. Contudo, o armazenamento tem um custo e ninguém constrói e opera instalações de armazenamento de energia se não tiver a garantia ou, pelo menos, a expectativa razoável, de poder recuperar custos e obter lucro. Logo, num quadro de mercado, a capacidade de armazenamento existente resulta do equilíbrio entre, por um lado, os custos do armazenamento e, por outro lado, o diferencial de preços do produto armazenado em diferentes momentos [37].

2.3.5 Viabilidade financeira dos sistemas de armazenamento de energia

A viabilidade dos sistemas de armazenamento é um tema muito discutido atualmente. Para além do mercado aplicável e das estruturas regulatórias neste tipo de sistemas, alguns usos desses sistemas em escala comercial já se provaram viáveis, com a queda nos preços das tecnologias e a redução dos incentivos para energias renováveis é provável que armazenar energia se torne mais lucrativo do que exportar a energia excedente para a rede elétrica [35].

Para identificar o perfil de cliente com maior potencial de viabilidade no uso de sistemas de armazenamento é importante coletar os seguintes dados [35]:

- A energia elétrica gerada e consumida (diagramas de carga) em intervalos de segundos ou minutos por pelo menos um ano;
- As características dos sistemas de armazenamento, incluindo preço e performance;
- O custo da energia elétrica e tarifas.

2.3.6 Principais sistemas de armazenamento em Portugal

A capacidade de armazenamento de energia instalada em Portugal com o objetivo de servir a operação do sistema elétrico baseia-se praticamente na bombagem hídrica, utilizando turbinas reversíveis que permitem acumular água nos reservatórios superiores nos períodos em que existem picos de produção de energia renovável. Ao nível das regiões autónomas, existem exemplos muito relevantes de integração de outras tecnologias, como os volantes de inércia nos Açores (Flores, Açores), baterias (Graciosa, Açores), e Porto Santo, Madeira e bombagem reversível (Ilha da Madeira, Socorridos), como apresentado na Tabela 1. Existem ainda pequenos pilotos, como baterias em subestações ou armazenamento por via térmica (Évora, Projeto SENSIBLE EDP) [37].

De momento, a capacidade de armazenamento por baterias ainda não possui expressão no panorama nacional, embora estejam a ser considerados novos modelos de negócio baseados em sistemas fotovoltaicos conectados com armazenamento com baterias, que podem vir a aumentar a sua expressão em Portugal [37].

Tabela 1 - Instalações de armazenamento em Portugal com capacidade superior a 500 kw [37]

Tecnologia	Localização	Potência	Energia
Baterias (iões de lítio)	Évora	500 kW	350 kWh
Baterias (iões de lítio)	Porto Santo	4 MW	3 MWh
Baterias (LTO)	Graciosa, Açores	7,4 MW	3,2 MWh
Flywheel	Flores, Açores	500 kW	18 MWh

Em 2020, em Portugal, identificaram-se 17 instalações de armazenamento de energia associadas à operação do sistema elétrico, com capacidade instalada entre 500 kW e 778 MW, com a grande maioria sendo de bomba reversível. Em termos de baterias foram identificadas 3 instalações apresentadas na [37]

- a EDP instalou em Évora um projeto de armazenamento baseado em baterias de ião lítio cuja potência instalada é de 500 kW;
- a EDA instalou na ilha Graciosa um sistema de 7,4 MW;
- a EDM instalou em Porto Santo um sistema de 4 MW.

Existem ainda várias instalações de menores dimensões disseminadas pelo país geralmente associadas ao regime de autoconsumo. Uma das instalações é uma instalação piloto (5 kW) em Évora, com um sistema de baterias de fluxo associado a um sistema solar de autoconsumo.

Temos ainda a Faculdade de Direito da Universidade de Lisboa que instalou um sistema de armazenamento de 60 kW e 120 kWh com baterias de íão de lítio, associado a uma instalação fotovoltaica de 220 kW [37]:

- Évora, EDP: Esta é uma solução de armazenamento de energia elétrica ligada à rede de média tensão, utilizando baterias estacionárias de íões de lítio, como apresentado na Figura 14. No âmbito deste projeto piloto, são implementadas e testadas várias funcionalidades de armazenamento de energia, com vista à sua adaptação para uso em vários casos de estudo de apoio à gestão de redes de distribuição, tanto em funcionamento isolado como integrado numa perspetiva de controlo mais alargada [42].



Figura 14 - Solução de armazenamento de energia da EDP, em Évora [42]

- Porto Santo, Madeira, Empresa de Electricidade da Madeira (EEM): Este sistema consiste em PowerStore Battery (4 MW/3 MWh). Os benefícios passam pelo aumento da percentagem de energia renovável; estabiliza o sistema energético para atender a flutuações de frequência e tensão; é uma fonte segura de fornecimento de energia, suportada pela energia renovável e atende ao aumento da demanda de eletricidade durante os verões dado o grande fluxo de turistas [43].
- Maia, Porto – A empresa CapWatt têm em funcionamento um projeto-piloto de um BESS, utilizando baterias de íão-lítio e fosfato de ferro, com uma potência de 320 kW e uma capacidade de 798 kWh.
- Flores, Açores – Nos anos de 2005 e 2006 foi implementado pela EDA um projeto com sistemas do tipo flywheels na ilha das Flores, que teve como objetivo a introdução de reserva girante e inércia nesses sistemas para permitir aumentar a integração de energia eólica e melhorar a qualidade de energia nos mesmos [44].
Com integração da flywheel consegue-se melhorar a performance do sistema, sendo possível uma ainda maior penetração de energia eólica na rede, diminui-se a energia não aproveitada e existe um maior controlo da frequência da rede elétrica, limitando o seu desvio a valores muito interessantes [45].

- Graciosa, Açores, HowardScott - Sistema de armazenamento de energia de bateria de óxido de titanita de lítio (LTO) de 7,4 MW / 3,2 MWh (BESS) para uma micro rede com um parque eólico de 4,5 MW, uma usina solar fotovoltaica de 1 MW e uma usina geradora a diesel. Este sistema apresentado na Figura 15 compensa a produção de energia renovável altamente variável, fornece controle de tensão e frequência e tem capacidade de formação de rede, se necessário, com a geração a diesel usada apenas para energia de reserva. As variações rápidas na produção de eletricidade de energia eólica e solar fotovoltaica exigem que o BESS seja capaz de carregar e descarregar rapidamente e atingir uma contagem de ciclo alta sem sofrer muita degradação [46]. A empresa CapWatt é responsável pela gestão do ativo e pela operação e manutenção.



Figura 15 - Solução de armazenamento de energia na ilha Graciosa [46]

2.4 Sistemas de baterias

Desde o início da sua existência, há cerca de 200 anos, as baterias tem sido alvo de estudo por parte dos investigadores de maneira a melhorar a densidade de energia armazenada e a construção de um invólucro para a bateria mais conveniente para o utilizador. O interesse nas melhorias tecnológicas existentes e novos desenvolvimentos continuam a ser a aposta atualmente. As baterias são dos poucos métodos práticos de armazenamento de energia [47].

O princípio básico de funcionamento das baterias é baseado no processo do eletrólise, cujo fundamento é a transformação de energia elétrica em energia química (e vice-versa) no qual ocorre a descarga de iões. Dois elétrodos, um positivo (cátodo) e o outro negativo (ânodo) são parcialmente mergulhados num eletrólito (solução aquosa de iões), entre eles há uma barreira impedindo que os elétrodos se toquem, o que permite o fluxo de carga entre eles [48]. A reação química pode causar deterioração dos componentes da bateria e consequentemente a perda de ciclos de vida. Deve ter características que permitam alcançar um comportamento aceitável, tais como alta energia específica, baixa resistência e bom desempenho ao longo de uma ampla banda de temperaturas de funcionamento [47].

2.4.1 Características de uma bateria

A eletroquímica da bateria é frequentemente o foco de discussão do desempenho da bateria, no entanto também os materiais do eletrodo desempenham um papel fundamental na determinação das características de desempenho. A taxa à qual a energia flui é modelada por fatores práticos associados à construção da bateria bem como a seleção de outros materiais utilizados na sua construção, incluindo o tipo e quantidade de eletrólito [47].

Para análise ao funcionamento de uma bateria é necessário ter presente, alguns conceitos elétricos característicos, tais como [47]:

- Tensão e Corrente - Tensão, é a quantidade de trabalho ou de energia que pode ser realizado por uma unidade de carga elétrica. A corrente elétrica é o fluxo ordenado de partículas portadoras de carga elétrica, quando existe uma diferença de potencial elétrico entre as extremidades;
- Resistência - É a capacidade de um corpo qualquer se opor à passagem da corrente elétrica mesmo quando existe uma diferença de potencial aplicada;
- Capacidade - A quantidade de energia fornecida por uma bateria é a sua capacidade e é medido em unidades de Amperes-hora ou Ampere-hora (Ah). Quantifica quanto tempo uma bateria vai durar em horas com uma corrente de descarga em amperes.;
- Potência - A potência instantânea desenvolvida por uma bateria é o produto da diferença de potencial entre os terminais e a corrente que passa através da mesma;
- Energia - A energia fornecida por uma bateria é medida em Watt-hora (Wh). Quantifica a duração em horas que uma bateria demora a descarregar quando ligada a uma carga.

São muitos os tipos de baterias existentes de momento no mercado, onde se diferem consoante as características acima mencionadas, e também pelo tipo de matérias que as compõem.

2.4.2 Comparação entre tipologias de baterias

Diferentes tipos de baterias conseguem ser aplicadas em sistemas que requerem grande densidade de energia num curto espaço de tempo, onde neste caso as mais adequadas são as baterias de iões de lítio. As baterias de iões de lítio ainda são algo dispendiosas, mas devido ao seu maior índice de eficiência, isto leva a que as baterias de iões de lítio se tornem na escolha mais fiável quando aplicadas em sistemas que requerem grande densidade de energia num curto espaço de tempo. Em aplicações permanentes de baixa potência a característica mais importante está associada ao valor das perdas por auto-descarga [49].

As baterias LFP caracterizam-se pela longa vida, baixas taxas de auto-descarga e menos peso tornando-as uma opção atraente, já que se espera que estas tenham uma vida útil mais longa do que as baterias de iões de lítio. A vida útil geralmente é de cinco a dez anos ou mais, e o tempo de operação excede significativamente as baterias de chumbo-ácido e outras formulações de lítio. O tempo de carregamento da bateria também é consideravelmente reduzido, outro benefício de desempenho conveniente [50]. Podem também ser aplicadas em sistemas que necessitem de energia durante períodos de tempo mais longos, onde as baterias de chumbo ácido se adequam melhor. Este tipo de bateria pode oferecer melhores compromissos na relação custo/desempenho, quando aplicada em sistemas de pequena escala [49]. Em relação as baterias de níquel cádmio, têm caído em desuso, sendo muitas vezes substituídas pelas baterias de níquel hidreto metálico [49].

Como analisado, todos estes tipos de baterias têm as suas próprias vantagens e desvantagens, consoante o tipo de aplicações que lhes sejam destinadas. Ficou ainda claro a vantagem da tipologia de baterias com elementos de lítio, no que toca a sistemas de armazenamento de energia.

SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA

- 3.1 OBJETIVOS ENERGÉTICOS
- 3.2 SOLUÇÕES PARA OS DESAFIOS ENERGÉTICOS
- 3.3 UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE BATERIAS EM MERCADO INDUSTRIAL
- 3.4 SERVIÇOS DO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA
- 3.5 ANÁLISE DE IMPACTE AMBIENTAL DAS BATERIAS

3 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA

Neste capítulo faz-se um enquadramento do mercado industrial a nível energético, focado em sistemas de baterias em contexto industrial e as suas aplicações. Para além disso são apresentados os principais serviços fornecidos por estes sistemas, bem como a sua definição. Por fim é feita uma consideração sobre o impacto ambiental das baterias utilizadas neste tipo de sistemas.

3.1 Objetivos energéticos na indústria

O setor industrial terá um papel de extrema importância, residindo neste contexto um dos principais polos de necessidade de inovação e criação de novos modelos de negócio, com foco na descarbonização, eficiência energética e na promoção de uma economia circular:

- Descarbonização - A descarbonização da indústria será feita promovendo o uso de recursos renováveis, armazenamento de energia, eletrificação e uso de gases renováveis [24].
- Promover a economia circular - Através da promoção da economia circular na indústria, é possível reduzir o consumo de energia e de materiais, contribuindo para a o combate às alterações climáticas [24].
- Eficiência energética e de recursos - Promover a eficiência energética e de recursos no sector da indústria, para desta forma aumentar a produtividade de recursos, separar o crescimento económico da utilização dos mesmos e aumentar a competitividade [24].

Na perspetiva de descarbonização da indústria, a energia deverá vir de fontes renováveis como a solar térmica, solar fotovoltaica, processos de cogeração como elemento de transição e o objetivo da substituição do gás natural, usado em processos térmicos, por gases renováveis como o hidrogénio e o biometano [25].

De entre as fontes renováveis, as fontes eólicas e solar têm se destacado com altas taxas de penetração no mercado. No entanto, estas tecnologias, devido à sua variabilidade diária e inter anual, colocam desafios ao nível da segurança de abastecimento que é essencial conhecer e para os quais surgem novas soluções, quer tecnológicas ao nível do armazenamento em baterias e produção de hidrogénio ou soluções híbridas, quer ao nível da gestão da rede, a qual deverá ser dotada de maior inteligência e flexibilidade [25]. No caso da indústria, a maneira de resolver os problemas criados pelas restrições das energias renováveis passam pela utilização de processos de cogeração como elemento de transição, em termos de energia térmica e elétrica, e a utilização de sistemas de armazenamento de energia, no que toca a energia elétrica [8].

3.2 Soluções para os desafios energéticos

Tanto na energia térmica como na elétrica usadas na indústria, com a transição energética surgem desafios que são necessários solucionar de maneira a que esta transição ocorra sem percalços. No que toca à energia térmica produzida através de gás natural, uma possibilidade seria a substituição deste combustível por gases renováveis, utilizando sistemas de cogeração para melhor eficiência. Na energia elétrica, para além da utilização de energia proveniente de fonte renovável, o uso de sistemas de baterias pode ajudar na resolução de desafios que surjam. Uma vez que ambas as possibilidades dependem de fontes renováveis nesta transição, uma maneira a resolver os problemas associados à incerteza e variabilidade destas, tanto na energia térmica como elétrica, poderá passar por adotar as possibilidades referidas.

3.2.1 Cogeração

A cogeração é a solução técnica para produzir energia elétrica com a melhor eficiência possível, quando uma elevada quantidade de calor é resultante do processo, nomeadamente, mediante a queima de um combustível, seja ele de origem fóssil ou de natureza renovável. A cogeração é assim definida como a produção combinada de calor e de eletricidade a partir da mesma fonte de energia primária. Apenas se está na presença de um processo de cogeração quando o calor produzido se revela útil ao satisfazer um propósito economicamente justificável [51].

O aproveitamento da energia térmica, nos sistemas de cogeração, pode ser efetuado de diversas formas, tais como: vapor, água quente, etc. Pode ainda ser realizado sob a forma de frio. A utilização da energia térmica resultante do processo de cogeração para a produção de frio denomina-se por *Trigeração* [51]. Este tipo de sistema pode ser usado como complemento na produção elétrica ou de calor, uma vez que permite a junção das duas vertentes, podendo ser usado como sistema de segurança.

3.2.2 Sistemas de baterias

Uma possibilidade para solucionar os desafios que as energias de fonte renovável criam na produção de energia elétrica pode passar pela utilização de sistemas de armazenamento de energia. Como falado anteriormente, o armazenamento de energia é a solução para a geração intermitente através de fontes renováveis, como a energia solar e a eólica. As energias renováveis precisarão de apoio dos sistemas de armazenamento para se integrarem, evitarem descargas de energia limpa em períodos de necessidade mínima e darem maior eficiência e segurança ao sistema elétrico.

No caso específico da indústria, a maneira possível de controlar os problemas de incerteza e variabilidade, poderá passar pela implementação destes sistemas de armazenamento de energia em baterias. Estas darão suporte aquando da possibilidade de variação da produção energética destes painéis. O tipo de sistemas mais utilizados iremos analisar no capítulo seguinte.

3.3 Utilização de sistemas de baterias em mercado industrial

3.3.1 Sistemas behind-the-meter (BTM) e front-of-the-meter (FTM)

Como referido anteriormente, as tecnologias de armazenamento podem ser ligados à rede em situações BTM ou FTM. A diferença entre estes sistemas resume-se à posição de um sistema de energia em relação ao seu medidor elétrico. Um sistema BTM fornece energia que pode ser usada no local sem passar por um medidor, enquanto um sistema na frente do medidor fornece energia para locais externos. Em particular, para aplicativos de uso final BTM, o armazenamento de energia leva a maior confiabilidade, disponibilidade e utilização geral dos ativos e infraestrutura do sistema de energia. De uma perspetiva de investimento de capital para ativos de BTM, isso traduz-se ainda num menor risco de excesso de capacidade e maiores receitas médias ao longo de todo o valor da energia e da cadeia de abastecimento, cobrindo geração, transmissão e distribuição cativas. As baterias BTM são conectadas à parte traseira dos medidores de serviços públicos nos setores residencial, comercial e industrial [52].

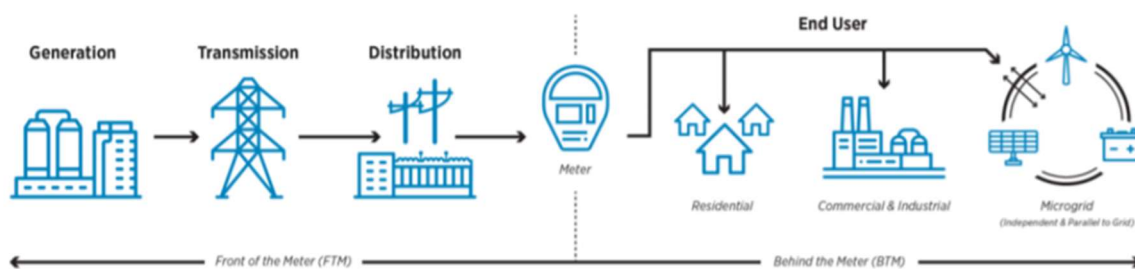


Figura 16 - Sistemas FTM e BTM [52]

Os tipos comuns de sistemas de energia BTM, como apresentados na Figura 16 são [52] [53]:

- **Residencial** - Qualquer geração de energia na propriedade do consumidor é considerada BTM. Isso inclui sistemas de painéis solares domésticos, pequenas turbinas eólicas e até mesmo geradores movidos a gás. No caso da energia eólica e solar, o excedente de geração pode ser enviado através do seu medidor e para a rede para crédito na conta de luz, conhecido como net metering.
- **Commercial and Industrial (C&I)** - Os sistemas de armazenamento de energia na propriedade do consumidor também são sistemas BTM. A eletricidade armazenada numa bateria doméstica, por exemplo, vai diretamente da bateria para seus eletrodomésticos sem passar por um medidor elétrico.
- **Micro redes** - Um tipo mais complicado de sistema de energia BTM é uma micro rede. Micro redes são versões em miniatura da rede elétrica maior que funciona para fornecer energia a um pequeno número de edifícios. As micro redes consistem em geração, sistema de transmissão e, às vezes, armazenamento em bateria. Todos esses componentes ficam atrás do medidor, pois não há necessidade de puxar eletricidade da rede para manter o sistema energizado.

3.3.2 Sistemas BTM

Até ao momento, a reserva de energia tem sido um dos principais pontos de venda para armazenamento de energia. Os clientes estão interessados em utilizar sistemas de bateria em casa para melhorar a resiliência de suas fontes de alimentação e para ajudar a mitigar os efeitos de quedas de energia causadas por desastres naturais ou rede falhas de equipamentos. A capacidade de fornecer energia de reserva é particularmente importante para a proposição de valor dos sistemas de armazenamento em bateria [54]. Na Figura 17 é possível observar o crescimento obtido pela instalação de aplicações do tipo BTM [55]:

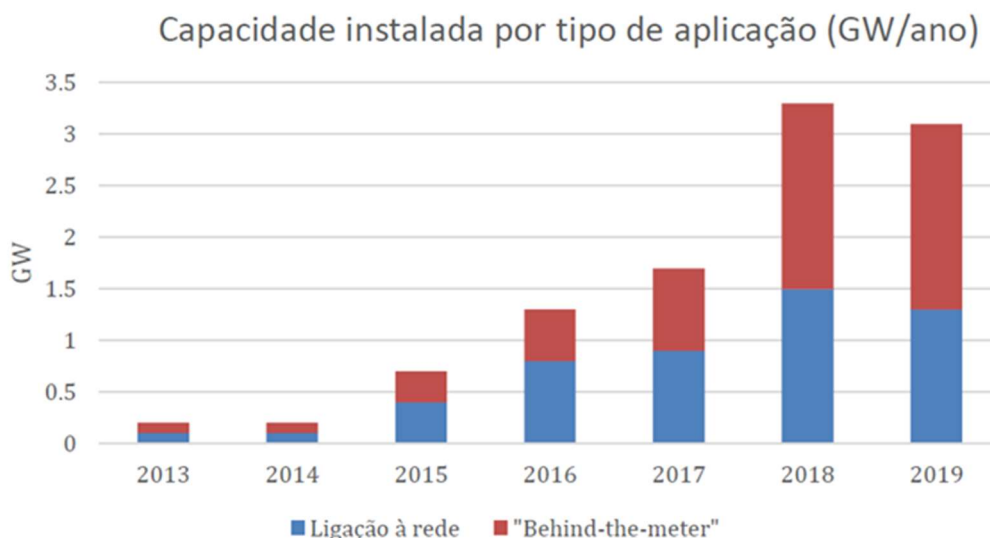


Figura 17 - Capacidade instalada por tipo de aplicação (GW/ano) [55]

Em grandes mercados de armazenamento de energia BTM, como os EUA, o principal motivador para esses sistemas tem sido a capacidade de reduzir despesas com eletricidade. Isso é feito principalmente reduzindo taxas de pico de demanda e tempo de uso – *Time Of Use* (TOU). Uma vez que a gestão de custos de energia é a função primária de armazenamento de energia para clientes C&I, espera-se que as estruturas de taxas determinem a economia num determinado mercado. Os preços da eletricidade mais altos e mais voláteis são para clientes C&I, onde a aplicação destes sistemas faz mais sentido [54].

O armazenamento de energia BTM também pode permitir níveis muito maiores da penetração das energias renováveis. As energias renováveis distribuídas, particularmente o solar fotovoltaico, pode causar problemas significativos para redes de distribuição quando muita energia é alimentada de volta à rede. O armazenamento BTM permite que os clientes mantenham no local o excesso de energia gerada, evitando muitos desses problemas. Esses sistemas também podem responder automaticamente aos sinais da rede para corrigir a frequência, tensão e energia reativa, melhorando muito a estabilidade da rede e reduzindo as barreiras e objeções ao aumento implantações de energias renováveis distribuídas [54].

Apesar do seu potencial, a indústria de armazenamento de energia BTM ainda é um mercado em desenvolvimento. O mercado de armazenamento de energia BTM é composto por clientes C&I e residenciais. Com exceção de um pequeno número de mercados de adotantes iniciais, como Japão e Alemanha, a atividade comercial é amplamente limitada a clientes C&I e apenas uma capacidade relativamente pequena de sistemas residenciais foi implantada. No entanto, apesar do crescimento do setor, a economia simplesmente não justifica o alto custo inicial de instalação desses sistemas para a maioria dos clientes em todo o mundo. Os altos custos iniciais são a principal barreira para o crescimento do armazenamento de BTM [54]. A Figura 18 fornece uma expectativa das tendências de preços e previsões para armazenamento de energia BTM. Esta representa uma média de custos nos mercados residencial e C&I e pressupõe sistemas com uma duração de 2 horas. Conforme demonstrado no gráfico, os custos do sistema caíram drasticamente nos últimos dois anos, esses mercados eram quase inexistentes na maioria das regiões no início de 2014 [54].

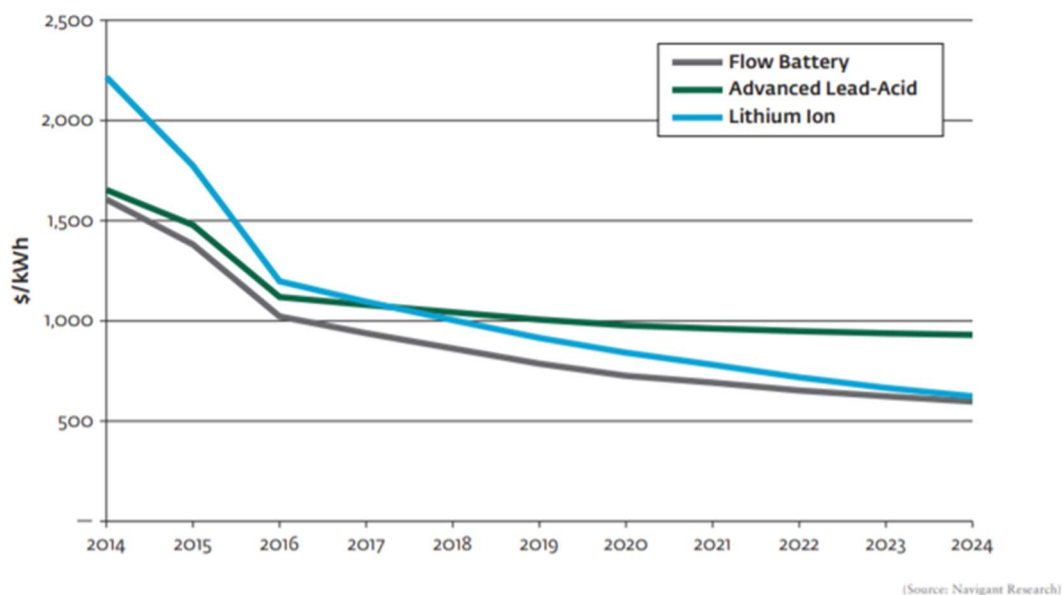


Figura 18 - Tendência do custo dos ESSs em BTM a nível global [54]

A Tabela 2 fornece uma visão geral dos serviços que BTM ESSs podem fornecer. Enquanto alguns destes serviços têm um ganho económico que é relativamente fácil de prever e medir, outros serviços estão atualmente indisponíveis para sistemas BTM. Adicionalmente, enquanto BTM ESSs podem fornecer serviços auxiliares de forma eficiente para a rede, eles são atualmente incapazes de fazê-lo em quase todos os casos devido às estruturas regulatórias existentes. Os modelos de negócios podem variar em diferentes sistemas BTM. O modelo de negócios escolhido depende das ofertas das empresas para os clientes C&I. Muitos fornecedores líderes oferecem uma variedade de opções de propriedade e financiamento adaptadas às necessidades do cliente [54].

Tabela 2 - Aplicações de BTM ESSs [54]

Necessidades de mercado	Aplicações do cliente	Descrição/benefício
Aumento das taxas de eletricidade; Maior uso de veículos elétricos; Aumento da gestão de energia	Redução da cobrança na demanda	Responder automaticamente a picos de carga de construção - redução de despesas com eletricidade
	Gestão da conta de energia com o tempo de uso	Gerenciar o carregamento e o descarregamento com base nas taxas de eletricidade - redução de despesas com eletricidade
Aumento das instalações de painéis fotovoltaicos	Geração no local de autoconsumo	Maximizar o consumo na geração local, principalmente solar fotovoltaica
Necessidade de energia de qualidade	Energia de reserva/ qualidade de energia aprimorada	Proteger equipamento sensível de flutuações / interrupções da qualidade de energia - garante a operabilidade durante a interrupção da rede
Preocupações com a estabilidade e capacidade da rede	Serviços auxiliares	Fornecer regulação de frequência, tensão, suporte, capacidade de reserva de fornecimento elétrico - eficiência aprimorada de geração centralizada, integração mais suave de geração variável
	Resposta à demanda	Gerenciar o carregamento e o descarregamento com base nas taxas de eletricidade - redução de despesas com eletricidade

3.3.3 Sistemas de armazenamento em baterias BTM

Os sistemas de armazenamento de energia de bateria estacionária – *Battery Energy Storage Systems* (BESS) - são uma opção adequada para as necessidades de flexibilidade de curto prazo, na faixa de segundos a horas, e podem auxiliar a múltiplas aplicações diferentes. Os clientes potenciais de armazenamento incluem proprietários de unidades de geração de energia, operadores de rede e consumidores e *prosumers* industriais e residenciais, todos dos quais procuram meios de operar seu sistema da maneira mais econômica possível. Uma série de casos de uso de BESSs promissores incluem autoconsumo de energia solar, regulação de frequência e otimização da produção de energia renovável variável. A capacidade instalada de energia da rede BESS em 2018 era de cerca de 2,5 GW globalmente, como podemos observar na Figura 19 [56].

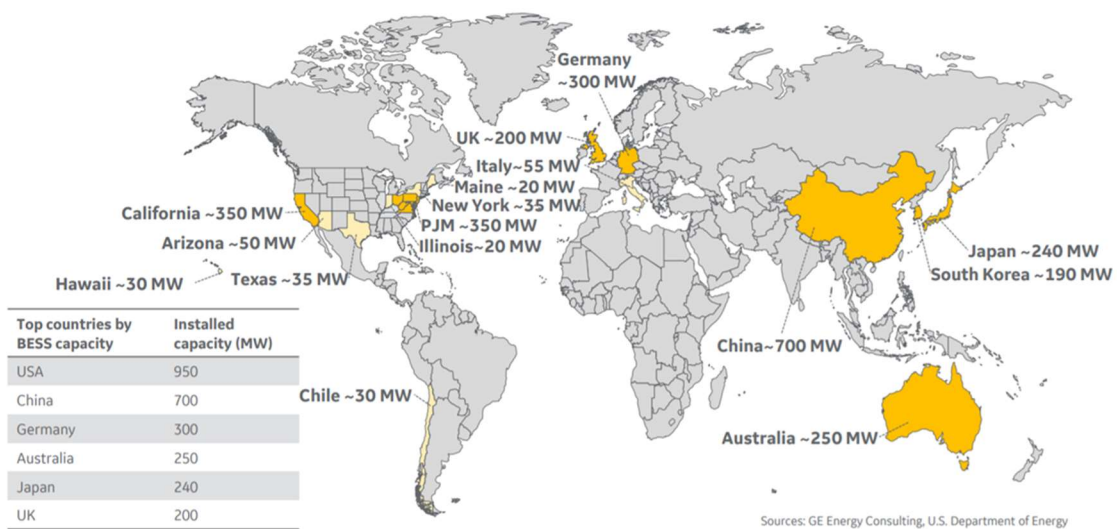


Figura 19 - Capacidade instalada de energia da rede BESS em 2018 [56]

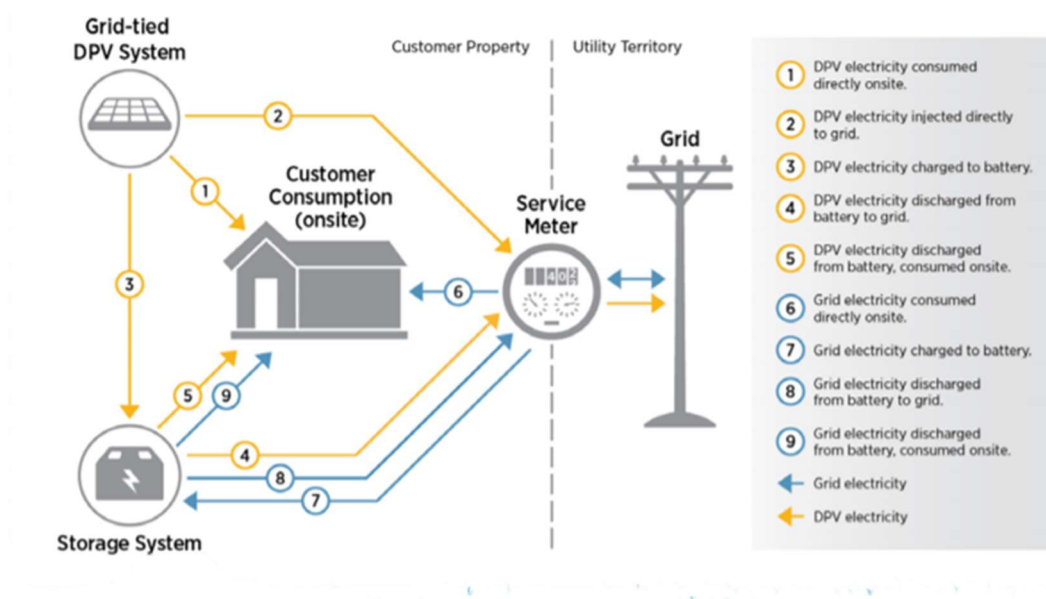
3.3.3.1 Sistemas BTM BESS + UPACs

A Unidade de Produção para Autoconsumo (UPAC) permite produzir localmente energia e contribuir diretamente para a redução da fatura de eletricidade. As unidades de autoconsumo produzem eletricidade preferencialmente para satisfazer as necessidades de consumo. O aproveitamento da energia produzida pelo sistema fotovoltaico na instalação elétrica ocorre apenas quando existe consumo. A energia excedente poderá ser armazenada ou é descarregada na rede elétrica de serviço público, com ganhos monetários para o proprietário [57]. De maneira a aproveitar esse excedente, a junção de um BTM BESS com um sistema solar fotovoltaico ou outros tipos de recursos de energia distribuída – *Distributed Energy Resources* (DER) – pode fazer sentido nas instalações do consumidor [58].

Os sistemas de armazenamento de energia BTM emparelhados com fotovoltaico distribuído – *Distributed Photovoltaic (DPV)* - com a capacidade de atuar como geração e carga - representam uma tecnologia do setor de energia potencialmente única e disruptiva, capaz de fornecer uma gama de serviços importantes aos clientes, serviços públicos e o sistema de energia mais amplo. A estes sistema podemos chamar *sistemas DPV-plus-Storage*.

Estes sistemas representam uma nova e poderosa oportunidade para operar sistemas de energia de maneira mais eficiente, económica e confiável [59]. Um esquema deste tipo de sistema é apresentado na Figura 20. A sua operação é normalmente usada em modo passivo em relação ao sistema de energia, ou seja, entrega energia ao cliente mais ou menos automaticamente durante as interrupções de serviço na distribuição sistema. Quando o serviço de eletricidade da rede é retomado, esses sistemas desligam (e.g., geradores a diesel) ou começam a carregar (e.g., baterias de chumbo-ácido) [59].

Os clientes decidem investir em recursos de energia distribuída, como DPV ou *DPV-plus-Storage*, porque fornece benefícios monetizáveis indiretamente, como energia de reserva durante interrupções, ou benefícios monetizáveis diretamente, como reduções de contas, além dos custos de longo prazo de compra do sistema. Uma maneira de quantificar os fatores económicos que influenciam o comportamento do cliente é por meio de uma análise económica do cliente [59].



Source: Original [Illustration by Christopher Schwing, NREL]

Figura 20 - Funcionamento DPV BTM [59]

Segundo o relatório *2020 Solar plus Energy storage*, para um cliente industrial a implantação destes sistemas ainda não é uma proposta vencedora. Para a categoria de consumidor industrial, um investimento num sistema *DPV-plus-Storage* em 2020 no cenário de *Melhor Retorno Económico* resulta num custo ligeiramente mais alto de fornecimento ao longo um período de 10 anos em comparação com o fornecimento apenas da rede [60].

3.3.4 Sistemas BTM BESS em C&I

Normalmente, os sistemas BTM BESS permitem uma gama ampla de aplicações. Nestes casos, espera-se que a maioria das adições de capacidade da bateria seja combinada com a geração distribuída via DER [61]. Em relação às vendas de energia excedente por meio da exportação de energia para a rede elétrica, as aplicações cativas de BESS em plantas e instalações C&I permitem o empilhamento de receitas de arbitragem de energia e serviços auxiliares oferecidos à rede elétrica. Conforme ilustrado na Figura 21, os sistemas BESS permitem que o setor C&I equilibre de maneira eficaz os perfis de demanda de carga no medidor, melhorando assim a gestão de carga de demanda, a resiliência, a regulação de frequência, o suporte de tensão e a estabilidade geral [61]. Em suma os sistemas BTM no setor C&I estão bem posicionados para fornecer benefícios ao cliente final. Como tal, estes formam uma parte crucial na obtenção de um sistema de energia mais descentralizado [62][63].

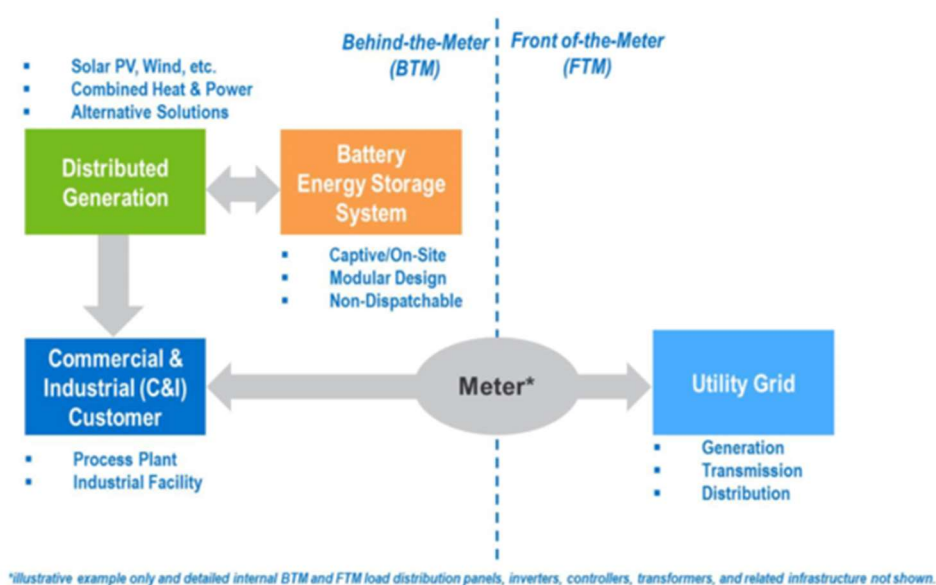


Figura 21 - Aplicações BESS no setor de C&I [61]

3.3.5 Evolução no mercado BTM no setor C&I

Em todo o mundo, 2,9 GW de capacidade de armazenamento foram adicionados aos sistemas de eletricidade em 2019 - quase 30% menos do que em 2018. As instalações anuais caíram 80% na Coreia do Sul após um ano recorde em 2018, onde foi responsável por um terço de toda a capacidade instalada em todo o mundo. A queda resultou da crescente preocupação com vários incêndios em plantas de armazenamento em escala de rede em 2018. No Japão, porém, as vendas de armazenamento BTM foram fortes, atingindo mais de 200 MW e tornando o país líder do mercado global. Nos Estados Unidos, a Califórnia continuou a ser um foco de atividade em 2019, com mais de 10.000 sistemas de armazenamento BTM vendidos. As concessionárias nos Estados Unidos continuam a favorecer os projetos de armazenamento com energia solar fotovoltaica, e o desenvolvimento do projeto no futuro imediato pode abranger até 15 GW [55].

Na Europa, projetos-piloto foram lançados para explorar novas aplicações e mercados de armazenamento: como ativos de transmissão na Alemanha e França, e por meio de agregação na Itália e no Reino Unido. No geral, a taxa de instalação da capacidade de armazenamento na Europa diminuiu 40% com relação a 2018. A Austrália continua um mercado-chave para armazenamento BTM. A capacidade de armazenamento também se expandiu em 2019, e mais de 200 MW de capacidade estão em construção em todo o país [55]. No final de março de 2020, a capacidade operacional global do projeto de armazenamento de energia totalizava 184,7 GW, um crescimento de 1,9% em comparação a 2019 [64].

A aposta a nível global, particularmente focando no armazenamento da bateria, passam por países como incluem Austrália, Chile, Alemanha, Japão, Índia, Itália, Coreia do Sul, Reino Unido e EUA. Com base na região, o mercado global de baterias BTM pode ser segmentado na América do Norte, Europa, Ásia-Pacífico, América Latina e Oriente Médio e África [65]. Prevê-se que a Europa domine o mercado global de baterias BTM durante o período de previsão, já que a região tem uma grande base instalada de energia renovável. O aumento nas normas ambientais também deve restringir o uso de geradores a diesel em caso de falta de energia [65].

3.3.5.1 Sistemas instalados nos setores comercial e industrial

Temos como alguns exemplos destes sistemas os seguintes [43]:

- Alinta Energy, PowerStore/Gas - O projeto Newman Power Station BESS, na Austrália, tem um sistema que consiste em PowerStore Battery (30 MW/7 MWh). Os principais benefícios passam pela estabilidade do fornecimento de energia; Aumenta a qualidade da energia e a sua eficiência; O sistema de baterias providencia reserva girante para substituir o gás proveniente das turbinas;
- ICRC Logistics Center, PowerStore/PV/Diesel - O projeto ICRC Logistics Center, no Quênia, tem um sistema que consiste em PowerStore Battery (150 kW/100kWh). Os principais benefícios passam por uma fonte de alimentação confiável e estável, contribuem com energia renovável otimizada e têm a capacidade de isolar da rede após uma interrupção ou falhas e reduzem o uso do gerador a diesel;
- Chitose Hokkaido - O projeto Chitose Hokkaido, no Japão, tem um sistema que consiste em baterias iões de lítio. Os principais benefícios passam por fornecer serviços públicos locais à rede, garantir a integração confiável de energias renováveis na rede elétrica e ajuda a gerar energia para 11.000 habitantes locais;
- Southern Company BESS - O projeto Southern Company BESS, no Estados Unidos, tem um sistema que consiste em baterias de iões de lítio (1000 kW - 2000 kWh). Os principais benefícios passam por fazer nivelamento de carga e *peak shaving*;
- Fairbanks - O projeto Fairbanks, nos Estados Unidos, tem um sistema que consiste em baterias de chumbo ácido. Os principais benefícios passam por melhorar a confiabilidade dos serviços de eletricidade; é uma fonte de energia de emergência para alimentar a rede até ficar online; permite 15 minutos de aumento de potência para colocar os geradores online, levando a redução dos apagões de energia.

3.4 Serviços BTM ESS utilizados em mercado industrial

O armazenamento de energia em baterias tem múltiplas aplicações. Embora ainda não seja uma tendência global, é razoável pensar que pode se tornar à medida que os proprietários das instalações solares fotovoltaicas olhem para as baterias como um meio de autoconsumo da eletricidade que produzem, permitindo carregar ou descarregar as suas baterias quando necessário. O *Rocky Mountain Institute* (RMI) identificou 13 fluxos de valor para o armazenamento de energia em três segmentos de clientes, como observamos na Figura 22, onde nos focaremos no setor industrial [66].

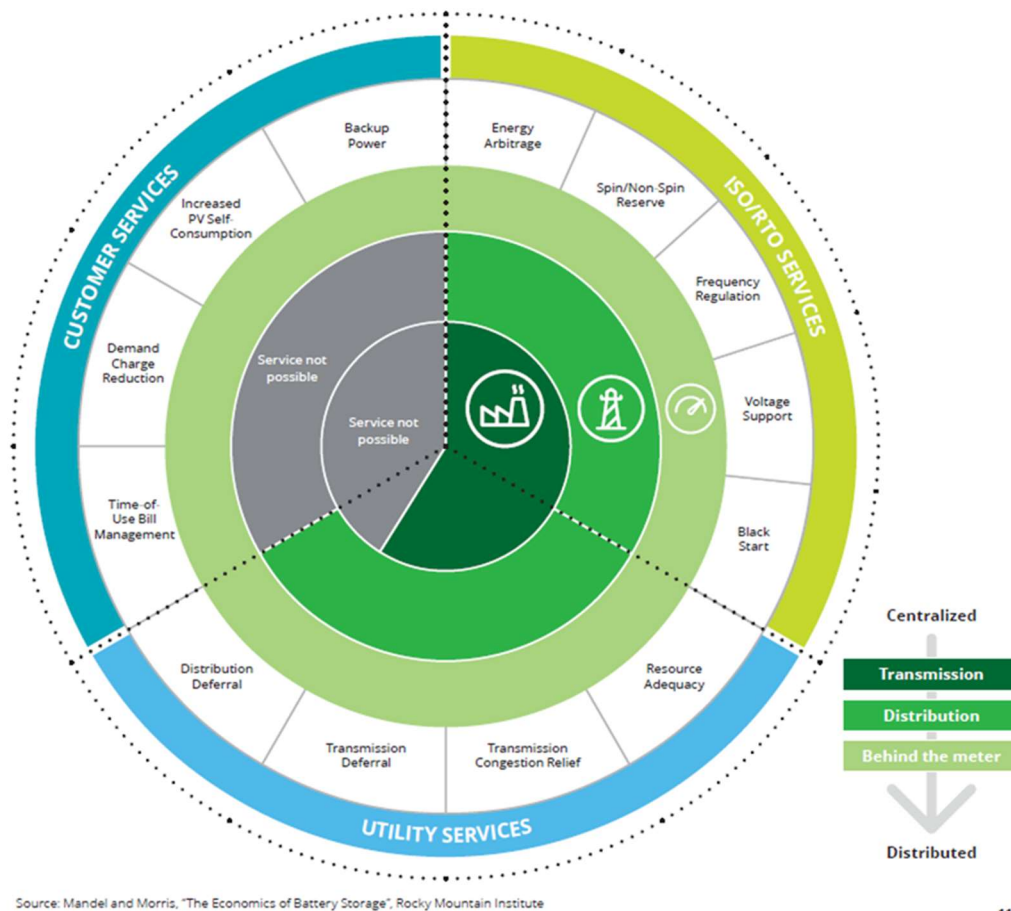


Figura 22 - Fluxos de valor dos ESSs [66]

Quando se fala de um sistema BTM toda a gama de serviços poderia, em teoria, ser oferecida. Contudo, para utilização eficiente dos recursos de armazenamento distribuídos é necessário que o consumidor tenha a sinalização económica do requisito ou serviço que o sistema necessita naquele local e momento [67]. Globalmente, o uso mais comum para armazenamento de bateria é regulação de frequência, de aproximadamente 50%, seguida por capacidade de reserva e mudança na procura e nivelamento de carga [66]. Estas funções podem ser desempenhadas por diversos sistemas. Excetuando a bombagem hídrica, os seguintes sistemas apresentam a distribuição em percentagem apresentada na Figura 23 [68].

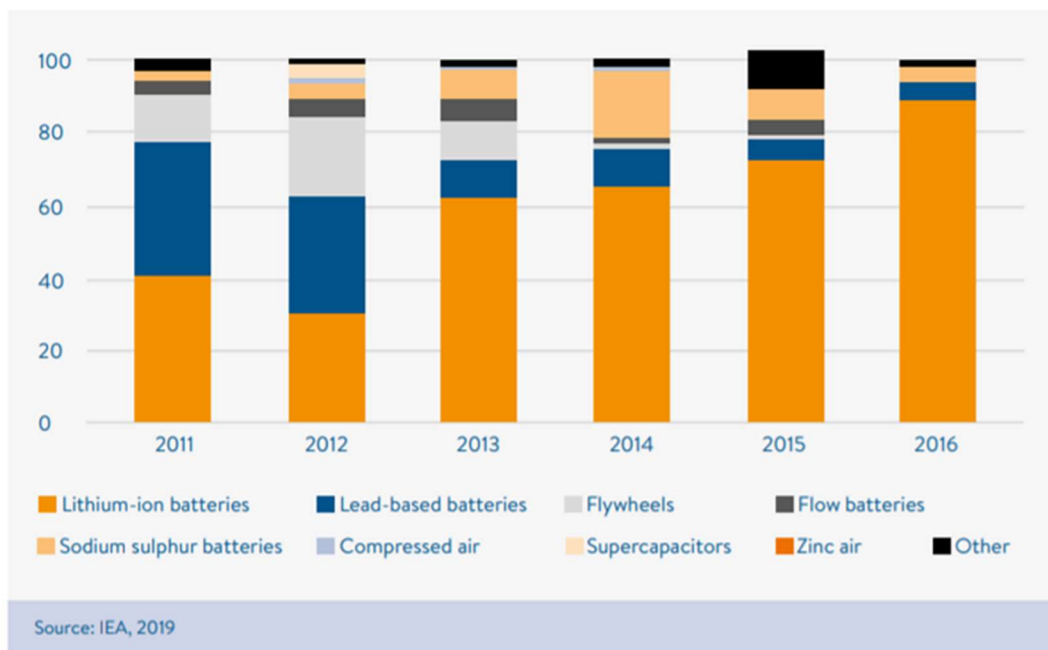


Figura 23 - Tipos de sistemas de armazenamento instalados [68]

Um dos benefícios mais importantes de um sistema de armazenamento de energia bem projetado e otimizado é a oportunidade de acumulação de serviços, ou seja, aproveitando o mesmo equipamento, sistema ou processo para entregar vários benefícios que maximizam o impacto financeiro. Com a evolução das estruturas de taxas de hoje, demandas de mercado e programas de incentivos, o sistema de retorno sobre o investimento tornou-se mais complexo e economicamente benéfico, com base no valor dos serviços combinados [68]. A representação deste processo é visível na Figura 24.

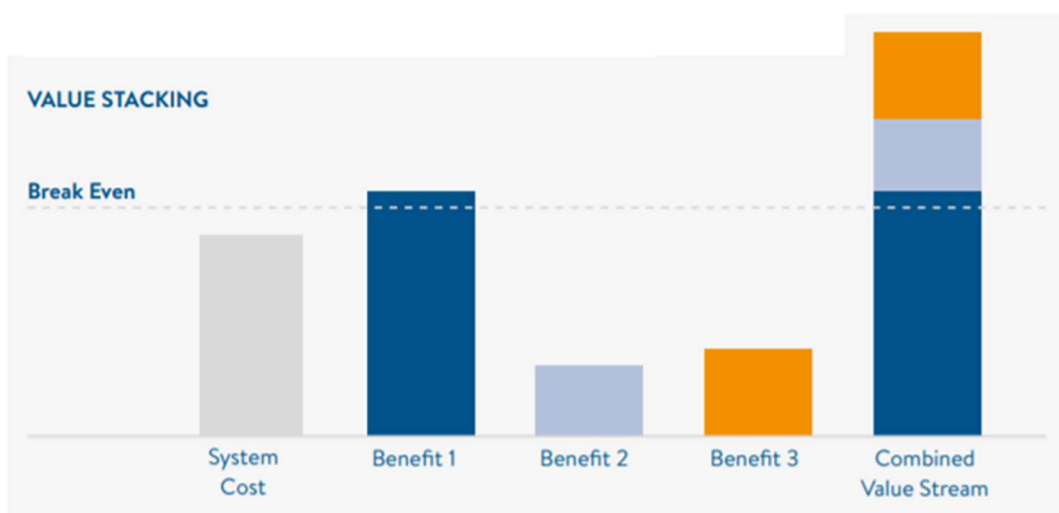


Figura 24 - Representação da importância do value stacking [68]

Na Europa, a implantação de baterias é impulsionada pelo consumidor tanto a nível residencial, bem como ao nível de C&I. Embora ainda não estejam no estágio de implantação em massa em toda a Europa, as baterias estacionárias já estão a ser instaladas/testadas em uma infinidade de aplicações e casos de uso. Com menores custos, redução de obstáculos regulatórios e novos casos de negócios, a implantação de armazenamento em baterias projeta-se que, na Europa, aumente para mais de 11 GW em 2026, criando uma grande flexibilidade potencial para concessionárias, operadores de rede e atores independentes. Embora atualmente as baterias FTM dominem o mercado de armazenamento de bateria, espera-se que até 2026 o armazenamento BTM quase o alcançará em termos de capacidade implantada. Aqui deve ser mencionado que tecnicamente e do ponto de vista do mercado, é possível usar capacidades de armazenamento BTM para fornecer serviços não apenas localmente, mas também na escala em concessionária, como vemos na Figura 25 [56]. Muitas destas baterias fornecem vários serviços em paralelo para maximizar os benefícios para o sistema.

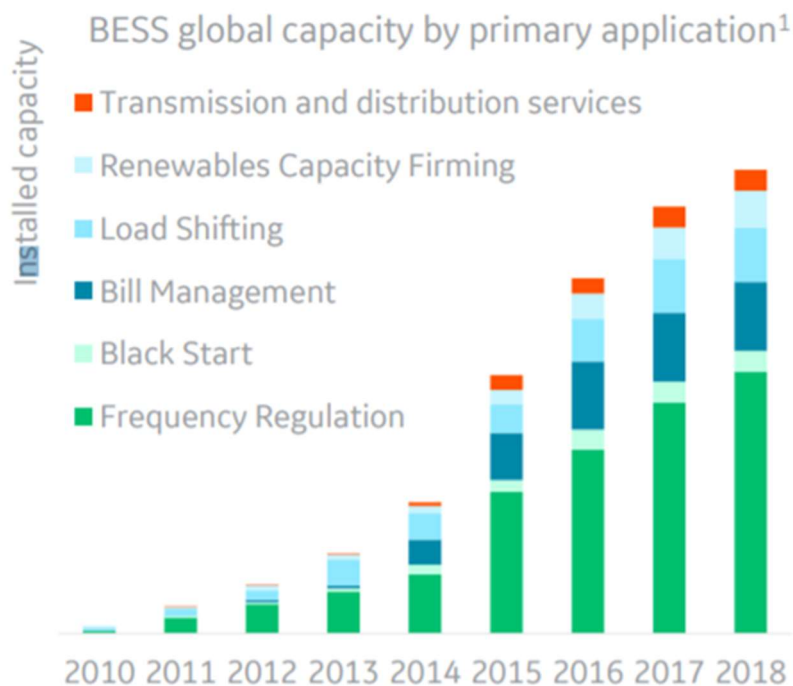


Figura 25 - Aplicações BESS [56]

Existem várias opções de tecnologia para BESS. Algumas tecnologias já estão bem consolidadas no mercado (chumbo-ácido, lítio, à base de níquel), atendendo também ao mercado de armazenamento estacionário, enquanto outras ainda estão no ponto de partida de implantação ou numa fase de demonstração.

3.4.1 Definição dos serviços BTM BESS em mercado industrial

Depois da apresentação de alguns serviços possíveis de serem providenciados por ESS, neste capítulo o objetivo passa por fazer uma definição mais concreta dos serviços mais relevantes [69].

3.4.1.1 Auxílio à integração de energias renováveis

Uma bateria pode desempenhar diversos papéis, desde a contribuição em serviços auxiliares, como a regulação e controlo da frequência e tensão das redes com elevada penetração renovável até a contribuição no balanceamento da carga/geração fornecendo ou absorvendo energia quando ocorrem desequilíbrios [70]. Uma das razões mais importantes para a instalação de uma bateria é a sua contribuição para um aumento da penetração de energia renovável confiável, como podemos ver na Figura 26. Um sistema de baterias permite garantir o balanço carga/geração e a operação estável da rede em paralelo com a maximização da penetração renovável. Adicionalmente, as baterias funcionam também como reserva permitindo assim contribuir para satisfazer a perda de geração ou variação de carga [70].

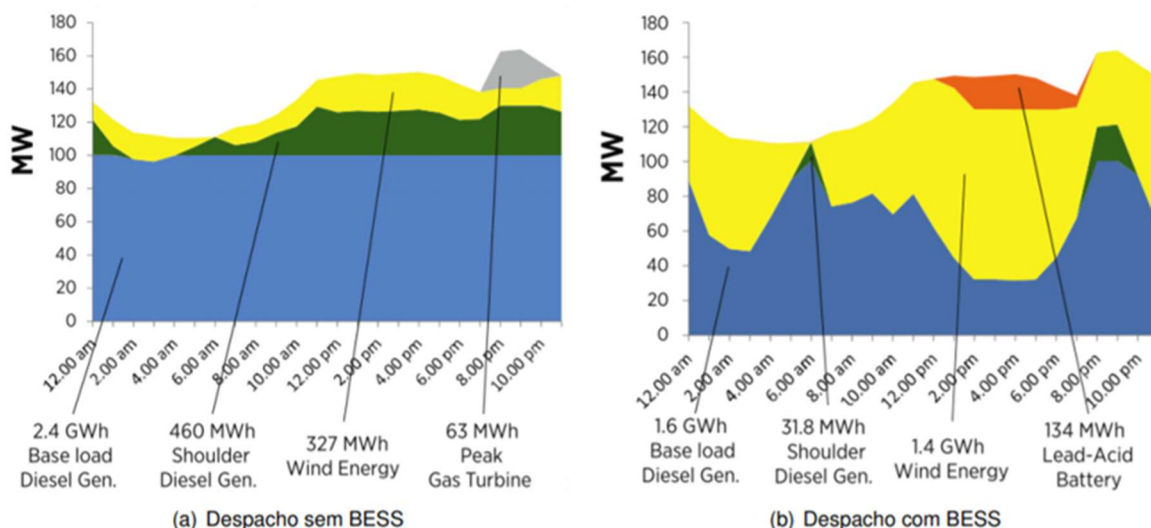


Figura 26 - Despacho com e sem BESS [70]

3.4.1.1.1 Supressão de flutuação

Segundo [71], das soluções possíveis para a mitigação da flutuação de potência, a tecnologia preferencial passa pelos BESS por diversos pesquisadores, destacando as de tipo chumbo-ácido e íões de lítio como apresentado na Figura 27 [71].

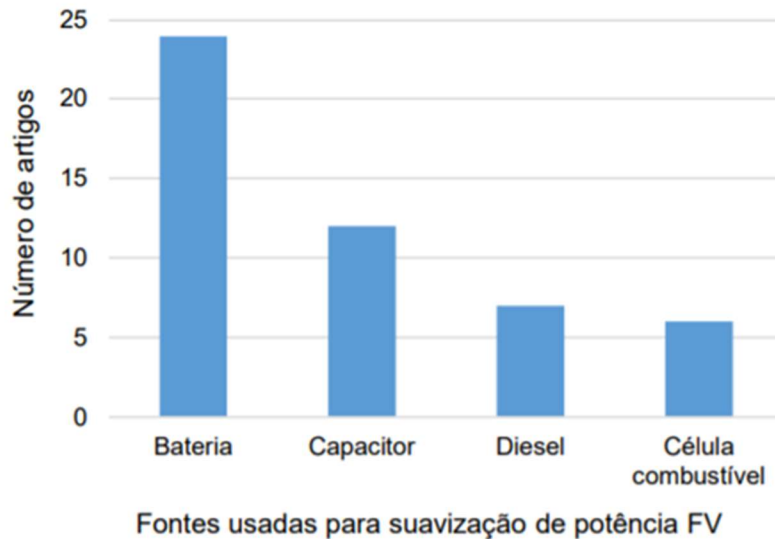


Figura 27 - Fontes usadas para suavização de potência PV [71]

Um sistema de baterias pode ser usado, permitindo suavizar as flutuações típicas da produção renovável através da absorção/injeção de potência em curtos períodos. Na Figura 28 apresenta-se o comportamento de uma bateria quando utilizada para efetuar a acomodação de geração solar [70].

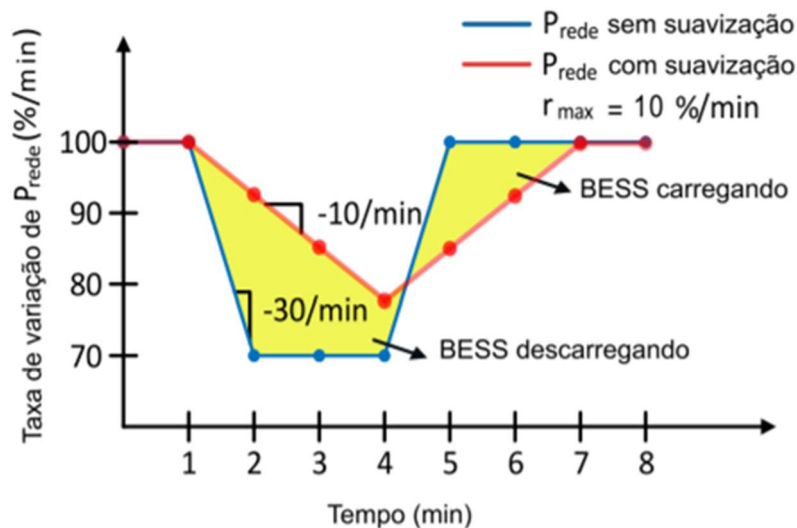


Figura 28 - Suavização de potência com armazenamento de energia [70]

3.4.1.2 Regulação de frequência

No que à regulação de frequência diz respeito a estratégia utilizada é a de manter o equilíbrio entre a geração e demanda. A regulação é executada por fontes internas ou externas. A regulação por fonte interna é convencionalmente realizada pelo motor principal dos geradores síncronos, enquanto no externo as fontes incluem tecnologias como ESS e geradores a diesel [72].

A regulação de frequência tem sido historicamente fornecida por ativos de geração tradicionais, incluindo turbinas a gás ou centrais de geração de carvão. No entanto, essa tem sido uma abordagem imperfeita porque os geradores tradicionais são lentos a responder, muitas vezes levando até 10 minutos para responder a um sinal de controlo. A utilização de sistemas de armazenamento de energia para este tipo de aplicações em contrapartida à utilização destas centrais tradicionais apresenta um carácter ambiental e sustentável muito significativo, à medida que estes sistemas substituem os tradicionais [73].

A técnica mais vulgarmente usada em baterias é semelhante à estratégia do regulador de velocidade de uma máquina convencional, através de um controlo por estatismo. Assim de acordo com o desvio de frequência que se verifica na rede, a bateria é capaz de descarregar ou carregar energia de forma a equilibrar a frequência. Tal como referenciado anteriormente, as baterias possuem tempos de resposta mais rápidos que as máquinas convencionais, o que beneficia a rede na rápida e precisa compensação das flutuações frequentes da geração renovável, mantendo a frequência do sistema dentro dos limites exigidos [44].

Na Figura 29 é possível verificar-se a forma como uma bateria pode responder perante os desvios de frequência. Frequências elevadas indicam o excesso de geração face à carga o que faz com que a bateria carregue para reparar tal perturbação, pelo contrário, frequências baixas indicam défice de geração face a carga, portanto a bateria fornece potência como resposta [70].

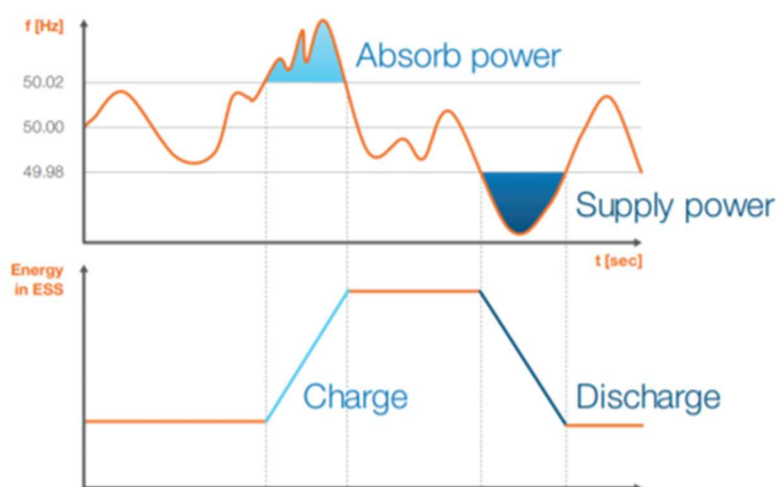


Figura 29 - Regulação de frequência por BESS [70]

3.4.1.3 Restauração de energia

A capacidade de restauração de energia ou *black start* é o serviço de energizar a rede após a ocorrência de uma grande queda de energia e, portanto, está localizada no lado da geração da rede. É necessário fornecer eletricidade para reiniciar outros recursos de geração, uma vez que a maioria das centrais depende da eletricidade da rede para iniciar as operações. A capacidade de energia ativa e reativa dos recursos que fornecem capacidade de *black start* deve ser suficiente para energizar as linhas de transmissão e reiniciar os geradores [39].

O serviço de capacidade de *black start* pode ser fornecido por grandes ESSs com capacidades de energia entre 5 a 50 MW e durações de descarga de até uma hora. Os ESSs podem atender todos os requisitos de um recurso de *black start*, especialmente devido ao seu rápido tempo de resposta e taxas de rampa, bem como a sua boa capacidade de operação de carga parcial [39]. Os operadores de sistema estão cada vez mais interessados em explorar oportunidades para atualizar ou substituir ativos *black start* existentes por tecnologia de armazenamento de bateria [74].

Temos como exemplos de projetos onde a aplicação de *black start* é possível, como o *GVEA Battery Energy Storage System*, que é um sistema de armazenamento de bateria instalado em Fairbanks, Alasca. O ESS é usado para garantir a confiabilidade do serviço elétrico no caso de uma interrupção relacionada à geração ou transmissão. Fornece reservas de até 15 minutos com energia nominal e serviços *black start* para que a geração local fique online. Para além deste, um BESS instalado recentemente fornece recursos de *black start* para uma estação de energia de ciclo simples de 200 megawatts localizada no sudeste dos EUA.

O conceito *black start* com BESS foi provado, o interesse está em crescimento pelo uso em várias fábricas em todo o país. À medida que a indústria de energia continua a integrar mais energias renováveis, a confiabilidade na geração de energia será um componente-chave numa transição bem-sucedida e o *black start* em BESS pode ser uma parte importante dessa mudança [74].

3.4.1.4 Deslocamento temporal de energia

Os sistemas de baterias podem ser usados para serviços relacionadas com o armazenamento de energia durante longos períodos temporais. No deslocamento temporal de energia o objetivo é usufruir das capacidades de uma bateria de forma a tirar proveito técnico e económico. Estes serviços permitem fazer um armazenamento economicamente justificável, nos períodos em que a procura e o preço da eletricidade são baixos para que seja posteriormente colocada na rede. A energia armazenada na bateria pode então ser colocada num período em que a procura e preços da eletricidade sejam mais elevados, o que ocorre geralmente na ponta. No deslocamento temporal incluem-se serviços como a *peak shaving*, que consiste numa forma de suavizar a forma típica de pico e vale da curva de procura, permitindo assim uma geração mais constante [70].

Para além desta, temos ainda a arbitragem de energia - *Energy arbitrage*, que está relacionado com a operação compra e venda de energia nos diferentes horários. A arbitragem de energia consiste na operação de compra e venda de energia elétrica de modo a que esta seja otimizada de forma a se obter a maior remuneração possível. Comprar energia nos períodos em que esta tem um valor mais baixo e vendê-la nos períodos em que possui um valor mais elevado. É a participação no mercado de energia. O preço associado a cada hora varia com o seu período horário [75].

3.4.1.4.1 Peak shaving

Peak shaving é a ação de armazenar energia em períodos de baixa procura, geralmente durante a noite, e injetá-la na rede nos períodos de máxima demanda durante o dia, gerando economia [69]. Para a maioria das empresas, o consumo de energia varia ao longo do dia de trabalho, com picos e vales reveladores. Para acomodar essa demanda flutuante, os fornecedores de serviços públicos também variam seus preços ao longo do dia [76]:

- Durante épocas de alta demanda de eletricidade, as taxas de serviço de pico entram em ação;
- Quando a demanda de energia diminui, o preço fora do pico entra em vigor

As baterias são carregadas sempre que as taxas de eletricidade estão no nível mais baixo, ou seja, fora do horário de pico, e depois descarregam para durante os horários mais caros do dia, evitando pagar os preços de pico, permitindo assim a economia de dinheiro [76]. Com a configuração correta, o sistema de armazenamento de energia pode regular de forma inteligente a carga e a descarga sem qualquer intervenção direta por parte do operador, em tempo real [52]. Na Figura 30 é demonstrado o funcionamento do serviço de *peak shaving*:

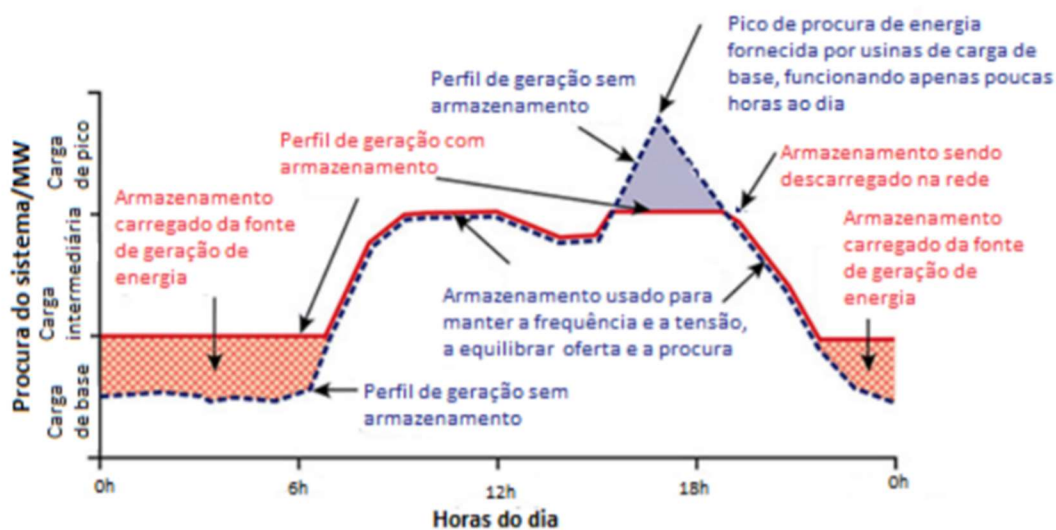


Figura 30 - Demonstração de funcionamento da aplicação *peak shaving* [52]

3.4.1.4.2 Arbitragem de energia

Os preços da eletricidade são altamente instáveis, mas tendem a um padrão diário de preços baixos durante as horas noturnas e preços altos durante o dia [52]. Os períodos horários de entrega de energia elétrica são diferenciados por tipo de ciclo de contagem, em função do nível de tensão. Os tarifários podem seguir um ciclo diário ou semanal.

O ciclo diário caracteriza-se por uma definição (e.g., duração e localização) dos períodos horários igual para todos os dias da semana, isto é, não é apresentada diferenciação entre os dias úteis e os fins-de-semana. Neste ciclo, apenas é considerada a distinção dos dois períodos de hora legal (e.g., verão e inverno).

O ciclo semanal caracteriza-se por uma definição dos períodos horários em três categorias: (i) os dias úteis, (ii) os sábados e os (iii) domingos. Inclui ainda a distinção dos dois períodos de hora legal. O período horário de vazio aplicável nas tarifas com dois e três períodos horários engloba os períodos horários de vazio normal e de super vazio. O período horário de fora de vazio aplicável nas tarifas com dois períodos horários engloba os períodos horários de ponta e de cheias [77]. O ciclo semanal favorecerá assim, em princípio, quem utiliza com maior intensidade, eletricidade aos fins de semana [78].

Ciclo semanal opcional para MAT, AT e MT em Portugal continental			
Período de hora legal de Inverno		Período de hora legal de Verão	
De segunda-feira a sexta-feira		De segunda-feira a sexta-feira	
Ponta:	17.00/22.00 h	Ponta:	14.00/17.00 h
Cheias:	00.00/00.30 h 07.30/17.00 h 22.00/24.00 h	Cheias:	00.00/00.30 h 07.30/14.00 h 17.00/24.00 h
Vazio normal:	00.30/02.00 h 06.00/07.30 h	Vazio normal:	00.30/02.00 h 06.00/07.30 h
Super vazio:	02.00/06.00 h	Super vazio:	02.00/06.00 h
Sábado		Sábado	
Cheias:	10.30/12.30 h 17.30/22.30 h	Cheias:	10.00/13.30 h 19.30/23.00 h
Vazio normal:	00.00/03.00 h 07.00/10.30 h 12.30/17.30 h 22.30/24.00 h	Vazio normal:	00.00/03.30 h 07.30/10.00 h 13.30/19.30 h 23.00/24.00 h
Super vazio:	03.00/07.00 h	Super vazio:	03.30/07.30 h
Domingo		Domingo	
Vazio normal:	00.00/04.00 h 08.00/24.00 h	Vazio normal:	00.00/04.00 h 08.00/24.00 h
Super vazio:	04.00/08.00 h	Super vazio:	04.00/08.00 h

Figura 31 - Ciclos semanais disponíveis para clientes MT em Portugal Continental

Na Figura 31 está identificado um dos ciclos de entrega de energia, em ciclo semanal, com os diferentes períodos horários para a compra de energia para clientes média tensão. Para cada destes períodos, existem valores diferentes de preço. A base dos preços usados nesta análise é apresentada na Figura 32.

Nesta conseguimos observar as diferenças entre períodos, quer horários, quer tarifários e também o valor da tarifa de potência em horas de ponta [79].

TARIFA TRANSITÓRIA DE VENDA A CLIENTES FINAIS EM MT			PREÇOS	
Termo tarifário fixo			(EUR/mês)	(EUR/dia) *
			44,09	1,4495
Potência			(EUR/kW.mês)	(EUR/kW.dia) *
Tarifa de longas utilizações	Horas de ponta		9,786	0,3217
	Contratada		1,503	0,0494
Tarifa de médias utilizações	Horas de ponta		9,859	0,3241
	Contratada		1,418	0,0466
Tarifa de curtas utilizações	Horas de ponta		14,285	0,4697
	Contratada		0,754	0,0248
Energia ativa			(EUR/kWh)	
Tarifa de longas utilizações	Períodos I, IV	Horas de ponta	0,1321	
		Horas cheias	0,1050	
		Horas de vazio normal	0,0712	
		Horas de super vazio	0,0615	
	Períodos II, III	Horas de ponta	0,1331	
		Horas cheias	0,1053	
		Horas de vazio normal	0,0725	
		Horas de super vazio	0,0665	
Tarifa de médias utilizações	Períodos I, IV	Horas de ponta	0,1364	
		Horas cheias	0,1084	
		Horas de vazio normal	0,0718	
		Horas de super vazio	0,0617	
	Períodos II, III	Horas de ponta	0,1413	
		Horas cheias	0,1061	
		Horas de vazio normal	0,0748	
		Horas de super vazio	0,0665	
Tarifa de curtas utilizações	Períodos I, IV	Horas de ponta	0,2020	
		Horas cheias	0,1131	
		Horas de vazio normal	0,0751	
		Horas de super vazio	0,0664	
	Períodos II, III	Horas de ponta	0,2012	
		Horas cheias	0,1127	
		Horas de vazio normal	0,0754	
		Horas de super vazio	0,0699	
Energia reativa			(EUR/kvarh)	
		Indutiva	0,0252	
		Capacitiva	0,0189	

* RRC art. 119.º, n.º 6

Figura 32 - Preço das tarifas transitórias de Venda a Clientes Finais [79]

A arbitragem de energia envolve a operação de armazenamento de tal maneira que consome energia durante preços de mercado baixos e liberta energia quando os preços de mercado são mais altos [69]. A possibilidade de uso desta solução depende fundamentalmente da granularidade temporal do preço e do seu comportamento. Caso as oscilações intradiárias sejam significativas, é possível que esse uso se torne uma fonte de receita importante para os sistemas de armazenamento. Os consumidores finais também têm a possibilidade de instalar um sistema de baterias nas suas unidades consumidoras, podendo fazer arbitragem de energia. Atualmente, o armazenamento de energia em baterias BTM está num crescendo de popularidade entre as empresas comerciais e industriais, como uma solução económica para reduzir os encargos de energia e demanda. Prevê-se que este mercado cresça rapidamente [67].

Na Figura 33 a variação do custo da eletricidade por MW está representada pela linha a tracejado, verificando-se que este é variável ao longo do dia, sendo menor das 00 h às 6 h, período mais rentável para o armazenamento da eletricidade. A eletricidade armazenada é posteriormente aplicada quando o custo da eletricidade por MW for superior, coincidente com a altura de pico de consumo de eletricidade. P_1 é a potência armazenada nas horas de vazio, que depois de armazenada num sistema de ESS, é aplicada nas horas de pico energético, representado por P_2 [80].

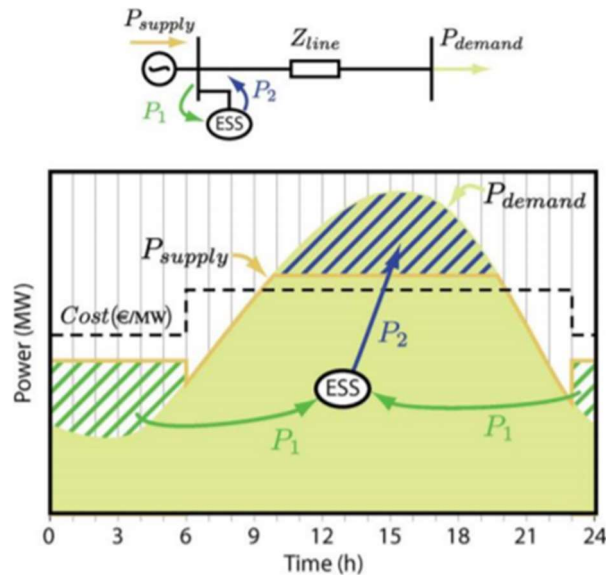


Figura 33 - Conceito de arbitragem de energia [80]

3.4.1.5 Fonte de energia ininterrupta

A fonte de alimentação ininterrupta - *Uninterruptible Power Supply* (UPS) - atua como um sistema de alimentação secundário que oferece suporte a energético durante interrupções na rede, picos ou oscilações de tensão e é crucial para alguns consumidores residenciais e comerciais que possuem sistemas de proteção contra incêndio e segurança, computador, bancos de dados de servidor e outros sistemas de automação que precisam de ser protegidos ou que mantêm continuamente os dados gravados na memória.

Ao contrário de outros sistemas de emergência, um UPS realiza reabilitação instantaneamente em eventos de corte na rede. Nesta situação este sistema garante o funcionamento na ordem de minutos diante desligamento brusco. Uma vez que tais aparelhos requerem continuidade de fornecimento, sistemas ESS com reação instantânea podem ser implantados para melhorar a qualidade da energia e fornecer energia de reserva durante interrupções de energia [69]. Temos como exemplo *Willis-Knighton Medical Center UPS*, que é um sistema de armazenamento de bateria de chumbo-ácido. Oferece serviços de qualidade de energia e confiabilidade do serviço elétrico em caso de quedas de tensão ou interrupções de curto prazo no fornecimento de energia do alimentador.

3.5 Análise de impactes ambientais das baterias

A utilização de baterias para este tipo de sistemas, para além das vantagens no seu uso, gera problemas no que toca à ao que fazer no fim da sua vida. A produção de baterias necessita de energia e diferentes tipos de materiais, tais como minerais, plástico, papel e eletrólitos. Destaca-se que devido ao elevado consumo energético durante a sua fabricação, as GEE são mais significantes quando comparadas a outros processos de armazenamento de energia. De entre os materiais utilizados, a cadeia de extração e processamento da matéria-prima mineral representa grande parte das preocupações socioambientais na produção de baterias. Para contornar os problemas relacionados à mineração existem iniciativas de desenvolvimento de pesquisas para uso de materiais alternativos, e também para o reaproveitamento de materiais por meio de reciclagem. A substituição por elementos mais abundantes na natureza e de menor toxicidade alinhado com o aumento da eficiência, da densidade energética e da vida útil minimizam a pressão sobre os recursos minerais [67].

Para além da produção e uso, o destino das baterias após o fim da sua vida útil, principalmente devido aos metais tóxicos na sua composição que apresentam riscos ao meio ambiente e à saúde caso não seja disposto adequadamente. A disposição segura de materiais perigosos é custosa, e as formas mais comuns consistem no envio para aterros ou incineradores. Seguindo a lógica circular, a bateria deve ser coletada e encaminhada para reparo ou recuperação, possibilitando o seu retorno à condição original, ou ainda a sua utilização em aplicações secundárias. Como apresentado anteriormente, no caso de baterias iões de-lítio de veículos elétricos, estas podem ser aproveitadas como armazenamento estacionário no setor elétrico. Essa prática possibilita a extensão da vida útil do equipamento contribuindo não somente para sua sustentabilidade, mas também para sua economicidade. Ao se esgotarem as opções de reuso, os materiais devem ser recuperados por meio de reciclagem [67].

Atualmente os processos de reciclagem de baterias são dispendiosos, a sua viabilidade depende dos custos de coleta, manuseio, desagregação, além de escala e valor do material recuperado. Destaca-se o nível elevado, acima de 99%, de reciclagem de baterias chumbo-ácido na Europa e Estados Unidos. Isso se deve principalmente pela simplicidade, padronização e rede de coleta bem estabelecida para esse tipo de bateria [67].

Tendo em conta as consequências sociais e ambientais das baterias, o relatório de Avaliação de Sustentabilidade de Tecnologias de Armazenamento de Energia preparado pelo *The Institute for Sustainable Futures for the Australian Council of Learned Academies* [81] apresenta as conclusões de uma avaliação dos possíveis impactos ambientais e sociais associados a estes elementos. Uma abordagem de ciclo de vida simplificada foi desenvolvida, fornecendo uma estrutura de avaliação de impacto consistente para avaliar as tecnologias. O nível de impacto para cada categoria foi classificado entre alto, médio e baixo.

A estrutura definiu dois critérios de impacto social: direitos humanos e saúde e segurança. Definiu ainda seis critérios de impactos ambientais:

- eficiência energética do ciclo de vida;
- emissões de gases de efeito estufa do ciclo de vida;
- criticidade da cadeia de suprimentos;
- intensidade do material, reciclabilidade e saúde ambiental;

A Figura 34 fornece uma visão geral das classificações de impacto ambiental e de segurança em todas as tecnologias de armazenamento. Considerando os critérios de eficiência energética e os de emissões de GEE do ciclo de vida, a análise mostra que as baterias de íons de lítio têm um bom desempenho em comparação com as outras baterias. Para as categorias de intensidade de material e reciclabilidade, o potencial para impactos ambientais adversos associados ao uso de material de baterias é maior, com exceção para as baterias de chumbo-ácido para as quais a reciclagem está madura. Por outro lado, isso destaca a oportunidade de desenvolver tecnologias de reciclagem para outras tecnologias de bateria.

		Alto	Médio	Baixo	Li-Ion NMC	Li-Ion LFP	Lead-based	Flow batterie	Sodium-ion
Impacto ambiental	Eficiência do ciclo de vida				●	●	●	●	●
	Emissões de GEE do ciclo de vida				●	●	●	●	●
	Criticidade da cadeia de suprimentos	●	●	●	●	●	●	●	●
	Intensidade material				●	●	●	●	●
	Reciclabilidade				●	●	●	●	●
	Saúde ambiental				●	●	●	●	●
Impacto social	Direitos humanos	●	●	●	●	●	●	●	●
	Saúde e segurança	●	●	●	●	●	●	●	●
Geral		●	●	●	●	●	●	●	●

Figura 34 - Custos de substituição e desmantelamento – valores utilizados

Os impactos na saúde ambiental local também são mais significativos para as tecnologias de bateria. Os impactos sociais adversos do nível mais alto também são identificados para as tecnologias de bateria devido aos efeitos significativos da mineração e fabricação que ocorrem no mar em jurisdições com direitos humanos e padrões de saúde e segurança deficientes. Neste momento estão em desenvolvimento estratégias de mitigação e gestão de novas tecnologias para o armazenamento de energia em grande escala.

CASO DE ESTUDO CAPWATT

- 4.1 SISTEMA ESS-CAPWATT
- 4.2 SERVIÇOS DO SISTEMA ESS-CAPWATT
- 4.3 METODOLOGIA
- 4.4 OPTIMIZAÇÃO TÉCNICA DO SISTEMA
- 4.5 OPTIMIZAÇÃO ECONÓMICA DO SISTEMA
- 4.6 OPTIMIZAÇÃO AMBIENTAL DO SISTEMA

4 CASO DE ESTUDO CAPWATT

Neste capítulo é mostrado o projeto da CapWatt, referindo as suas aplicações, serviços e as suas características técnicas. São apresentados também os serviços fornecidos por este sistema e apresentada a metodologia utilizada para a optimização do sistema em estudo. Por fim é demonstrado o trabalho desenvolvido da optimização deste sistema nas 3 vertentes propostas.

4.1 Sistema ESS-CAPWATT

4.1.1 Aplicações do sistema BESS CapWatt

O sistema de armazenamento de energia promovido pela CapWatt, apresentado na Figura 35, permite armazenar e gerir energia elétrica de forma sustentável, bem como maximizar o aproveitamento da produção proveniente de centrais fotovoltaicas, reduzindo custos e potenciando o consumo renovável. As baterias existentes neste sistema são carregadas ou descarregadas de acordo com as necessidades da infraestrutura elétrica a que está associado e utilização pretendida. Este sistema permite:

- Gestão de energia renovável - Os sistemas de baterias constituem um excelente complemento com instalações de produção renovável, caracterizadas maioritariamente por uma intermitência associada. Desta forma, é possível armazenar a energia renovável produzida quando esta não é consumida, para ser posteriormente utilizada em períodos onde não exista recurso renovável.
- Flexibilização das infraestruturas - O aumento das potências elétricas nas instalações leva muitas vezes à necessidade do reforço das infraestruturas. Em alternativa a este reforço, podem ser implementados sistemas de baterias, pois retardam a necessidade de investimento em determinados nós da infraestrutura de rede.
- Serviços de sistema BTM - A qualidade da energia fornecida às infraestruturas elétricas pode ser melhorada através de sistemas de armazenamento de energia, estabilizando e minimizando o efeito das perturbações ou falhas totais da rede. Para além desta função, permite ainda funções como Arbitragem de energia e *Peak shaving*, já referidas anteriormente.



Figura 35 - Sistema de armazenamento de energia CapWatt

4.1.2 Tecnologia e componentes

O sistema de armazenamento é constituído por um conjunto de módulos de baterias, apresentada na Figura 36, cuja gestão é atribuída ao *Battery Management Unit* (BMU) organizados em armários, constituindo no total seis armários, totalizando 798 kWh. Foi escolhida a tecnologia de baterias LFP, devido à maturação da tecnologia que permite que as baterias sejam adquiridas a um baixo preço e elevada densidade energética, dando como garantia todas as condições necessárias de segurança e performance das mesmas.

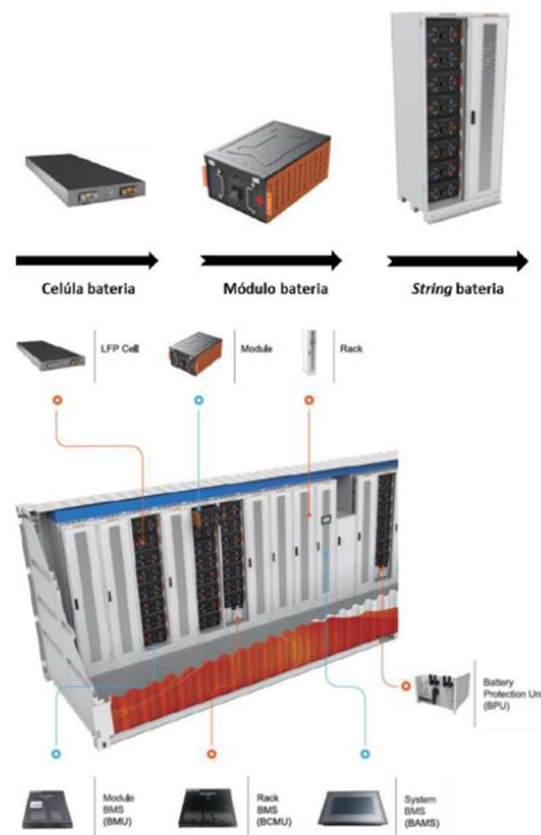


Figura 36 - Topologia do sistema de baterias

4.1.3 Descrição técnica do sistema de baterias

Neste subcapítulo são explicitadas as principais características técnicas do sistema proposto, assim como os impactos no sistema de diferentes tipos de exploração do mesmo. As características globais do sistema de baterias são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características globais do sistema de baterias

Característica	Solução final
Tecnologia de baterias	lão lítio (LFP)
Produto NARADA	51.2NESP200
Configuração do sistema	Número de armários: 6
Capacidade energética nominal	798 kWh
Carga/descarga máxima	320 kW
Capacidade max. Energética a.c. utilizável	640 kWh

4.1.4 Vida cíclica

Os pressupostos iniciais considerados são: uma potência de carga/descarga de 320 kW, uma capacidade energética utilizável de pelo menos 600 kWh no início de vida, e o funcionamento dentro da gama de temperaturas recomendada, aproximadamente entre 20-30 °C. A capacidade disponível no sistema agora proposto ao longo dos primeiros 10 anos é apresentada na. Esta curva apresentada na Figura 37 é obtida com base nos pressupostos e requisitos iniciais do sistema.

Anos	Capacidade restante
0	100.0%
1	95.9%
2	93.4%
3	90.8%
4	88.9%
5	87.3%
6	85.8%
7	84.4%
8	82.8%
9	81.3%
10	79.8%

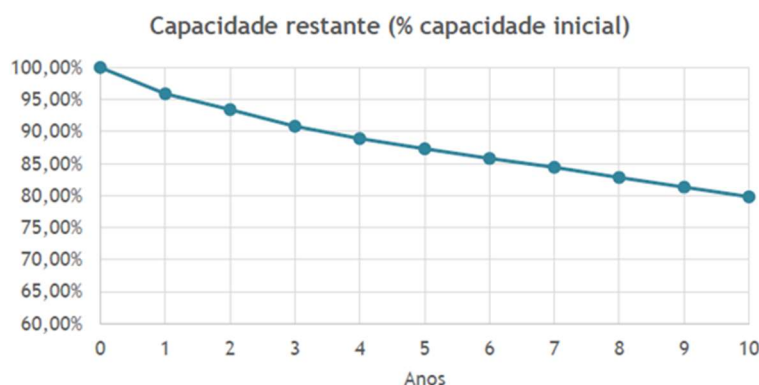


Figura 37 - Evolução da capacidade do sistema de baterias (1 ciclo)

4.1.5 Eficiência

A eficiência do sistema de baterias esperada, em regime de operação normal, é cerca de 90%. Os diferentes tipos de eficiência dividem-se em:

- Eficiência DC na descarga e na carga: A eficiência do sistema de baterias, ou seja, do lado DC, durante o processo de descarga;
- Eficiência DC-DC Round-trip: a eficiência do sistema de baterias, ou seja, do lado DC, considerando um ciclo completo de carga e descarga. Este valor é calculado pela multiplicação da eficiência DC na descarga e na carga;
- Eficiência AC-AC Round-trip: Representa a percentagem de energia que é possível descarregar para a rede elétrica por cada unidade de energia absorvida da mesma, considerando a eficiência quer do sistema de baterias quer de todos o sistema de conversão de potência.

4.1.6 Exploração alternativa do sistema de baterias

Outros regimes de exploração podem ser realizados na exploração do sistema de baterias. No entanto, essa exploração alternativa tem consequências na vida cíclica do sistema de baterias, o que afeta a performance, nomeadamente através de uma maior degradação da capacidade energética do sistema de baterias ao longo do seu tempo de vida útil, no caso de profundidade de descarga maior. Mais se refere que os dados apresentados não se referem a um perfil de utilização média, mas sim a um perfil de utilização constante, não sendo o processo de degradação do sistema linear.

4.1.6.1 Exploração com dois ciclos diários

Considere-se os pressupostos iniciais de uma potência de carga/descarga de 320 kW, uma capacidade energética utilizável de pelo menos 600 kWh no início de vida, o funcionamento dentro da gama de temperaturas recomendada. No caso de, nas mesmas condições, serem realizados dois ciclos diários ao invés de um ciclo diário para o qual o sistema foi inicialmente dimensionado, a estimativa de degradação do sistema ao longo dos 10 anos de funcionamento é apresentada na Figura 38.

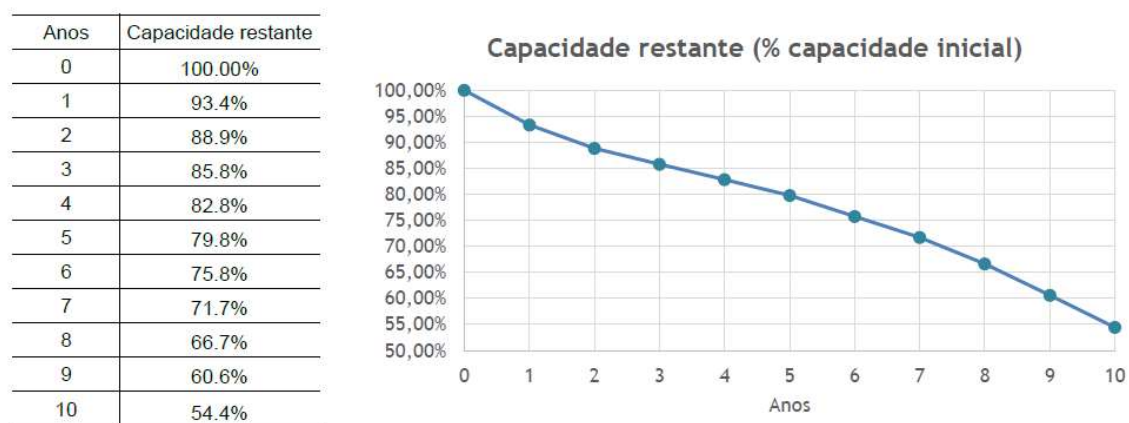


Figura 38 - Evolução da capacidade do sistema de baterias (2 ciclos)

4.2 Serviços do sistema ESS-CAPWATT

4.2.1 Peak shaving

O armazenamento de energia em baterias, pelas suas características técnicas, fornece uma resposta rápida e eficaz neste tipo de situações, como exemplificado na Figura 39.

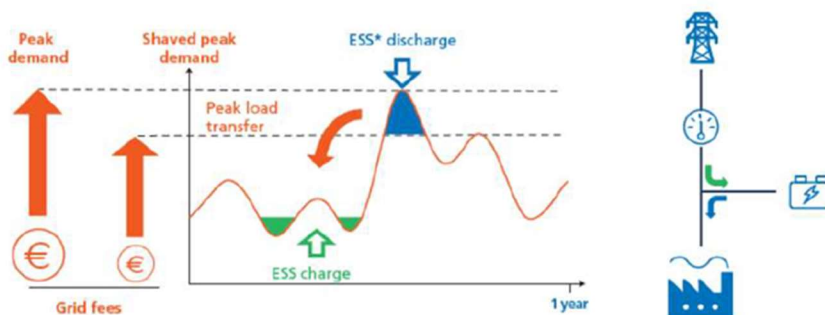


Figura 39 - Figura representativa de Peak Shaving (site: www.edf-re.de)

Pela sua especificidade e grau de importância no projeto e dimensionamento do sistema, este é entendido como um dos modos com maior preponderância na definição da estratégia global de operação do sistema.

4.2.2 Arbitragem de energia

Uma das aplicações a considerar para o sistema de armazenamento de energia proposto é a arbitragem de energia. As cargas e descargas do sistema de armazenamento em baterias pretendem retirar o maior proveito da flutuação do preço da eletricidade, tal como exemplificado na Figura 40.



Figura 40 - Figura representativa da arbitragem de energia (fonte: ee publishers)

4.3 Metodologia

Este trabalho tem como objetivo principal a otimização técnica, económica e ambiental de sistemas de armazenamento de energia, considerando a sua integração com os sistemas de produção e consumo existentes em polo industrial, para um funcionamento otimizado. Tudo isto é realizado com base nas características técnicas do sistema presente na CapWatt.

4.3.1 Metodologia vertente técnica e ambiental

De modo a atingir o objetivo proposto para este estudo, a metodologia utilizada, tanto para a otimização técnica como para a ambiental, consistiu na procura de soluções através da análise de opções existentes no mercado e perceber de que maneira essas poderiam ser replicadas para a otimização do sistema apresentado.

4.3.2 Metodologia vertente económica

A metodologia para uma análise económica com base na tese *Techno-economic analysis of the deployment potential of energy storage for grid connected applications* [39] de Niklas Sebastian Güntern, no âmbito do Mestrado de Engenharia e Gestão de Energia, no Instituto Superior Técnico de Lisboa, utilizando as características e especificações técnicas similares ao sistema de armazenamento de energia instalado na CapWatt. Esta metodologia têm também por base um artigo que será também usado neste subcapítulo – *Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis* [82]. Outro artigo usado neste subcapítulo é *The new rules of competition in energy storage* da McKinsey&Company [83].

Sempre que necessário for tomar a decisão de avançar ou não avançar com um investimento, quer seja no setor público, privado ou pessoal, o procedimento habitual é a comparação dos potenciais benefícios deste investimento, com os custos necessários a efetuar. Este também é o caso no setor de energia no que diz respeito à implantação de ESSs. A esta comparação chamaremos *Análise de custo-benefício*. Este investimento só fará sentido se, no fim da análise, os benefícios excederem os custos. Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada na análise de custo-benefício.

Foi desenvolvida uma metodologia genérica para analisar casos em relação a custos e benefícios. Para este propósito, o ESS é modelado para consistir em um sistema de conversão de energia e uma seção de armazenamento que podem ser caracterizados e avaliados independentemente um do outro. Ambas as seções têm eficiências inerentes que são levadas em consideração na eficiência geral do sistema - η_{Sys} . O modelo é ilustrado na Figura 41.

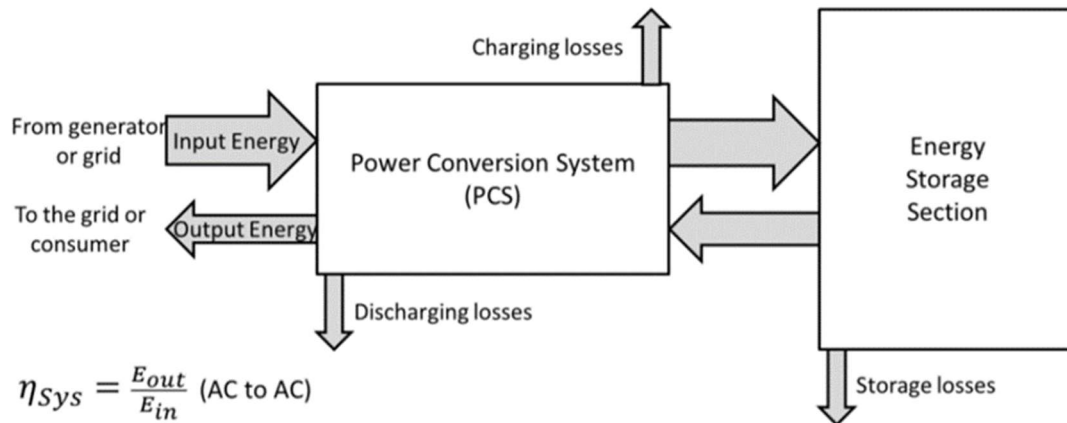


Figura 41 - Secção principal do ESS e perdas de energia [82]

Neste modelo, uma vez que se considera um *Power Conversion System* (PCS) próximo do ESS, todas as perdas são consideradas utilizando apenas o rendimento global do sistema.

Os valores de perdas que consideramos foram os seguintes:

- η_{Sys} – 90%
- Charging losses – 5%
- Discharging losses – 7%

Normalmente, os custos e benefícios incluem todos os efeitos positivos e negativos causados por um projeto e não são necessariamente dados em termos monetários. A dificuldade em realizar uma análise destas abrangente está em atribuir valores monetários a esses efeitos, a fim de torná-los comparáveis. As diferentes camadas de possíveis efeitos no projeto de infraestrutura de energia são o impacto no sistema de energia, as externalidades e os efeitos macroeconómicos. Os efeitos no sistema de energia podem ser categorizados em produção, infraestrutura, consumo e outras atividades.

Dependendo do projeto, alguns dos efeitos podem não ser relevantes, especialmente em relação a projetos no setor privado, e podem, portanto, ser negligenciados. Sendo esta análise realizada do ponto de vista do operador e do proprietário do ESS, apenas os efeitos monetários do investimento e dos custos operacionais, bem como os benefícios gerados pelo ESS e o sistema em seu entorno imediato são considerados. Comparando com a base utilizada para fazer esta análise, apenas alguns pontos foram usados. Esta análise foi executada seguindo as etapas apresentadas na Figura 42.

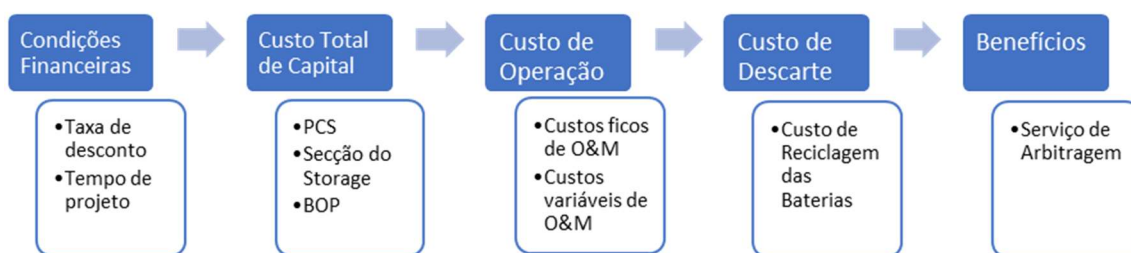


Figura 42 - Etapas na análise custo-benefício

4.3.2.1 Condições financeiras

Antes de começar com o cálculo estimado de custos e benefícios, as condições financeiras devem ser esclarecidas. Dependem do proprietário do ESS, do mercado em que é operado e

do projeto em si e inclui a taxa de desconto aplicável (r), a taxa de reinvestimento que é considerada aqui o custo médio ponderado de capital (WACC), a taxa de inflação (i), a vida útil do projeto (T) e o imposto (t). Nesta análise apenas as variáveis relevantes foram usadas. As variáveis consideradas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Condições financeiras: Valores utilizados

Nome	Abreviatura	Valor
Taxa de desconto	r	5%
Taxa de inflação	i	2%
Vida útil do projeto	T	15 anos

4.3.2.2 Custo total de capital

O custo de capital total (C_{Cap}) inclui todos os custos de compra, entrega e instalação do ESS. Estes podem ser divididos em custos para o sistema de conversão de energia (C_{PCS}), a seção de armazenamento (C_{stor}) e o balanço de custos da planta (C_{BOP}):

- Os custos de PCS normalmente incluem os custos de interconexões de energia e eletrônicos de energia, como retificadores e inversores, e dependem da capacidade de energia [\$/kW];
- Os custos da Seção de armazenamento descrevem os custos da bateria que dependem da capacidade de energia [\$/kWh];
- O balanço dos custos da planta (BOP) contém todas as outras despesas necessárias para configurar o ESS, como engenharia e design do projeto, integração do sistema, terrenos e edifícios, sistemas de monitorização, controlo e instalação. Esses custos podem ser medidos por unidade de capacidade de energia [\$/kW] de unidade de capacidade de energia [\$/kWh].

Para usar unidades idênticas para o cálculo, todos os custos serão convertidos para serem descritos como por unidade de capacidade de energia [\$/kW], portanto, o custo por unidade de capacidade de energia [\$/kWh] será multiplicado pelo tempo de carga/descarga (t_c).

Portanto, o custo de capital total foi calculado da seguinte maneira:

$$C_{Cap} = C_{PCS} + C_{stor} \times t_c + C_{BOP} \quad [$/kW] \quad a$$

Com:

$$t_c = \frac{\text{Energy Capacity}}{\text{Power Capacity}} \quad [h] \quad b$$

Os valores usados diferem dos valores do documento de referência, uma vez que foram usados valores do artigo [83]. De forma a dividir os valores em PCS, BOP e stor, fez-se a seguinte equivalência apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Equivalência entre documentos

Documento referência	Artigo
PCS	EPC+Soft costs
BOP	BOS
stor	Battery pack

A análise será dividida em 2 vertentes. Será feita uma análise para a instalação deste sistema no ano 2020 e no ano 2025, de maneira a demonstrar a evolução dos custos estimados de investimento nos dois anos. Para isso, foram estimados os valores de investimento para estes dois anos presentes no artigo [83], de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Custo total de capital: Valores utilizados

Ano	Nome	Valor \$	Valor €*
2020	C_{PCS}	274,34 \$/kW	233,2 €/kW
	C_{stor}	160 \$/kWh	136 €/kWh
	C_{BOP}	324 \$/kW	275,6 €/kW
2025	C_{PCS}	187,1 \$/kW	159 €/kW
	C_{stor}	110 \$/kWh	93,5 €/kWh
	C_{BOP}	222 \$/kW	180,2 €/kW

*O valor de conversão utilizado foi 1\$ = 0,85€

4.3.2.3 Custo de operação

Os custos de operação e manutenção ($C_{O\&M}$) são os custos que se acumulam continuamente durante a vida útil do ESS. Os custos que devem ser pagos independentemente da operação são custos fixos de O&M ($C_{O\&M,f}$) [\$/kW]. Os custos variáveis de O&M ($C_{O\&M,v}$) dependem da capacidade de operação do ESS e, portanto, são expressos por unidade de energia descarregada [\$/kWh]. O número de ciclos de descarga completos por ano (n) é usado para anualizar os custos variáveis de O&M. Os custos de contabilização de perdas (C_L) devido à eficiência não serão usados neste caso, mas podem também ser incluídos nos custos variáveis de O&M. Os custos anuais totais de O&M são calculados usando a seguinte equação:

$$C_{O\&M} = C_{O\&M,f} + (C_{O\&M,v} + C_L) \times n \times t_c \quad [$/kV \quad c$$

Os valores típicos apresentados no artigo [82] para os componentes dos custos de operação e manutenção capital são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores fixos e variáveis de O&M [82]

Custo	Média	<i>Middle fifty range</i>	<i>Range</i>
O&M fixo (€/kW-ano)	6.9	4.9-11.2	2.0-13.7
O&M variável (€/MWh)	2.1	0.99-3.6	0.4-5.6

Uma vez que o sistema utilizado como referência neste estudo é de potência baixa, os valores usados são baseados no máximo da coluna *Middle fifty range*. Estes valores foram iguais para ambos os anos de instalação. Com isto temos então os valores apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores usados de O&M

Nome	Valor \$
$C_{O\&M,f}$	11,2 \$/kW
$C_{O\&M,v}$	0,0036 \$/kWh

4.3.2.4 Custos de substituição e desmantelamento

No que se refere aos custos de substituição e desmantelamento, se a vida útil do projeto for maior do que a vida útil dos componentes do ESS, eles terão que ser substituídos. No presente caso, a substituição de componentes não será necessária, pois considera-se a vida útil do projeto igual à vida útil dos componentes do ESS.

No entanto, no fim de vida útil do projeto, todo o ESS deve ser descartado, o que cria custos adicionais de desmantelamento e reciclagem para o PCS ($C_{D, PCS}$) [\$/kW] e a Secção de armazenamento ($C_{D, stor}$) [\$/kWh].

Estes não são desprezíveis, pois a maioria das baterias requer um tratamento especial no final de sua vida útil, o que pode ser caro. O cálculo executado para determinar estes custos foi feito usando a seguinte fórmula:

$$C_D = C_{D,PCS} + C_{D,stor} \times t_c \quad [$/kW] \quad d$$

Os valores típicos analisados no documento de referência para os componentes dos custos de substituição e desmantelamento são mostrados na Tabela 9. Estes valores foram utilizados em ambos os anos de instalação.

Tabela 9 - Custos de substituição e desmantelamento – valores típicos analisados

Nome	Abreviatura	Valor	Unidade	Fonte
Reciclagem do PCS	$C_{D, PCS}$	5.5	\$/kW	[Narula et al. 2011]
Reciclagem da secção de storage	$C_{D, stor}$	5.5	\$/kWh	[Narula et al. 2011]

Com estes valores, e já apresentando as conversões para euros, consideraram-se nos cálculos os valores da Tabela 10:

Tabela 10 - Custos de substituição e desmantelamento – valores utilizados

Nome	Valor \$/kW	Valor €/kW*
$C_{D,PCS}$	5,5 \$/kW	4,72 €/kW
$C_{D,stor}$	5,5 \$/kW	4,72 €/kW

*O valor de conversão utilizado foi $1\$ = 0,85€$

4.3.2.5 Benefícios

Os benefícios do projeto são gerados diretamente pelo ESS. Nesta análise apenas se considerou um serviço principal (arbitragem). Os benefícios anuais totais podem então ser somados:

$$B = B_A + \sum_{i=1}^k B_{sec,i} \quad [\text{\$}] \text{ or } [\text{\$/kW}] \quad e$$

4.3.2.5.1 Métricas de Avaliação

Uma grande diversidade de métricas podem ser aplicadas para descrever os resultados de uma análise de custo-benefício. As escolhidas neste caso foram as seguintes:

4.3.2.5.1.1 Valor presente líquido (VAL)

O valor presente líquido determina se um projeto é ou não lucrativo. Se o VPL for positivo, o projeto é lucrativo. Se for negativo, o investidor está a perder dinheiro. Para calcular o VPL, os fluxos de caixa (CF_j) que representam os custos e benefícios do ano j são descontados para o tempo presente usando a taxa de desconto r e, em seguida, somados:

$$NPV = \sum_{j=0}^T \frac{CF_j}{(1+r)^j} \quad f$$

4.3.2.5.1.2 Taxa interna de retorno (TIR)

Se a taxa interna de retorno for maior que a taxa de desconto aplicável, o projeto é lucrativo e a alternativa com a maior TIR é escolhida. A TIR representa a taxa de desconto que tornaria o VPL igual a zero e geralmente é calculada iterativamente:

$$NPV = 0 = \sum_{j=0}^T \frac{CF_j}{(1+IRR)^j} \quad g$$

4.3.2.5.1.3 Período de Retorno (PR)

O período de retorno do investimento (PR) é o tempo necessário para que um projeto recupere o seu investimento inicial. O período de retorno pode ser calculado dividindo o fluxo de caixa anual (CF_j) pelo investimento inicial (Inv_0):

$$PB = \frac{CF_j}{Inv_0} \quad h$$

4.4 Optimização técnica de sistema

Para além da utilização convencional descrita e analisada anteriormente, no futuro este sistema poderá funcionar de forma diferente. As diferenças variam no que toca à proveniência da energia usada para carregar as baterias e também no tipo de funções que este sistema pode assumir. Neste subcapítulo são apresentadas propostas para uma optimização técnica de sistema.

4.4.1 Propostas de optimização de sistema

Uma das opções possíveis de aplicação de um sistema BESS será o armazenamento de energia renovável para utilização em períodos de falta dela, minimizando o problema da intermitência das renováveis.

4.4.1.1 UPACs e unidades de produção fotovoltaica

Quando conectados à rede, os sistemas de armazenamento podem ser implantados junto com PV para maximizar o valor económico do sistema fotovoltaico e para apoiar operações críticas durante interrupções da rede, se configurado e controlado apropriadamente.

Em geral, os sistemas *DPV-plus-storage* podem agregar valor reduzindo custos, gerando receita, ou fornecendo resiliência. A redução de custos é alcançada por meio de gestão de contas de serviços públicos; por exemplo, aumentando o autoconsumo de PV, reduzindo cobranças de demanda, ou usando arbitragem de energia. Receitas podem ser geradas pelo despacho do sistema durante um evento de resposta à demanda ou participando em serviços auxiliares. Finalmente, esses sistemas podem fornecer energia de reserva para suportar operações críticas durante distúrbios na rede [84]. A energia produzida em sistemas PV e não consumidas, ou seja, o excedente, pode ser aproveitada para recarregar as baterias dos ESS.

4.4.1.2 Comunidade de Energia Renovável (CER)

Uma comunidade de energia renovável permite a que os *prosumers*, usualmente donos de sistemas de energia solar fotovoltaica para autoconsumo, também possam ter atividades de partilha e armazenamento da energia excedente, sendo um regime no qual uma ou mais UPACs podem estar ligadas a um ou mais pontos de consumo.

Para além dos benefícios da utilização da energia renovável no sistema elétrico, a nível económico, o *prosumer* tem como vantagem a partilha de energia ao *vizinho* a um preço mais elevado do que se vendesse à rede. Já o *vizinho*, acaba também por ter poupança nos gastos energéticos pois o preço que paga ao *prosumer* é mais baixo do que seria se fosse comprar à rede. Se a produção assim o permitir, a integração de um sistema BESS, poderá também fazer sinto, acumulando o excedente da produção fotovoltaica [85].

A existência de energia proveniente de solar fotovoltaica poderá ser possível aplicar o conceito de comunidade de energia renovável associada a mais empresas com sistemas fotovoltaicos formando uma parceria de *prosumers* de maneira a partilhar os excedentes obtidos a consumidores. O armazenamento pode ser integrado nestes sistemas de controlo, controlando a energia que seja partilhada.

4.4.2 Sistemas de carregamento de veículos elétricos

Um dos maiores problemas que impedem a disseminação de veículos elétricos é a dificuldade de suporte das estações de carregamento rápido distribuídas pelas redes de distribuição reais. Na verdade, uma significativa quantidade de energia é necessária para o carregamento rápido, especialmente se vários veículos precisarem de ser fornecidos simultaneamente, o que pode resultar em altas demandas de energia em alturas de pico. Nas áreas urbanas, é provável que muitos consumidores recarreguem os seus veículos entre 7h e 9h, ao meio-dia, e entre 18h e 20h. Os operadores de rede podem não ser capazes de superar os futuros requisitos de pico de energia sem sobredimensionar a energia instalada [86].

Uma possível abordagem para mitigar esse problema pode ser adicionar um sistema de armazenamento elétrico de bateria a uma estação de carregamento rápido, que atuará como um buffer para reduzir o pico de demanda de energia na rede sem aumentar o tempo de carregamento do EV. Segundo Maria Chavez, analista de pesquisa da *Guidehouse Insights*, “Um sistema de armazenamento em bateria pode alimentar-se da rede durante a baixa demanda e libertar energia para carregar um EV durante o horário de pico de demanda” [87]. Para além desta possibilidade, a integração entre carregamento de EV, armazenamento e energia solar também foi destacada por Maria Chavez da *Guidehouse*, afirmando que “o armazenamento de energia não apenas ajuda na redução de pico para tornar as soluções de carregamento de EV mais económicas, mas também é necessário para apoiar a integração de recursos de energia renovável em estações de carregamento EV” [87].

Em situações de excedente de produção, recarregaria as suas baterias e em situações em que haveria produção residual poderia disponibilizar energia de maneira a carregar o veículo. A tecnologia *smart-charging* pode ser incorporada de maneira a tomar decisões automáticas sobre como e quando os EVs seriam carregados, permitindo que o EV responda a preços variáveis de energia e outros sinais de controlo.

4.4.2.1 Vehicle to X

Vehicle-to-Everything (V2X) é definido como a transferência de eletricidade bidirecional entre a bateria de um EV e o sistema ao qual está conectado. Ao permitir que os veículos controlem o comportamento de carregamento e fornecimento de energia, a tecnologia V2X visa oferecer serviços para residências, edifícios e sistemas elétricos, ao mesmo tempo que minimiza a degradação da bateria e os inconvenientes para os utilizadores de EV.

A tecnologia V2X requer um inversor bidirecional para converter a saída de energia DC da bateria integrada em AC para carregar e descarregar a bateria EV. Com a utilização da tecnologia V2X que permite, através de um inversor bidirecional, converter a saída de energia DC da bateria integrada em AC para carregar e descarregar a bateria EV, é possível usar as baterias dos automóveis. Dependendo das necessidades energéticas no polo, a energia presente nas baterias dos EVs pode ser usada para carregar as baterias do sistema ESS.

4.4.3 Gestão de Cargas

Outra utilização possível de sistemas ESS será a gestão de cargas, com o objetivo de reduzir a potência contratada. A título de exemplo, temos o controlo de cargas dos grandes equipamentos de climatização. No Verão, com o aumento de temperatura, os *chillers* – máquina que tem como função arrefecer água ou outro líquido em diferentes tipos de aplicações, através de um ciclo termodinâmico – estão em funcionamento mais horas, apresentando um maior consumo energético, podendo haver o risco da potência contratada aumentar. De maneira a evitar que a potência contratada aumente, resultando em maiores custos energéticos, uma ligação ao sistema ESS poderá ser relevante. Com o uso de informações da previsão de temperatura dos dias seguintes, permitindo analisar a possibilidade da necessidade da ligação destes *chillers*, o sistema pode ser programado de maneira a que compense a energia necessária usada, evitando a subida da potência contratada, servindo como sistema de segurança no que toca à potência contratada.

4.5 Optimização económica de sistema

Neste subcapítulo, é feita a análise custo-benefício a um sistema de armazenamento tipo, baseado numa potência de 320 kW e uma capacidade instalada de 798 kWh, que funcione na função de arbitragem de energia. Foi estimado também que o sistema em análise terá uma eficiência média de 90%, como referido anteriormente. Os benefícios serão provenientes desta função. Como abordado anteriormente, esta análise será feita para 2 anos de instalação, ano 2020 e 2025.

4.5.1 Dados

A vida útil do PCS e da Secção de armazenamento considerada foi de 15 anos. Todos os valores de custo e benefício são calculados para o primeiro ano e depois aumentados pela taxa de inflação para os anos seguintes. A análise tem como base os dados apresentados anteriormente no subcapítulo *Descrição técnica do sistema de baterias* e os valores de referência já selecionados anteriormente. Com isto, obtêm-se a Tabela 11:

Tabela 11 - Valores de input

Parâmetros	Abreviatura	Valores – 2020	Valores – 2025	Unidade
Energy power	P _{cap}	320	320	kW
Energy capacity	E _{cap}	798	798	kWh
Tempo de um ciclo	t _c	2,5*	2,5*	h
Ciclos anuais	Ciclos	424*	424*	-
Eficiência do sistema	η_{Sys}	90	90	%
Taxa de desconto	r	5	5	%
Taxa de inflação	i	2	2	%
Tempo de vida do projeto	T	15	15	Anos
Tempo de vida do PCS	T _{PCS}	15	15	Anos
Tempo de vida do Storage	T _{stor}	15	15	Anos
Custo do PCS	C _{PCS}	233,2	159	€/kW
Custo da secção Storage	C _{stor}	136	93,5	€/kWh
Custo da BOP	C _{BOP}	275,6	180,2	€/kW
Custo fixo de O&M	C _{O&M,f}	11,2	1,2	€/kW
Custo variável de O&M	C _{O&M,v}	0,0036	0,0036	€/kWh
Custo de desmontagem do PCS	C _{D,PCS}	4,72	4,72	€/kW
Custo de desmontagem do Storage	C _{D,stor}	4,72	4,72	€/kWh

*Considerando que, por exemplo, o sistema funciona durante 6 dias da semana, de segunda a sábado. Durante o período de Verão, o sistema funciona em 1 ciclo diário, e no período de Inverno funciona com 2 ciclos diários. Após uma verificação do número de dias da semana e de sábados nos anos 2021,2022 e 2023, usou-se como média o valor de 302 dias por ano, com exceção dos feriados, em que o sistema se encontra em funcionamento. Dentro destes 302 dias, usaram-se os valores apresentados na Tabela 12. Este foi o valor usado ao longo dos 15 anos de funcionamento do sistema.

Tabela 12 - Número de ciclos anuais

Nº de ciclos	Dias de Verão		Dias de Inverno		Ciclos
	Semana	Sábados	Semana	Sábados	
-					-
1 ciclo	150	30	102	20	302
1 ciclo Verão/2 ciclos Inverno	150	30	204	40	424

*O valor do tempo de um ciclo é calculado através da equação de t_c apresentada anteriormente:

$$t_c = \frac{798}{320} = 2,49'$$

4.5.2 Definição do funcionamento do sistema

Na realização desta análise, primeiramente é necessário definir o funcionamento deste sistema ao longo do ano. Consoante o período em que nos encontrarmos, os períodos horários em que se compra e vende a energia são diferentes. No Verão a compra é sempre feita em horas de super-vazio e a venda está dependente do dia da semana em que estamos. Já no Inverno, com os dois ciclos diários, há uma maior diversidade a analisar. De acordo com a utilização estimada do sistema, a Tabela 13 de seguida apresentada define os períodos estimados de compra e venda de energia.

Tabela 13 - Períodos de compra e venda de energia

Pressupostos	Valores	Compra	Vende	Compra	Vende
1 ciclo diário - Verão	6 ciclos semanais	-	-	-	-
Semana	5 ciclos	Super vazio	Ponta	-	-
Sábados	1 ciclo	Super vazio	Cheia	-	-
2 ciclos diários – Inverno	12 ciclos semanais	-	-	-	-
Semana	10 ciclos	Super vazio	Ponta	Cheia	Ponta
Sábados	2 ciclos	Super vazio	Cheia	Vazio	Cheia

Com base na Figura 32 e considerando-se a taxa de longas utilizações, podemos também verificar o número de horas de ponta durante os dias, mais propriamente à semana, uma vez que ao sábado não há horas de ponta. Com isto, temos a Tabela 14:

Tabela 14 - Nº de horas de ponta diário

	Dias de Verão		Dias de Inverno	
	Semana	Sábados	Semana	Sábados
Nº de horas de ponta diário	3	0	5	0

4.5.2.1 Métodos de funcionamento

Foram analisados o comportamentos das baterias em 3 modos de funcionamento: funcionamento base, com funcionamento em 1 ciclo diário/DoD 80% ao qual chamaremos *Método A*; e o funcionamento que será alvo de estudo nesta análise, ao qual chamaremos *Método B*, com funcionamento a 1 ciclo diário no Verão/2 ciclos diários no Inverno - DoD 80%. O *Método A* será apenas apresentado para demonstrar a metodologia utilizada. Todos os restantes cálculos usados estão disponíveis em anexos.

Para além deste modos de funcionamento, um terceiro método foi ainda analisado, apenas para o ano de 2025. Enquanto que no *Método B* se pressupõe a utilização de energia proveniente da rede elétrica para o carregamento das baterias, no chamado *Método C* isso não acontecerá em pleno. Este *Método C* é em tudo igual ao *Método B*, em termos de funcionamento, sendo diferente apenas na origem de energia no carregamento de baterias, onde 30% da energia será proveniente de energia renovável, reduzindo assim os custos na compra de energia.

4.5.3 Benefícios

Como dito anteriormente, os benefícios estimados nesta análise são provenientes da função de arbitragem. Muito resumidamente, os benefícios resultam da diferença entre a compra e a venda de energia, resultando em ganhos económicos. Apesar de parecer simples, muitas componentes são usadas para o cálculo destes ganhos. Para ambos os anos, os benefícios serão os mesmos. As componentes analisadas foram:

- Definição do funcionamento do sistema - período horário de compra e venda, valores de compra e venda;
- Valores de Entrada de energia - número de ciclos, SoH, DoD, perdas no carregamento, taxa de degradação da bateria, diferenças entre Verão e Inverno;
- Valores de Saída de energia - número de ciclos, SoH, DoD, perdas na descarga, eficiência do sistema, taxa de degradação da bateria, diferenças entre Verão e Inverno;
- Cálculo dos custos em energia e dos ganhos em energia – determinação do lucro obtido no fim do projeto.

Neste subcapítulo serão apenas referido os dois primeiros métodos, uma vez que, como referido anteriormente, o modo de funcionamento do *Método B* e *C* são iguais.

4.5.3.1 Valores de Entrada de energia

Como referido anteriormente, os valores de entrada de energia estão dependentes de muitos fatores: número de ciclos, SoH, DoD, perdas no carregamento, taxa de degradação da bateria e as diferenças entre Verão e Inverno. Neste subcapítulo são apresentados os valores de entrada de energia nas diferentes possibilidades de funcionamento do sistema, tendo sempre como objetivo demonstrar o impacto na bateria no *Método B*.

- *Método A*

Tabela 15 - Parâmetros *Método A*

Parâmetros	Abreviatura	Valor	Unidade
Número de ciclos anuais	ciclos	365	-
State of Health (ano 10)	SoH	80	%
Depth of Discharge	DoD	80	%

Os valores apresentados na Tabela 15 são relativos à capacidade restante na bateria ano após ano, com 365 ciclos anuais, com base na Figura 37. Mas uma vez que, no caso de um ciclo diário, durante um ano só se faria 302 ciclos, a degradação foi ajustada através de uma regra de 3 simples:

$$\text{Diferença na degradação} = \frac{(302 \times 100)}{365} = 82,74\%$$

Para além desta aproximação, também se estimou a degradação da bateria nos cinco anos seguintes ao 10º ano. Usou-se o valor médio de perda de 1,5% da capacidade restante a cada ano. Na análise estimou-se ainda que o sistema terá 5% de perdas, como referido anteriormente. Com todas estas estimativas e com os valores apresentados na Tabela 16 foi possível determinar a energia de entrada por ciclo, por ano.

Tabela 16 -Parâmetros do Método A

Parâmetros	Abreviatura	Valor	Unidade
Energy Power	P_cap	320	kW
Energy capacity	E_cap	798	kWh
Depth of Discharge	DoD	80	%
Número de ciclos anuais	ciclos	302	-
Perdas no Carregamento	P_carr	5	%

Os valores calculados são apresentados na Tabela 17:

Tabela 17 - Valores de entrada de energia do Método A

Cap. restante = 365 ciclos	Cap. restante = 302 ciclos	Anos	Energia de Entrada	Unidade
100%	100%	2021	670,3	kWh
95,9%	96,6%	2022	647,5	kWh
93,4%	94,5%	2023	633,7	kWh
90,8%	92,3%	2024	619,2	kWh
88,9%	90,8%	2025	608,7	kWh
87,3%	89,4%	2026	599,8	kWh
85,8%	88,2%	2027	591,5	kWh
84,4%	87,0%	2028	583,7	kWh
82,8%	85,7%	2029	574,9	kWh
81,3%	84,5%	2030	566,6	kWh
79,8%	83,2%	2031	558,2	kWh
78,3%	82,0%	2032	549,9	kWh
76,8%	80,8%	2033	541,6	kWh
75,3%	79,5%	2034	533,3	kWh
73,8%	78,3%	2035	525,0	kWh

A fórmula utilizada para o cálculo de entrada de energia foi o seguinte:

$$\text{Entrada energia} = [(798 \times \text{DoD}) \times \% \text{capacidade restante}] \times 1,05 \quad (\text{kWh})$$

Usando a mesma metodologia, calcularam-se então os valores de entrada de energia para o *Método B*:

- *Método B*

Tabela 18 - Parâmetros do *Método B*

Parâmetros	Abreviatura	Valor	Unidade
Energy Power	P_cap	320	kW
Energy capacity	E_cap	798	kWh
Depth of Discharge	DoD	80	%
Número de ciclos anuais	ciclos	424	-
Perdas no Carregamento	P _{carr}	5	%

Nesta análise estimou-se que a degradação da bateria teria um valor médio de perda de 4% da capacidade restante a cada ano. Tem ainda uma diferença na degradação de cerca de 77%. Os valores calculados são apresentados na Tabela 19:

Tabela 19 - Valores de entrada de energia do *Método B*

Cap. Restante 548 ciclos	Cap. Restante 424 ciclos	Anos	Energia de Entrada no Verão	Energia de Entrada no Inverno	Unidade
100%	100%	2021	670,3	1340,6	kWh
94,9%	96,0%	2022	643,9	1287,9	kWh
91,1%	93,1%	2023	624,4	1248,8	kWh
88,3%	90,9%	2024	609,6	1219,2	kWh
85,8%	89,0%	2025	596,9	1193,8	kWh
83,5%	87,2%	2026	585,0	1170,0	kWh
80,8%	85,1%	2027	570,7	1141,4	kWh
78,0%	83,0%	2028	556,4	1112,9	kWh
74,7%	80,4%	2029	539,3	1078,7	kWh
70,9%	77,5%	2030	519,6	1039,3	kWh
67,1%	74,5%	2031	499,6	999,3	kWh
63,1%	71,4%	2032	478,9	957,8	kWh
61,6%	70,2%	2033	471,1	942,3	kWh
60,1%	69,1%	2034	463,3	926,7	kWh
58,6%	67,9%	2035	455,6	911,2	kWh

A energia de entrada no verão foi calculada com a mesma fórmula apresentada anteriormente. Já no caso da energia de entrada no inverno, uma vez que se fazem 2 ciclos, a fórmula foi a seguinte:

$$\text{Entrada energia} = [(798 \times \text{DoD}) \times \% \text{ capacidade restante} \times 2] \times 1,05 \quad (\text{kWh})$$

4.5.3.2 Valores de Saída de energia

Tal como os valores de entrada de energia, os valores de saída de energia estão também dependentes dos mesmo fatores, com acréscimo de dois: perdas na descarga e eficiência do sistema. Neste subcapítulo são apresentados os valores de saída de energia para as possibilidades de funcionamento do sistema, tendo sempre como objetivo demonstrar o impacto na bateria.

- *Método A*

Com as mesmas estimativas e com os mesmos valores apresentados nos valores de entrada de energia, com mais alguns acréscimos, foi possível determinar a energia de entrada por ciclo, por ano. Os valores são apresentados na Tabela 20:

Tabela 20 - Parâmetros do *Método A*

Parâmetros	Abreviatura	Valor	Unidade
Energy Power	P_cap	320	kW
Energy capacity	E_cap	798	kWh
Depth of Discharge	DoD	80	%
Número de ciclos anuais	ciclos	302	-
Coeficiente de perdas	C _{perdas}	7	%
Eficiência do Sistema	η _{Sys}	90	%

Os valores calculados são apresentados na Tabela 21:

Tabela 21 - Valores de saída de energia no *Método A*

Cap. Restante = 365 ciclos	Cap. restante = 302 ciclos	Anos	Energia de Saída	Unidade
100%	100%	2021	534,3	kWh
95,9%	96,6%	2022	516,2	kWh
93,4%	94,5%	2023	505,1	kWh
90,8%	92,3%	2024	493,6	kWh
88,9%	90,8%	2025	485,2	kWh
87,3%	89,4%	2026	478,1	kWh
85,8%	88,2%	2027	471,5	kWh
84,4%	87,0%	2028	465,3	kWh
82,8%	85,7%	2029	458,3	kWh
81,3%	84,5%	2030	451,6	kWh
79,8%	83,2%	2031	445,0	kWh
78,3%	82,0%	2032	438,4	kWh
76,8%	80,8%	2033	431,7	kWh
75,3%	79,5%	2034	425,1	kWh
73,8%	78,3%	2035	418,5	kWh

A fórmula utilizada para o cálculo de entrada de energia foi o seguinte:

$$\text{Saída energia} = [(798 \times \text{DoD}) \times \% \text{capacidade restante}] \times 0,9 \times (1 - 0,07) \quad (\text{kWh})$$

Usando a mesma metodologia, calcularam-se então os valores de saída de energia para o Método B:

- *Método B*

Tabela 22 - Parâmetros do *Método B*

Parâmetros	Abreviatura	Valor	Unidade
Energy Power	P_cap	320	kW
Energy capacity	E_cap	798	kWh
Depth of Discharge	DoD	80	%
Número de ciclos anuais	ciclos	424	-
Coeficiente de perdas	C _{perdas}	7	%
Eficiência do Sistema	η _{Sys}	90	%

Nesta análise estimou-se que a degradação da bateria teria um valor médio de perda de 4% da capacidade restante a cada ano. Tem ainda uma diferença na degradação de cerca de 77%. Os valores calculados são apresentados na Tabela 23:

Tabela 23 - Valores de saída de energia no *Método B*

Cap. Restante 548 ciclos	Cap. Restante 424 ciclos	Anos	Energia de Saída no Verão	Energia de Saída no Inverno	Unidade
100%	100%	2021	534,3	1068,6	kWh
94,9%	96,0%	2022	513,3	1026,6	kWh
91,1%	93,1%	2023	497,7	995,5	kWh
88,3%	90,9%	2024	485,9	971,9	kWh
85,8%	89,0%	2025	475,8	951,6	kWh
83,5%	87,2%	2026	466,3	932,6	kWh
80,8%	85,1%	2027	454,9	909,9	kWh
78,0%	83,0%	2028	443,5	887,1	kWh
74,7%	80,4%	2029	429,9	859,8	kWh
70,9%	77,5%	2030	414,2	828,4	kWh
67,1%	74,5%	2031	398,3	796,6	kWh
63,1%	71,4%	2032	381,7	763,5	kWh
61,6%	70,2%	2033	375,5	751,1	kWh
60,1%	69,1%	2034	369,3	738,7	kWh
58,6%	67,9%	2035	363,1	726,3	kWh

A energia de saída no inverno foi calculada de forma semelhante à de entrada no inverno:

$$\text{Saída energia} = [(798 \times \text{DoD}) \times \% \text{capacidade restante} \times 0,9 \times (1 - 0,07)] \times 2 \text{ (kWh)}$$

4.5.3.3 Cálculo dos custos em energia e dos ganhos em energia

Este subcapítulo, com os valores calculados de entrada e saída de energia do Método B, tem como objetivo a determinação do proveito que se pode estimar no fim do projeto. Os cálculos irão dividir-se em 4 componentes: Compra anual de energia; Venda anual de energia; Lucro anual em horas de ponta e benefícios totais anuais.

4.5.3.3.1 Compra anual de energia

O método utilizado para calcular os gastos estimados é expresso pela seguinte fórmula:

$$\text{Entrada energia (kWh)} \times \text{tarifa horária} \times n^{\circ} \text{ de dias (€)}$$

- O valor de entrada de energia é proveniente do subcapítulo anterior e divide-se entre verão e inverno;
- O valor de tarifa horária é proveniente da Figura 32, e é dependente de:
 - Período - verão ou inverno;
 - Dia da semana ou Sábado;
 - Horas de compra – super vazio, vazio ou cheia.
- O número de dias varia consoante:
 - Período - verão ou inverno;
 - Dia da semana ou Sábado.

Com este método obtemos a Tabela 24:

Tabela 24 - Valores de compra estimados no Método B

Anos	Dias de Verão			Dias de Inverno			Compra anual
	Entrada de Energia no Verão	Semana €	Sábados €	Entrada de Energia no Inverno	Semana €	Sábados €	
2021	670,3 kWh	6686,4	1337,2	1340,6 kWh	7220	9586	24830 €
2022	643,9 kWh	6423,6	1284,7	1287,9 kWh	6936	9209	23854 €
2023	624,4 kWh	6228,5	1245,7	1248,8 kWh	6725	8930	23130 €
2024	609,6 kWh	6081,1	1216,2	1219,2 kWh	6566	8718	22582 €
2025	596,9 kWh	5954,4	1190,8	1193,8 kWh	6429	8537	22112 €
2026	585,0 kWh	5835,4	1167,0	1170,0 kWh	6301	8366	21670 €
2027	570,7 kWh	5693,1	1138,6	1141,4 kWh	6147	8162	21141 €
2028	556,4 kWh	5550,8	1110,1	1112,9 kWh	5994	7958	20613 €
2029	539,3 kWh	5380,1	1076,0	1078,7 kWh	5809	7713	19979 €
2030	519,6 kWh	5183,5	1036,7	1039,3 kWh	5597	7431	19249 €
2031	499,6 kWh	4984,3	996,8	999,3 kWh	5382	7146	18509 €
2032	478,9 kWh	4777,4	955,4	957,8 kWh	5158	6849	17741 €
2033	471,1 kWh	4699,8	939,9	942,3 kWh	5075	6738	17453 €
2034	463,3 kWh	4622,2	924,4	926,7 kWh	4991	6627	17165 €
2035	455,6 kWh	4544,6	908,9	911,2 kWh	4907	6515	16876 €

4.5.3.3.2 Venda anual de energia

O método utilizado para calcular os ganhos energéticos estimados é expresso pela seguinte fórmula:

$$\text{Saída energia (kWh)} \times \text{tarifa horária} \times \text{n}^\circ \text{ de dias } (\text{€})$$

- O valor de entrada de energia é proveniente do subcapítulo anterior e divide-se entre verão e inverno;
- O valor de tarifa horária é proveniente da Figura 32, e é dependente de:
 - Período - verão ou inverno;
 - Dia da semana ou Sábado;
 - Horas de venda – ponta e cheia.
- O número de dias varia consoante:
 - Período - verão ou inverno;
 - Dia da semana ou Sábado.

Com este método obtemos a Tabela 25:

Tabela 25 - Valores de venda estimados no Método B

Anos	Dias de Verão			Dias de Inverno			Venda anual
	Saída de Energia no Verão	Semana €	Sábados €	Saída de Energia no Inverno	Semana €	Sábados €	
2021	534,34 kWh	10668,11	1687,98	1068,68 kWh	14399	2244	28999 €
2022	513,34 kWh	10248,80	1621,64	1026,68 kWh	13833	2156	27860 €
2023	497,75 kWh	9937,62	1572,40	995,50 kWh	13413	2090	27014 €
2024	485,97 kWh	9702,38	1535,18	971,94 kWh	13096	2041	26374 €
2025	475,84 kWh	9500,15	1503,18	951,68 kWh	12823	1998	25824 €
2026	466,33 kWh	9310,30	1473,14	932,66 kWh	12566	1958	25308 €
2027	454,96 kWh	9083,32	1437,22	909,92 kWh	12260	1910	24691 €
2028	443,59 kWh	8856,33	1401,31	887,19 kWh	11954	1863	24074 €
2029	429,95 kWh	8583,94	1358,21	859,90 kWh	11586	1805	23334 €
2030	414,24 kWh	8270,28	1308,58	828,48 kWh	11163	1739	22481 €
2031	398,32 kWh	7952,50	1258,30	796,64 kWh	10734	1672	21617 €
2032	381,78 kWh	7622,33	1206,06	763,57 kWh	10288	1603	20720 €
2033	375,58 kWh	7498,52	1186,47	751,17 kWh	10121	1577	20383 €
2034	369,38 kWh	7374,70	1166,88	738,76 kWh	9954	1551	20047 €
2035	363,18 kWh	7250,89	1147,29	726,36 kWh	9787	1525	19710 €

4.5.3.3 Proveitos da potência em horas de ponta (hp)

Para além dos ganhos proveniente da simples venda da energia, as horas de ponta também geram proveitos. Este lucro é calculado por duas fórmulas: Potência em hp e Lucro em hp. O método utilizado para calcular a potência em horas de ponta é expresso pela seguinte fórmula:

$$\text{Potência em hp} = \frac{\text{Saída de energia (kWh)}}{\text{Nº de horas de ponta no dia}} \quad (\text{kW})$$

- O valor de saída de energia é proveniente do subcapítulo anterior e divide-se entre verão e inverno;
- O número de horas de ponta no dia varia consoante o período:
 - verão – 3h
 - ou inverno – 5h.

O método utilizado para calcular o lucro em horas de ponta é expresso pela seguinte fórmula:

$$\text{Lucro em hp} = \text{Potência em hp (kW)} \times \text{tarifa potência em hp} \times \text{nº dias} \quad (\text{€})$$

- O valor de potência em hp é proveniente do cálculo anterior e divide-se entre verão e inverno;
- A tarifa de potência em hp é proveniente da Figura 32 com o valor de 0,3217 €/kW-dia.
- O número de dias varia consoante o período de verão ou inverno.

Com este método obtemos a Tabela 26.

Tabela 26 - Valores de venda estimados no Método B

Anos	Venda anual	Potência em hp (kW)		Valor em hp (€)		Proveito em hp
		Verão	Inverno	Verão	Inverno	
2021	28999,96	178,11 kW	213,74 kW	8594,87 €	7013,42 €	15608 €
2022	27860,11	171,11 kW	205,34 kW	8257,05 €	6737,75 €	14994 €
2023	27014,20	165,92 kW	199,10 kW	8006,34 €	6533,18 €	14539 €
2024	26374,72	161,99 kW	194,39 kW	7816,82 €	6378,52 €	14195 €
2025	25824,99	158,61 kW	190,34 kW	7653,89 €	6245,57 €	13899 €
2026	25308,92	155,44 kW	186,53 kW	7500,94 €	6120,77 €	13621 €
2027	24691,88	151,65 kW	181,98 kW	7318,06 €	5971,54 €	13289 €
2028	24074,83	147,86 kW	177,44 kW	7135,19 €	5822,31 €	12957 €
2029	23334,38	143,32 kW	171,98 kW	6915,73 €	5643,24 €	12558 €
2030	22481,74	138,08 kW	165,70 kW	6663,03 €	5437,04 €	12100 €
2031	21617,88	132,77 kW	159,33 kW	6407,01 €	5228,12 €	11635 €
2032	20720,36	127,26 kW	152,71 kW	6141,00 €	5011,06 €	11152 €
2033	20383,80	125,19 kW	150,23 kW	6041,25 €	4929,66 €	10970 €
2034	20047,23	123,13 kW	147,75 kW	5941,50 €	4848,27 €	10789 €
2035	19710,66	121,06 kW	145,27 kW	5841,75 €	4766,87 €	10608 €

4.5.3.4 Benefícios anuais totais do Método B

Os benefícios totais estimados neste análise são obtidos através da seguinte fórmula:

$$\text{Benefícios anuais totais} = (-\text{Compra anual}) + \text{Venda anual} + \text{Lucro em hp} \quad (\text{€})$$

Com este método obtemos a Tabela 27:

Tabela 27 - Benefícios anuais totais no Método B

Anos	Compra anual (€)	Venda anual (€)	Lucro em hp (€)	Benefícios
2021	24830,66 €	28999,96 €	15608,29 €	19777 €
2022	23854,69 €	27860,11 €	14994,80 €	19000 €
2023	23130,40 €	27014,20 €	14539,52 €	18423 €
2024	22582,85 €	26374,72 €	14195,34 €	17987 €
2025	22112,16 €	25824,99 €	13899,46 €	17612 €
2026	21670,28 €	25308,92 €	13621,71 €	17260 €
202	21141,95 €	24691,88 €	13289,60 €	16839 €
2028	20613,62 €	24074,83 €	12957,50 €	16418 €
2029	19979,62 €	23334,38 €	12558,97 €	15913 €
2030	19249,56 €	22481,74 €	12100,07 €	15332 €
2031	18509,90 €	21617,88 €	11635,12 €	14743 €
2032	17741,42 €	20720,36 €	11152,06 €	14131 €
2033	17453,24 €	20383,80 €	10970,92 €	13901 €
2034	17165,06 €	20047,23 €	10789,77 €	13671 €
2035	16876,88 €	19710,66 €	10608,62 €	13442 €

4.5.3.5 Benefícios anuais totais do Método C

A utilização de energia renovável faz com que a compra anual seja 70% do valor usado sem energia renovável. Isto faz aumentar os benefícios totais anuais. Com o novo valor, e através da mesma fórmula, temos os valores da Tabela 28:

Tabela 28 - Benefícios anuais totais no Método C

Anos	Compra anual €	Venda anual €	Proveito em hp €	Benefícios
2021	17381,4 €	28999,9 €	15608,2 €	27226 €
2022	16698,2 €	27860,1 €	14994,8 €	26156 €
2023	16191,2 €	27014,2 €	14539,5 €	25362 €
2024	15808,0 €	26374,7 €	14195,3 €	24762 €
2025	15478,5 €	25824,9 €	13899,4 €	24245 €
2026	15169,2 €	25308,9 €	13621,7 €	23761 €
202	14799,3 €	24691,8 €	13289,6 €	23182 €
2028	14429,5 €	24074,8 €	12957,5 €	22602 €
2029	13985,7 €	23334,3 €	12558,9 €	21907 €
2030	13474,6 €	22481,7 €	12100,0 €	21107 €
2031	12956,9 €	21617,8 €	11635,1 €	20296 €
2032	12418,9 €	20720,3 €	11152,0 €	19453 €
2033	12217,2 €	20383,8 €	10970,9 €	19137 €
2034	12015,5 €	20047,2 €	10789,7 €	18821 €
2035	11813,8 €	19710,6 €	10608,6 €	18505 €

4.6 Optimização ambiental de sistema

4.6.1 Avaliação das baterias em fim de vida

A tecnologia de armazenamento de energia mais usada é implementada em EVs e ESSs, nomeadamente baterias de íões de lítio, classificadas como resíduos perigosos ao atingir o fim da vida. A gestão de baterias após a sua vida útil apresenta desafios únicos para muitas partes interessadas na cadeia de valor da indústria. Com implantações planeadas numa escala de gigawatt-hora de sistemas BESS, a indústria deve abordar uma estratégia para gerir a extensa frota de baterias que estão em implantação agora e vão precisar de ser geridas com responsabilidade ao atingir o fim da vida [88].

Onde for economicamente viável, reutilizar sistemas de bateria e outros componentes é ambientalmente mais correto do que reciclar materiais constituintes. Como as baterias se degradam com o tempo, elas podem ser menos úteis para a finalidade original, mas ainda valiosas para outras aplicações. Por exemplo, sistemas de energia de reserva ou baterias conectadas com energias renováveis para alimentar sistemas de irrigação remota podem não precisar das mesmas características de desempenho dos sistemas de rede comercial. Estas aplicações de *segunda vida* ou *second life* podem substituir os sistemas de armazenamento de energia de bateria recém-fabricados e, em alguns casos, expandir o papel do armazenamento de energia estacionário. Quando novos sistemas podem ser proibitivamente caros, um sistema recondicionado de custo mais baixo pode atender aos requisitos de desempenho desejados [89].

Vários termos e definições são usados para descrever o processo de uso de baterias gastas em novas e diferentes aplicações. Temos como exemplos os termos *reutilização* e *second life* usados para esse fim. Estes termos podem ter significados diferentes, embora descrevam o mesmo objetivo, que é estender a vida útil de um produto ou de seus componentes para reduzir ou eliminar o desperdício [90].

O termo *reutilização* significa que um produto ou seus componentes são diagnosticados, reparados, restaurados, substituídos, reconstruídos ou remanufaturados com componentes originais novos ou usados, resultando em produtos ou componentes que são usados novamente para o mesmo propósito, aplicativo, função ou contexto. No caso de um EV, significa que a bateria ou seus componentes são usados novamente num EV [90].

O termo *second life* significa reaproveitar um produto ou alguns componentes usados para uma finalidade, aplicação, função ou contexto diferente. A segunda utilização também significa que a responsabilidade legal recai sobre o novo produtor. Da mesma forma, usar uma bateria EV ou seus componentes em um sistema de armazenamento de energia estacionário seria considerado um segundo uso [90].

4.6.2 Atualidade

De momento, no que toca a reaproveitamento de baterias para *second life*, as baterias dos EVs são as mais utilizadas. A reutilização destas baterias pode fornecer o máximo de valor em mercados onde há demanda por baterias para aplicações em sistemas de armazenamento de energia estacionária que requerem ciclos de bateria menos frequentes. Uma vez que está em análise a utilização das baterias em *second life* provenientes dos veículos elétricos, poderá também existir a possibilidade da reutilização das baterias de outros sistemas, dependendo das características que estas baterias apresentam.

Um dos projetos existentes em Portugal é nos apresentado pela EDP. A EDP construiu uma bateria a partir de módulos de carros usados. O conjunto dos módulos, sistema de gestão da bateria e inversor, estão a ser comparados em termos de performance e degradação com uma bateria *standard*. No futuro, estas baterias poderão ser usadas em algumas aplicações idênticas às atuais baterias novas. Além disso, esta tecnologia permite ter baterias a menor custo, assim como reduzir o desperdício, uma vez que aumenta o ciclo de vida das baterias.

A economia de custos deve ser significativa o suficiente e o desempenho das baterias em *second life* alto o suficiente para tornar a recondição atraente em comparação com as baterias novas. O custo com desconto de baterias recondição em relação às novas deve compensar o aumento dos custos de integração e o desempenho reduzido em relação às novas para o desenvolvimento de um mercado robusto de baterias de segunda utilização. À medida que os custos das baterias novas continuam em queda, pode ficar mais difícil convencer os fabricantes e utilizadores a recondição e usar as antigas. Projetar para reutilização no início poderia reduzir a reforma custa substancialmente e aumenta a viabilidade comercial deste caminho [89].

Com o objetivo de baixar custos em investimento, o relatório *Energy Storage for EV Charging* da *Guidehouse Insights*, sugeriu soluções como a utilização de baterias em *second life* que poderiam preencher a lacuna para fornecer opções mais sustentáveis no mercado [87]. As soluções de bateria *second life* estão a ser testadas e implementadas por várias empresas em vários países, incluindo um sistema de armazenamento de energia usando baterias *Renault* na Bélgica para a empresa multinacional de tecnologia de materiais *Umicore*. No Reino Unido, um sistema de armazenamento de bateria de segunda vida deve ser fornecido pela *Connected Energy* para uma autoridade local para ajudar a criar um sistema de baixo carbono que incluiria energia solar fotovoltaica e carregamento de veículos elétricos [87].

4.6.3 Tendências Globais

No que toca a tendências na Europa, a *second life*, especialmente no nível da célula da bateria, é incomum devido ao alto esforço e custos de mão de obra para reaproveitamento. Os sistemas de armazenamento de *second life* são quase todos baseados em baterias de íões de lítio, principalmente utilizando baterias gastas da Nissan, Renault ou Volkswagen. A maioria dos sistemas de armazenamento em pesquisa são desenvolvidos para aplicações BTM, mais comumente para aumentar o autoconsumo [90].

Na América do Norte e Austrália, as opções de utilização de baterias em *second life*, neste caso de baterias provenientes de EVs, passam principalmente pelo uso em sistemas de armazenamento estacionário de energia, uso para aplicações domésticas comerciais, aplicações de sistema de armazenamento de pesquisa e aplicações industriais [90].

A *second life* de baterias EV na Ásia é dominado pela China, Coreia do Sul e Japão. As áreas de aplicação vão desde aplicações de consumo privado, a aplicações industriais apoiadas por atividades de pesquisa em sistemas de armazenamento em *second life*.

Infelizmente, há poucas informações disponíveis sobre as atividades em andamento, especialmente na China, embora eles sejam o maior fabricante e consumidor de baterias do mundo. A gama de aplicações é enorme em comparação com outros países. [90]

Todas estas aplicações usadas com baterias em segunda vida vindas de EVs, poderiam servir de base para uma possibilidade e *second life* das baterias vindas de sistemas de armazenamento estacionário.

ANÁLISE DE RESULTADOS

- 5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA OPTIMIZAÇÃO TÉCNICA E AMBIENTAL
- 5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA OPTMIZAÇÃO ECONÓMICA
- 5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA OPTIMIZAÇÃO AMBIENTAL

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo analisaram-se os resultados obtidos em todas as vertentes.

5.1 Análise dos resultados da optimização técnica

Como apresentado no capítulo anteriormente, a optimização deste tipo de sistemas é uma possibilidade a nível técnico, pelo menos em termos teóricos. Da passagem da possibilidade para a realidade dependem diversos fatores, entre eles a componente económica.

5.2 Análise dos resultados da optimização económica

Usando todos os dados e cálculos apresentados anteriormente, uma análise estimativa da viabilidade financeira do projeto foi feita. A análise de custo-benefício feita para o *Método B*, em ambos os anos, demonstrou que o investimento não terá viabilidade, apesar dos menores custos de investimento no ano de 2025. Ambos os VALs são negativos e os TIRs são inferiores à taxa de desconto utilizada. Em ambos os anos considerou-se a amortização de capital a 20 anos. Os resultados em termos das métricas introduzidas são mostrados na Tabela 29 e na Tabela 30.

Estes resultados mostram-nos que, com estes pressupostos, o investimento do projeto tipo analisado não tem viabilidade financeira. A possibilidade de alteração de alguns pressupostos, como o investimento inicial, custos de operação e manutenção e os custos de reciclagem, apesar de algum impacto nos valores finais, não iriam tornar viável este investimento. Concluimos também que a degradação da bateria ao longo do tempo tem um grande impacto no lucro deste sistema. Com o passar dos anos, o proveito vai diminuindo significativamente, como vimos entre o ano 2021 e 2025. Entre estes anos o proveito diminui cerca de 10%.

Noutros países, como EUA, Japão e Alemanha, que oferecem subsídios para a instalação deste tipo de sistemas, podem os mesmos sistemas tornar-se viáveis. Este tipo de subsídio poderá fazer toda a diferença e tornar um investimento à partida sem viabilidade, num investimento viável [39].

Tabela 29 - Resultados económicos do *Método B* no ano 2020

Parâmetros	Abreviatura	Valor	Unidade
Investimento inicial	C _{cap}	271 320	€
Custo total de O&M	C _{O&M}	89 795	€
Benefícios Totais	B _A	244 455	€
Valor presente líquido	VAL	-138 146	€
Taxa interna de retorno	TIR	-4,76	%
Período de retorno	PR	-	anos

Tabela 30 - Resultados económicos do *Método B* no ano 2025

Parâmetros	Abreviatura	Valor	Unidade
Investimento inicial	C _{cap}	183 141	€
Custo total de O&M	C _{O&M}	89 795	€
Benefícios Totais	B _A	244 455	€
Valor presente líquido	VAL	-49 967	€
Taxa interna de retorno	TIR	0,27	%
Período de retorno	PR	14	anos

Outra possibilidade para este tipo de sistema, e como já referido anteriormente, poderia equacionar-se a introdução de energia proveniente de fontes renováveis, e analisar que tipos de efeitos teríamos. Com esta diferença nos valores de benefícios, e com os mesmos custos de investimento de capital e custos de operação e manutenção usados em 2025, os novos resultados são apresentados na Tabela 31:

Tabela 31 - Resultados económicos do *Método C* no ano 2025

Parâmetros	Abreviatura	Valor	Unidade
Investimento inicial	C _{cap}	183 141	€
Custo total de O&M	C _{O&M}	89 795	€
Benefícios Totais	B _A	366 529	€
Valor presente líquido	VAL	22 676	€
Taxa interna de retorno	TIR	6,91	%
Período de retorno	PR	9	anos

A análise de custo-benefício feita nesta possibilidade demonstrou que o investimento terá viabilidade, com a utilização da energia renovável para carregar as baterias, no ano de 2025. Temos um valor de VAL positivo e o valor de TIR é superior ao da taxa de desconto utilizada, com a mesma amortização de capital a 20 anos. Isto vem demonstrar, para além das vantagens ambientais, as vantagens económicas da utilização de energia renovável, em sistemas de armazenamento de energia.

Esta análise poderia ter diferentes resultados caso o objetivo e os serviços utilizados fossem diferentes. Empresas como hospitais ou centros de comando com unidades de UPS poder-lhes-ia ser vantajoso a integração deste tipo de sistemas. Para além de servir de UPS poderia crescer serviços como os apresentados.

5.3 Análise dos resultados da optimização ambiental

Quando finalizado o período de vida do projeto, sendo no caso em estudo após 15 anos de funcionamento, as baterias que estiveram em funcionamento serão enviadas para reciclagem. Esta reciclagem implica um custo algo relevante que neste momento não pode ser evitado, uma vez que não há alternativa conhecida que não esta. Mas e se questionarmos que, em vez de seguir para a reciclagem, fosse reutilizada para outras funções. Se essa possibilidade existisse poderia ser algo com vantagens para a empresa dona do sistema. Para além do impacto positivo na vertente ambiental, a vertente económica também é muito relevante, uma vez que, para além de evitar os custos necessários na reciclagem das baterias, pode ainda resultar em algum proveito na venda destas. No que toca a reutilizar as baterias provenientes dos serviços de armazenamento, de momento, não existem alternativas para implementar no mercado. Algumas propostas para a reutilização destas baterias podem passar por:

- Na eventualidade de existirem CER em funcionamento, dependendo das necessidades de armazenamento, estas baterias podem ser vendidas e utilizadas por esta CER;
- Venda das baterias a *prosumers*, podendo estas servir de armazenamento de excedente de energia proveniente de sistemas PV;
- Venda das baterias para sistemas de *EV charging coupled storage*;

CONCLUSÕES

6.1 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

6 CONCLUSÕES

No capítulo Conclusões, discutem-se os resultados obtidos e propõem-se novos trabalhos que poderão acrescentar algo a este estudo.

Ao analisar as possibilidades técnicas existentes no mercado, concluímos que múltiplas opções poderiam otimizar o sistema usado por base. Na vertente económica a análise de custo-benefício feita para o *Método B* demonstrou que, em ambos os anos, o investimento não teria viabilidade, apesar dos menores custos de investimento no ano de 2025. Concluiu-se também que a degradação da bateria ao longo do tempo tem um grande impacto no lucro deste sistema. Com o passar dos anos, o proveito foi diminuindo significativamente. No método C, a possibilidade de utilização de energia renovável no carregamento das baterias, reduziu os custos na compra de energia. A análise de custo-benefício feita nesta possibilidade demonstrou que o investimento teria viabilidade. Este estudo veio revelar que, para além das vantagens ambientais, existem também vantagens económicas da utilização de energia renovável em sistemas de armazenamento de energia. Na vertente ambiental é demonstrado que reutilizar sistemas de bateria e outros componentes é ambientalmente mais correto do que reciclar materiais constituintes. Como as baterias se degradam com o tempo de utilização, elas podem ser menos úteis para a finalidade primária, mas ainda valiosas para outras aplicações secundárias. Destas destacam-se utilização de *second life* onde podem substituir os sistemas de armazenamento de energia de bateria recém-fabricados. Esta análise poderia ter diferentes resultados caso o objetivo e os serviços utilizados fossem diferentes. Empresas como hospitais ou centros de comando com unidades de *UPS* poder-lhes-ia ser vantajoso a integração deste tipo de sistemas. Para além de servir de *UPS* poderia crescer serviços como os apresentados.

Como vimos, a análise económica feita neste sistema apenas poderá tirar conclusões para sistemas semelhantes com o mesmo serviço fornecido. A alteração do país, tipo de sistema, objetivo de utilização do sistema por parte da empresa proprietária ou do tipo de serviços, poderia tornar este tipo de sistema que aqui se mostrou inviável economicamente, num viável. Temos como exemplos países como EUA, Japão e Alemanha, que oferecem subsídios para a instalação deste tipo de sistemas. Este tipo de subsídio poderá fazer toda a diferença. A validade deste estudo é também afetada pela constante variação dos preços das baterias. Com o aumento no investimento em baterias, quer para sistemas de armazenamento que para EVs, a rápida mudança nos valores de mercado destas podem tornar o mesmo sistema viável.

Em suma concluímos que a otimização deste sistema é possível em cada uma das vertentes, pelo menos na teoria.

6.1 Propostas de trabalhos futuros

Para trabalhos futuros do mesmo âmbito do que o estudo apresentado, existem algumas propostas a considerar. Como vimos, os ESSs são capazes de fornecer uma variedade de serviços diferentes. O valor desses serviços e se há ou não um valor monetário para eles depende fortemente do mercado e da aplicação onde o ESS é implantado. Poderia ser interessante estudar a aplicação de outro ou outros serviços a um sistema semelhante ao analisado como exemplo em empresas como hospitais ou centros de comando com unidades de *UPS*.

Para além deste, como abordado anteriormente, um dos benefícios mais importantes de um sistema de armazenamento de energia bem projetado e otimizado é a *oportunidade de acumulação de serviços*. Para avaliar o valor completo dos ESSs é necessário encontrar combinações de serviços que sejam tecnicamente compatíveis e também se complementem quanto aos possíveis benefícios. A compatibilidade econômica depende do mercado e precisa ser analisada cuidadosamente. Torna-se interessante o estudo da acumulação de serviços num sistema semelhante ao analisado, podendo neste caso serem usados os serviços de *peak shaving* e arbitragem.

Por fim, um estudo com foco nos mercados e as regulamentações de mercado relativos ao armazenamento de energia na Europa e em Portugal poderia ajudar a examinar o potencial de implantação destes sistemas. Determinar o porquê da inexistência de regulamentação no que toca ao armazenamento de energia em Portugal, ao contrário de alguns países da Europa, e de que maneira a existência dessa regulamentação implicaria na viabilidade económica deste tipo de sistemas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Energia — Agência Europeia do Ambiente.” <https://www.eea.europa.eu/pt/themes/energy/intro> (accessed Mar. 30, 2021).
- [2] “A energia na Europa | Energia do Futuro | PÚBLICO.” <https://www.publico.pt/2019/10/15/infografia/energia-europa-379> (accessed Mar. 31, 2021).
- [3] “Setor Energético – Portugal Energia.” <https://www.portugalenergia.pt/setor-energetico/> (accessed Mar. 31, 2021).
- [4] *Energia em Números 2020.* .
- [5] “Produção e consumo de energia | Relatório do Estado do Ambiente.” <https://rea.apambiente.pt/content/produção-e-consumo-de-energia?language=pt-pt> (accessed Mar. 31, 2021).
- [6] “APREN - Potência.” <https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/potencia> (accessed Mar. 31, 2021).
- [7] “APREN - Produção.” <https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/producao> (accessed Mar. 31, 2021).
- [8] “BALANÇO ENERGÉTICO,” 2019.
- [9] “Notícias - INEGI.” <http://www.inegi.pt/pt/noticias/uma-energia-renovada-para-o-setor-da-energia-eolica/> (accessed Mar. 31, 2021).
- [10] “De onde vem a energia que move o país | Energia do Futuro | PÚBLICO.” <https://www.publico.pt/2019/11/12/infografia/onde-vem-energia-move-pais-384> (accessed Mar. 31, 2021).
- [11] “2019 FATURA ENERGÉTICA PORTUGUESA.”
- [12] “APREN - Outros.” <https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/outros> (accessed Mar. 31, 2021).
- [13] “APA - Políticas > Alterações Climáticas > Ciência.” <https://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=81&sub2ref=122> (accessed Mar. 31, 2021).
- [14] “Alterações climáticas: o que já mudou e o que está para chegar | Crise Climática Agora | PÚBLICO.” <https://www.publico.pt/2019/09/16/infografia/alteracoes-climaticas-ja-mudou-chegar-341> (accessed Mar. 31, 2021).
- [15] “2020 was Earth’s 2nd-hottest year, just behind 2016 | National Oceanic and Atmospheric Administration.” <https://www.noaa.gov/news/2020-was-earth-s-2nd-hottest-year-just-behind-2016> (accessed Mar. 31, 2021).
- [16] “ipcc.” <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/SPM-Portuguese-version.pdf> (accessed Mar. 31, 2021).
- [17] “Climate at a Glance | National Centers for Environmental Information (NCEI).” https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series/globe/land_ocean/ann/5/1880-2021 (accessed Mar. 31, 2021).
- [18] “O que diz o Acordo de Paris? | Perguntas e Respostas | PÚBLICO.” <https://www.publico.pt/2017/05/31/mundo/perguntaserespostas/perguntas-e-respostas-sobre-o-acordo-de-paris-1774092> (accessed Mar. 31, 2021).

- [19] “ACORDO DE PARIS 2015 - 2020.” <https://www.portugal.gov.pt/download-ficheiros/ficheiro.aspx?v=%3D%3DBQAAAB%2BLCAAAAAAABAAzNLA0tgQAra2cKgUAAAA%3D> (accessed Mar. 31, 2021).
- [20] “‘Green Deal’: O Novo Pacto Ecológico Europeu – ECOXXI.” https://ecoxxi.abae.pt/our_news/green-deal/ (accessed Mar. 31, 2021).
- [21] “The European Green Deal.” <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1588580774040&uri=CELEX:52019DC0640> (accessed Mar. 31, 2021).
- [22] “Pacto Ecológico Europeu | Comissão Europeia.” https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pt (accessed Mar. 31, 2021).
- [23] “EU climate action and the European Green Deal | Ação climática.” https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action_pt (accessed Mar. 31, 2021).
- [24] “PLANO NACIONAL ENERGIA E CLIMA 2021-2030 (PNEC 2030).”
- [25] “RNC 2050.” <https://www.portugal.gov.pt/download-ficheiros/ficheiro.aspx?v=%3D%3DBAAAAB%2BLCAAAAAAABACzMDexAAAut9emBAAAA%3D%3D> (accessed Mar. 31, 2021).
- [26] “Transição Energética - Pedro Fonseca.” https://repositorio.ual.pt/bitstream/11144/2832/1/1.2_PedroFonseca_TransicaoEnergetica.pdf (accessed Mar. 31, 2021).
- [27] “Transição Energética | AGN - Associação Portuguesa de Empresas de Gás Natural.” <https://agnatural.pt/gases-renovaveis/transicao-energetica/> (accessed Mar. 31, 2021).
- [28] “BP energy outlook 2019.” <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf> (accessed Mar. 31, 2021).
- [29] M. T. Tolmasquim, “INTEGRAÇÃO DAS FONTES RENOVÁVEIS INTERMITENTES NA AMÉRICA LATINA: BRASIL, CHILE E URUGUAI Dirección de Análisis y Estrategias de Energía Vicepresidencia de Infraestructura,” 2017. Accessed: Apr. 01, 2021. [Online]. Available: <http://scioteca.caf.com>.
- [30] C. A. Gomes and R. Franco, “Produção descentralizada de energia eléctrica: A perspectiva do consumidor Decentralized energy generation: The consumer’s perspective.”
- [31] “Energia Lateral: Produção de Energia.” <https://energialateral.pt/producao-energia.html> (accessed Apr. 05, 2021).
- [32] “Sustentabilidade nº19.” <http://www.bcsdportugal.org/wp-content/uploads/2013/10/News-2009-06-19-Energia.pdf> (accessed Apr. 05, 2021).
- [33] “New Energy Outlook 2020,” 2020.
- [34] “Transição Energética e Sustentabilidade - Smart Cities.” <https://smart-cities.pt/opinio-entrevista/transicao-energetica-1512-sustentabilidade/> (accessed Mar. 31, 2021).
- [35] “O que são os sistemas de armazenamento de energia? - Shareenergy.” <https://shareenergy.com.br/o-que-e-sistema-de-armazenamento-de-energia/> (accessed Apr. 01, 2021).
- [36] “Armazenamento eficiente de energia - Iberdrola.” <https://www.iberdrola.com/meio-ambiente/armazenamento-eficiente-de-energia> (accessed Apr. 01, 2021).

- [37] P. Ferrão *et al.*, “Armazenamento de energia em Portugal.”
- [38] “Miranda, António Manuel, ‘Tecnologias de Armazenamento de Energia – Identificação do Potencial e Aplicações’, Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, FEUP, 2011.” <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/61594/1/000148817.pdf> (accessed Apr. 01, 2021).
- [39] N. S. Günter, “Techno-economic analysis of the deployment potential of energy storage for grid connected applications,” *SAE Tech. Pap.*, no. December, 2015, doi: 10.4271/2012-01-0349.
- [40] E. À Terra Eutro À Terra Eutro À Terra Eutro À Terra, “Revista Técnico-Científica | N°12 | Dezembro de 2013 <http://www.neutroaterra.blogspot.com>.” Accessed: Apr. 01, 2021. [Online]. Available: <http://www.neutroaterra.blogspot.com>.
- [41] “BNEF: Eólica, solar e baterias ficaram mais competitivas desde o 2º semestre de 2019 - Trinity Energia.” <https://www.trinityenergia.com.br/2020/05/05/bnef-eolica-solar-e-baterias-ficaram-mais-competitivas-desde-o-2o-semester-de-2019/> (accessed Apr. 01, 2021).
- [42] “Energy Storage Évora | edp.com.” <https://www.edp.com/pt-pt/inovacao/energy-storage-evora> (accessed May 12, 2021).
- [43] “Global Customer Reference – Microgrid, BESS and Distributed Generation Solutions - PDF.” <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107045A1405&LanguageCode=en&DocumentPartId=pdf&Action=Launch&DocumentRevisionId=J> (accessed May 05, 2021).
- [44] F. Montenegro, “OS PREÇOS DA ENERGIA ELÉTRICA NOS AÇORES SABIA QUE? SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA.”
- [45] E. Miguel Aires Martins, “‘Estudos de estabilidade dinâmica de redes eléctricas para determinar os efeitos das energias renováveis nos sistemas eléctricos insulares’. Redes Isoladas com Elevada Penetração de Energia Eólica utilizando Volantes de Inércia.”
- [46] “Graciosa - Leclanché.” <https://www.leclanche.com/etude-cas/graciosa/> (accessed May 12, 2021).
- [47] N. Miguel Couto Pereira, D. Victor Manuel Fernandes Mendes Doutor Mário Rui Melício da Conceição Júri, D. Luís Manuel dos Santos Redondo Vogais, and D. Victor Manuel Fernandes Mendes Doutor Hugo Miguel Inácio Pousinho, “INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA.”
- [48] Por, “TRABALHO DE GRADUAÇÃO Procedimento para seleção de motor e bateria para veículo eléctrico.”
- [49] D. Miguel and C. Ferreira, “Utilização de Baterias de Iões de Lítio em Sistemas de Armazenamento de Energia FLÁVIO JORGE DOS SANTOS LOPES Dezembro 2016 Resumo,” 2016.
- [50] “Vantagens e desvantagens da bateria de litio-ferro (LiFe ou LiFePO4) - STA Eletrônica.” <https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-de-litio/vantagens-e-desvantagens-da-bateria-de-litio-ferro-life-ou-lifepo4-> (accessed Apr. 05, 2021).
- [51] “COGEN.” <https://www.cogenportugal.com/eficiencia-energetica/> (accessed May 04, 2021).
- [52] J. Oliveira and D. A. Silva, “SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA EM SMART GRIDS.”
- [53] “Behind-The-Meter: What You Need to Know | EnergySage.” <https://news.energysage.com/behind-the-meter-overview/> (accessed May 05,

- 2021).
- [54] A. Eller, "COMMISSIONED BY IFC AND ESMAP."
- [55] "Energy Storage – Analysis - IEA." <https://www.iea.org/reports/energy-storage> (accessed May 05, 2021).
- [56] "Battery Energy storage systems (BESS): ancillary services and beyond," 2018.
- [57] "ENAT - Unidade de Produção para Autoconsumo (UPAC)." <https://www.enat.pt/autoconsumo> (accessed May 04, 2021).
- [58] "Behind the Meter: Battery Energy Storage Concepts, Requirements, and Applications - IEEE Smart Grid." <https://smartgrid.ieee.org/newsletters/september-2020/behind-the-meter-battery-energy-storage-concepts-requirements-and-applications> (accessed May 05, 2021).
- [59] O. Zinaman, T. Bowen, and A. Aznar, "A product of the USAID-NREL partnership AN OVERVIEW OF BEHIND-THE-METER SOLAR-PLUS-STORAGE PROGRAM DESIGN: WITH CONSIDERATIONS FOR INDIA," 2020. Accessed: May 05, 2021. [Online]. Available: www.nrel.gov/publications.
- [60] T. Nadu, "Solar Plus Energy - Energía Solar," 2020, [Online]. Available: <https://solarplusonline.com/>.
- [61] "Large-Scale Energy Storage – A Major Market Segment | Nexant." <https://www.nexant.com/resources/large-scale-energy-storage-major-market-segment> (accessed May 05, 2021).
- [62] "Battery Energy Storage Systems (BESS) - Worthwhile Investment? | Renewable Energy World." <https://www.renewableenergyworld.com/storage/battery-energy-storage-systems-bess-worthwhile-investment/#gref> (accessed May 13, 2021).
- [63] "Energy Storage Inverters: Utility Scale, Behind-the-Meter & Microgrid Applications." <https://www.dynapower.com/energy-storage-applications/> (accessed May 13, 2021).
- [64] "CNESA Global Energy Storage Market Analysis – 2020.Q1 (Summary) — China Energy Storage Alliance." <http://en.cnesa.org/latest-news/2020/5/28/cnesa-global-energy-storage-market-analysis-2020q1-summary> (accessed May 05, 2021).
- [65] "Behind-the-meter (BTM) Battery Market Trends | Forecast 2027." <https://www.transparencymarketresearch.com/behind-the-meter-btm-battery-market.html> (accessed May 13, 2021).
- [66] "Supercharged: Challenges and opportunities in global battery storage markets Brochure / report title goes here | Section title goes here."
- [67] "Sistemas de Armazenamento em Baterias," 2019, [Online]. Available: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nt-sistemas-de-armazenamento-em-baterias-aplicacoes-e-questoes-relevantes-para-o-planejamento>.
- [68] "Five Steps to Energy Storage; Innovation Insights Brief | | 2020," 2020. Accessed: May 13, 2021. [Online]. Available: www.worldenergy.org.
- [69] P. Nikolaidis and A. Poullikkas, "Journal of Power Technologies 97 (3) (2017) 220-245 A comparative review of electrical energy storage systems for better sustainability."
- [70] G. Miguel and L. Nobre, "Tecnologias de Armazenamento de Energia para Sistemas 100 % renováveis de Média Dimensão Engenharia Electrotécnica e Computadores," 2017.

- [71] D. De Mestrado, V. Nicolas, and S. Diaz, "UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ CAMPUS DE FOZ DO IGUAÇU PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PARA SUAUIZACÃO DA POTÊNCIA ATIVA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA."
- [72] E. Thorbergsson, V. Knap, M. Swierczynski, D. Stroe, and R. Teodorescu, "Primary frequency regulation with li-ion battery based energy storage system - Evaluation and comparison of different control strategies," *INTELEC, Int. Telecommun. Energy Conf.*, vol. 2013-October, no. June 2016, 2013.
- [73] "Advanced Energy Storage: What's the Value of Frequency Regulation? | Renewable Energy World." <https://www.renewableenergyworld.com/storage/advanced-energy-storage-whats-the-value-of-frequency-regulation/#gref> (accessed May 06, 2021).
- [74] "Black Starting With Batteries." <https://blog.burnsmcd.com/black-starting-with-batteries> (accessed May 06, 2021).
- [75] J. H. Ferreira and C. Tavares, "Desenvolvimento, Implementação E Simulação De Um Controlador Para Sistemas De Armazenamento De Energia Com Baterias," 2015.
- [76] "What Is Peak Shaving with Battery Storage?" <https://www.aeternaenergy.com/solar-battery-storage-blog/what-is-peak-shaving-with-battery-storage> (accessed May 07, 2021).
- [77] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, "Estrutura Tarifária Do Setor Elétrico Em 2021," 2021.
- [78] "SU ELETRICIDADE." <https://sueletricidade.pt/pt-pt/page/611/tarifas-media-tensao> (accessed May 06, 2021).
- [79] "Preços de Energia Eléctrica_2021.pdf." .
- [80] "Armazenamento de Energia Elétrica. Cenários para o Sistema Elétrico Português." https://run.unl.pt/bitstream/10362/7778/1/Abelho_2011.pdf (accessed May 07, 2021).
- [81] "Sustainability Evaluation of Energy Storage Technologies Report prepared by the Institute for Sustainable Futures for the Australian Council of Learned Academies Sustainability Evaluation of Energy Storage Technologies ii About the authors," 2017. Accessed: May 08, 2021. [Online]. Available: www.isf.uts.edu.au.
- [82] B. Zakeri and S. Syri, "Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 42, pp. 569–596, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.011.
- [83] D. Frankel, S. Kane, and C. Tryggestad, "The new rules of competition in energy storage," no. April, 2018.
- [84] E. Elgqvist and O. Van Geet, "Considerations for Implementing PV plus Storage Systems at Federal Buildings and Campuses," Accessed: Jul. 15, 2021. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/70679.pdf>.
- [85] "Comunidades de Energia Renovável em Portugal." <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energias-renovaveis-e-sustentabilidade/comunidades-de-energia/comunidades-de-energia-renovavel-em-portugal/> (accessed Jul. 15, 2021).
- [86] D. de Simone and L. Piegari, "Integration of stationary batteries for fast charge EV charging stations," *Energies*, vol. 12, no. 24, 2019, doi: 10.3390/en12244638.
- [87] "Guidehouse: Energy storage to support electric vehicle charging could reach 1,900MW by 2029 | Energy Storage News." <https://www.energy-storage.news/news/guidehouse-energy-storage-to-support-electric-vehicle->

- charging-could-reach (accessed Jul. 15, 2021).
- [88] “ESA Corporate Responsibility Initiative: Guidelines for End-of-Life and Recycling of Lithium Ion Battery Energy Storage Systems,” 2020.
- [89] “End-of-Life Management of Lithium-ion Energy Storage Systems,” 2020.
- [90] B. Faessler, “Stationary, second use battery energy storage systems and their applications: A research review,” *Energies*, vol. 14, no. 8, 2021, doi: 10.3390/en14082335.
- [91] L. Miguel Carvalho Lourenço, “Utilização de dispositivos de Armazenamento de Energia em Apoio ao Funcionamento de Redes Isoladas,” 2013.

ANEXOS

TECNOLOGIAS E APLICAÇÕES DOS ESS

ANÁLISE ECONÓMICA

ANEXOS

Tecnologias e aplicações dos ESS

	ELECTRICAL		MECHANICAL			ELECTROMECHANICAL			CHEMICAL	THERMAL
	Supercapacitors	SMES	PHS	CAES	Flywheels	Sodium Sulfur	Lithium Ion	Redox Flow	Hydrogen	Molten Salt
Maturity	Developing	Developing	Mature	Mature	Early commercialised	Commercialised	Commercialised	Early commercialised	Demonstration	Mature
Efficiency	90-95%	95-98%	75-85%	70-89%	93-95%	80-90%	85-95%	60-85%	35-55%	80-90%
Response Time	ms	<100 ms	sec-mins	mins	ms-secs	ms	ms-secs	ms	secs	mins
Lifetime, Years	20+	20+	40-60	20-40	15+	10-15	5-15	5-10	5-30 years	30 years
Charge time	s - hr	min - hr	hr - months	hr - months	s - min	s - hr	min - days	hr - months	hr - months	hr - months
Discharge time	ms - 60 min	ms - 8 s	1 - 24 hs+	1 - 24 hs+	ms - 15 min	s - hr	min - hr	s - hr	1 - 24 hs+	min - hr
Environmental impact	None	Moderate	Large	Large	Almost none	Moderate	Moderate	Moderate	Dependent of H2 production method	Moderate
Possible applications by technologies										
Power quality	✔	✔			✔	✔	✔	✎		
Energy arbitrage			✔	✔	✎	✔	✔	✔	✎	✔
RES integration		✔			✔	✔	✔	✔	✔	
Emergency back-up					✔	✔	✔	✔	✎	
Peak shaving			✔	✔		✔	✔	✎	✎	✎
Time shifting			✔	✔		✔	✔	✎	✎	✎
Load leveling			✔	✔		✔	✔	✎	✎	✎
Black start						✔	✔	✔	✎	✎
Seasonal storage			✎	✎					✎	✎
Spinning reserve		✎			✎	✔	✔	✎	✎	
Network expansion			✔	✎		✔	✔	✎	✎	✎
Network stabilisation	✎	✔			✎	✔	✔	✎		
Voltage regulation	✎	✎			✎	✔	✔	✔		
End-user services	✎	✎			✎	✔	✔	✎		

Sources: Interviews, Schmidt et al. (2019), Das et al. (2018)
 H2 = Hydrogen, RES = Renewable energy source, RE = Renewable energy, SMES = Superconducting magnetic energy storage, PHS = Pumped hydroelectric storage, CAES = Compressed-air energy storage
Note: The Council has reviewed available literature to build this table. In our review, technology specifications differ greatly based on the source.

- ✔ for proven
- ✎ for promising
- ✎ for possible

