



Modelos de previsão do tempo de vida de dispositivos de armazenamento de energia

RODRIGO VALENTE ROQUE

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Manutenção e Produção

Orientadores:

Doutor José Augusto da Silva Sobral
Doutora Maria Teresa Oliveira Moura e Silva

Júri:

Presidente: Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes

Vogais:

Doutor Daniel Augusto Estácio Marques Mendes Gaspar
Doutor José Augusto da Silva Sobral

dezembro de 2024

Modelos de previsão do tempo de vida de dispositivos de armazenamento de energia

RODRIGO VALENTE ROQUE

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Manutenção e Produção

Orientadores:

Doutor José Augusto da Silva Sobral, ISEL/IPL
Doutora Maria Teresa Oliveira Moura e Silva, ISEL/IPL

Júri:

Presidente: Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes, ISEL/IPL

Vogais:

Doutor Daniel Augusto Estácio Marques Mendes Gaspar,
ESTGV/IPV
Doutor José Augusto da Silva Sobral, ISEL/IPL

dezembro de 2024

Agradecimentos

Queria agradecer a todas as pessoas que de uma maneira ou outra, acompanharam a realização e término desta dissertação.

Primeiramente, ao Professor José Sobral e à Professora Teresa Moura e Silva, que revelaram ser sempre muito prestáveis a orientar-me ao longo da realização desta dissertação.

À Fundação para a Ciência e Tecnologia, que no âmbito da investigação feita para o projeto PTDC/QUI-ELT/2075/2020, permitiu a realização e desenvolvimento de trabalho desta dissertação.

Aos meus amigos que fiz durante o meu percurso académico, especialmente ao Ricardo, pelo grande amigo e braço direito que eu tive.

Por fim, mas mais importante, agradeço aos meus pais que sempre me apoiaram e nunca me falharam. Um obrigado não é suficiente.

Declaração de integridade

Declaro que esta dissertação é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor

Rodrigo Valent Roque

Lisboa, 4 de outubro de 2024

Modelos de previsão do tempo de vida de dispositivos de armazenamento de energia

Resumo

Os ensaios acelerados de vida são um método que visa simular as condições de uso e desgaste ao longo do tempo num curto período. Permitem que os fabricantes identifiquem potenciais problemas de desempenho, falhas ou degradação precoce no processo de desenvolvimento, o que leva a melhorias na qualidade e fiabilidade do produto.

A presente dissertação tem como principal objetivo a definição do tempo de vida de dispositivos de armazenamento de energia, recorrendo ao envelhecimento acelerado de protótipos de supercondensadores, através de ensaios acelerados de vida.

É feita uma introdução completa ao tema dos ensaios acelerados de vida e como estes se apresentam na área da fiabilidade e da estatística, e também a um tema cada vez mais emergente no panorama atual português e mundial, que são as energias renováveis e as tecnologias de armazenamento de energia.

Para verificar e implementar os conceitos apresentados, no caso de estudo foram realizados ensaios a protótipos de supercondensadores onde foram expostos a várias tensões superiores à de uso normal, visando acelerar a degradação dos mesmos, até se alcançar a falha. O objetivo da realização destes ensaios passou por prever o tempo de vida destes dispositivos em condições normais de utilização, através da extrapolação de dados a um nível de envelhecimento acelerado. Os dados relativos aos ensaios do caso de estudo foram obtidos através da realização de ensaios acelerados designados como *floating tests* e depois ajustados a um modelo de degradação adequado. De seguida foram analisados e tratados recorrendo a um *software* que permitiu obter dados acerca da vida destes componentes, prevendo assim o seu tempo de vida útil a um nível de utilização normal e validando assim a vertente teórica demonstrada no Capítulo 4.

Com base nos ensaios realizados e da análise feita aos dados, concluiu-se que existe uma redução gradual do tempo até à falha dos dispositivos, à medida que é imposta uma tensão crescente. Notou-se também que existe um intervalo de valores de tensão onde a degradação dos dispositivos evolui exponencialmente até alcançar a falha, indiciando assim um possível fenómeno de desgaste acelerado nessa gama de valores.

Palavras-chave: Transição Energética, Produção e Armazenamento de Energia, Envelhecimento Acelerado, Fiabilidade, Tempo médio de vida.

Lifetime prediction models for energy storage devices

Abstract

Accelerated life tests are a method that simulates user conditions and wear during time, in a short period of time. They allow manufacturers to identify potential performance issues, failures or early degradation in the development process, which lead to improvements in product quality and reliability.

The main objective of this dissertation is to define the lifetime of energy storing devices by accelerating the aging of supercapacitor prototypes, through accelerated life testing.

A complete introduction is made regarding accelerated life tests and how they present themselves in reliability and statistics, and to an increasingly emerging topic in the current national and global panorama, which are renewable energies and energy storage technologies.

To validate and implement the presented concepts, tests were conducted on supercapacitor prototypes. These prototypes were subjected to various voltages, exceeding normal operating levels, to accelerate their degradation and induce failure. The purpose of these tests was to predict the lifespan of the devices under normal operating conditions by extrapolating data obtained during the accelerated ageing. The experimental data collected in the case study was obtained by carrying out tests called floating test and then they were fitted to an appropriate degradation model and analysed using specialized software. This analysis yielded critical information about the lifespan of these devices, enabling the prediction of their useful life under normal operating conditions and validating the theoretical concepts presented in Chapter 4.

Based on the tests and on the data analysis, it was concluded that there is a gradual reduction in the time until failure of the devices, as increasing voltage is imposed. It was also noted that there is a range of voltage values where the degradation of the devices evolves exponentially until failure is reached, thus indicating a possible phenomenon of accelerated wear in that range of values.

Keywords: Energy Transition, Energy Production and Storage, Accelerated Aging, Reliability, Prototype, Mean Useful Life

Lista de Símbolos e Siglas

Siglas

ADT	<i>Accelerated Degradation Testing</i>
ALT	<i>Accelerated Life Testing</i>
DOE	<i>Design Of Experiments</i>
EDLC	<i>Electric Double Layer Capacitor</i>
ESS	<i>Energy Storage System</i>
fdp	Função Densidade de Probabilidade
FENR	Fonte de Energia Não Renovável
FER	Fonte de Energia Renovável
GEE	Gases com Efeito de Estufa
HALT	<i>Highly Accelerated Life Testing</i>
HAST	<i>Highly Accelerated Stress Testing</i>
IRES	<i>Integrated Renewable Energy System</i>
LIB	<i>Lithium – Ion Battery</i>
MLE	<i>Maximum Likelihood Estimation</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTTF	<i>Mean Time To Failure</i>
PIB	Produto Interno Bruto
TTF	<i>Time To Failure</i>

Símbolos

CO ₂	Dióxido de Carbono
kg	Quilograma
kJ	Kilojoule
Mt	Mega toneladas
Mtep	Mega Toneladas equivalentes de petróleo
V	Volt
W, kW, MW	Watt, kilowatt, Megawatt
Wh	Watt/hora

Índice

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos do trabalho	2
1.3. Estrutura do trabalho	2
Capítulo 2 – Panorama Energético.....	3
2.1. Enquadramento	3
2.2. Transição Energética: Vantagens e Desafios.....	8
2.3. Planos Europeus e Nacionais no contexto da Transição Energética.....	11
2.3.1. Acordo de Paris.....	11
2.3.2. Metas, objetivos e resultados até 2020 – Energias Renováveis e Eficiência Energética	12
2.3.3. Plano Nacional Energia – Clima 2030 (PNEC).....	13
2.3.4. Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050).....	14
2.3.5. Trajetórias para a Neutralidade Carbónica em 2050	16
Capítulo 3 – Produção e Armazenamento de Energia Elétrica	21
3.1. Sistemas de produção de energia.....	21
3.2. O Cenário Português	22
3.3. O Cenário Mundial.....	25
3.4. Tecnologias de Armazenamento de Energia.....	28
3.4.1. Armazenamento Mecânico.....	28
3.4.2. Armazenamento Eletromagnético	31
3.4.3. Armazenamento Químico.....	32
3.4.4. Armazenamento Térmico	33
3.4.5. Armazenamento Eletroquímico	34
3.4.6. Supercondensadores	40
3.5. Importância do armazenamento eletroquímico na Transição Energética	44
3.6. Supercondensadores em aplicações renováveis	46
Capítulo 4 – Ensaio Acelerados de Vida.....	53
4.1. Introdução.....	53
4.2. Identificação dos vários modelos de ensaios acelerados de vida.....	54
4.3. Identificação da degradação de bens baseados em modelos estatísticos.....	65
4.3.1. Análise dos Modelos de Degradação	66
4.3.2. Distribuição Normal	69
4.3.3. Distribuição LogNormal	71
4.3.4. Distribuição de Weibull.....	74
4.3.5. Distribuição Exponencial	80
4.4. Identificação de metodologias para previsão da vida de bens.....	84
4.5. Tipologia de Amostras	98

Capítulo 5 – Caso de Estudo.....	101
Capítulo 6 – Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros	115
6.1. Conclusões	115
6.2. Propostas de Trabalhos Futuros	116
Referências	117

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Evolução das emissões nacionais de gases com efeito de estufa 1990-2017 (APA, 2023).....	3
Figura 2.2 - Emissões setoriais de CO ₂ e, em Portugal, em 2020 (APA,2023).	5
Figura 2.3 – Evolução da intensidade carbónica da economia nacional. (Observatório da Energia, 2019).....	5
Figura 2.4 – Trajetória de redução de emissões de 85% a 90% até 2050 face a 2005 (Governo de Portugal, 2019).....	16
Figura 2.5 – Contribuição setorial para a trajetória de redução de emissões de GEE até 2050 (Governo de Portugal, 2019).	17
Figura 2.6 – Narrativa global de neutralidade carbónica até 2050, com destaque para o PNEC (DGEG, 2019).	19
Figura 3.1 – Ciclo do setor energético (Portugal Energia, 2024).....	21
Figura 3.2 – Evolução da dependência energética de Portugal (Observatório da Energia et al., 2024).....	23
Figura 3.3 – Dependência energética na UE-27 em 2022 (Observatório da Energia et al., 2024)	23
Figura 3.4 – Intensidade Energética da economia em energia primária na EU-27 em 2022 (Observatório da Energia et al., 2024).....	24
Figura 3.5 - Evolução da intensidade energética por setor de atividade (Observatório da Energia et al., 2024).	24
Figura 3.6 - Evolução da intensidade energética por setor de atividade (2022=100) (Observatório da Energia et al., 2024).....	25
Figura 3.7 - Contribuição de cada fonte de energia para a produção de energia mundial (Our World in Data, 2024).	26
Figura 3.8 - Países com maior produção de eletricidade <i>per capita</i> (Our World in Data, 2024).	27
Figura 3.9 – Contribuição das energias nuclear e renováveis ao longo dos anos (Our World in Data, 2024).	27
Figura 3.10 – Exemplo da barragem de Alqueva como hídrica de bombagem (Agência Lusa, 2024).....	29
Figura 3.11 – Funcionamento de uma central operada a ar comprimido (Energy Storage News, 2017).....	30
Figura 3.12 – Sistema de armazenamento de energia por volante de inércia (Journal of Energy Storage, 2020).	31

Figura 3.13 – Representação do sistema de armazenamento químico associado a energias renováveis (ADENE et al., 2021).....	33
Figura 3.14 – Classificação dos sistemas de armazenamento térmico com variação de temperatura (SINTEF, 2022).....	34
Figura 3.15 – Organização das tecnologias de armazenamento de energia por via eletroquímica (ADENE, 2021).	35
Figura 3.16 – Composição típica de uma bateria primária (TYCORUM, 2023).....	36
Figura 3.17 – Composição típica de uma bateria secundária (Geeks for Geeks, 2023).....	37
Figura 3.18 – Composição típica de uma célula de fluxo <i>redox</i> de vanádio (Thyssenkrupp, 2024).....	39
Figura 3.19 – Composição típica de uma célula de combustível (Olhar Digital, 2023).....	40
Figura 3.20 – Representação Esquemática de um: (a) EDLC, (b) Pseudo-Supercondensador, (c) Supercondensador Híbrido (Zhang, J. et al., 2023).	41
Figura 3.21 – Construção geral de um supercondensador (CAS Science Team, 2023).	42
Figura 3.22 - Estimativa mínima e máxima da procura de materiais (Li, Ni, Co, Mn, Cu, grafite) para 2020 e 2040 (Xu, C. et al., 2020).....	46
Figura 3.23 – Energias Renováveis e Aplicações dos Supercondensadores (Zhang, J. et al., 2023).....	47
Figura 3.24 - Gráfico de Ragoone para diferentes dispositivos de armazenamento de energia (P. Simon et al., 2008).....	47
Figura 3.25 – Esquema de uma proposta de regeneração de energia numa suspensão de um carro (Zhang, Z. T. et al., 2016).....	50
Figura 3.26 – Aplicações de supercondensadores em vários dispositivos portáteis (Nigam, R., et al. 2020).	51
Figura 4.1 – Níveis de <i>Stress</i> . Adaptado de: Reliasoft (2024).....	57
Figura 4.2 – Tipos de aplicação da carga em ALT (Pham, H., 2003).....	59
Figura 4.3 – Extrapolação da informação do nível de ensaio para nível de funcionamento normal (Reliasoft, 2024).	60
Figura 4.4 – Representação ilustrativa da fdp a um nível de ensaio e a um nível de uso normal (Reliasoft, 2024).....	61
Figura 4.5 – Representação ilustrativa da extrapolação dos dados de um nível para o outro (Reliasoft, 2024).	61
Figura 4.6 – Exemplo da relação linear e exponencial como modelos de extrapolação de dados (Reliasoft, 2024).	62
Figura 4.7 – Exemplo de uma distribuição de vida (esquerda) e Modelo Vida- <i>Stress</i> (direita) (Reliasoft, 2024).....	62

Figura 4.8 – Ilustração de uma fdp descrita em função do tempo e do <i>stress</i> (Reliasoft, 2024).	63
Figura 4.9 – Extrapolação incremental desde o nível de <i>stress</i> de ensaio e o nível pretendido (Reliasoft, 2024).	63
Figura 4.10 – Ilustração da extrapolação de valores através de uma característica de vida do modelo (Reliasoft, 2024).	64
Figura 4.11 – Exemplo de uma extrapolação das medições de degradação para um TTF (Reliasoft, 2024).	67
Figura 4.12 – Exemplo da relação entre o tempo e a distribuição da medida de degradação (Reliasoft, 2024).	68
Figura 4.13 – Esquemática da distribuição normal (Reliasoft, 2024).	70
Figura 4.14 - Efeito do desvio padrão na distribuição (Reliasoft, 2024).	71
Figura 4.15 - Representação gráfica da ocupação relativa a dois desvios padrão (Reliasoft, 2024).	71
Figura 4.16 – Efeitos dos parâmetros na curva (Reliasoft, 2024).	73
Figura 4.17 – Variação do parâmetro β na distribuição de Weibull (Luko, S., 1999).	75
Figura 4.18 - Ilustração das formas da curva para diferentes valores de β (Reliasoft, 2024).	76
Figura 4.19 - Variação do parâmetro β na função Fiabilidade (Reliasoft, 2024).	76
Figura 4.20 – Exemplo do efeito de β na taxa de falha (Reliasoft, 2024).	77
Figura 4.21 - Exemplo do efeito de η na taxa de falha (Reliasoft, 2024).	78
Figura 4.22 - Exemplo do efeito de γ na taxa de falha (Reliasoft, 2024).	79
Figura 4.23 – Representação típica da função exponencial biparamétrica (Kececioglu, B. D., 2002).	81
Figura 4.24 – Exemplo de uma função densidade de probabilidade com histograma sobreposto (Luko, S., 1999).	82
Figura 4.25 - Representação típica da função exponencial monoparamétrica (Kececioglu, B. D., 2002).	83
Figura 4.26 - Relação de Arrhenius para características de vida diferentes, assumindo uma distribuição de Weibull (Reliasoft, 2024).	85
Figura 4.27 - Efeito do parâmetro n na vida de um componente (Reliasoft, 2024).	88
Figura 4.28 - (a) Vida esboçada para temperatura relativa constante. (b) Vida esboçada para temperatura constante (Reliasoft, 2024).	89
Figura 4.29 – Variação do fator de aceleração com a temperatura e a humidade, respetivamente (Reliasoft, 2024).	91
Figura 4.30 – (a) Vida esboçada para tensão constante. (b) Vida esboçada para temperatura constante (Reliasoft, 2024).	92

Figura 4.31 - Variação do fator de aceleração com a temperatura e a tensão, respetivamente (Reliasoft, 2024).....	93
Figura 4.32 – Tipologia de amostras. Adaptado de: Reliasoft (2024).....	99
Figura 5.1 – (a) Vista esquemática do dispositivo assimétrico. (b) Imagem do protótipo à escala laboratorial	101
Figura 5.2 – Representação esquemática do “floating test”	102
Figura 5.3 – Montagem eletroquímica para obtenção dos dados experimentais	103
Figura 5.4 – Variação da capacidade para diferentes tensões utilizadas nos ensaios.....	103
Figura 5.5 – Representação gráfica da diminuição do tempo de vida com a variação da tensão	104
Figura 5.6 – Representação gráfica da diminuição do tempo de vida com a variação da tensão	105
Figura 5.7 – Evolução do fator de aceleração com a tensão	107
Figura 5.8 – Valor do fator de aceleração para um uso acelerado de 1.2V.....	107
Figura 5.9 – Vida média	107
Figura 5.10 – Valores de vida para uma missão de 10000 min	108
Figura 5.11 – Gráfico Função Densidade de Probabilidade.....	109
Figura 5.12 – Fiabilidade ao longo do tempo (0.75V)	110
Figura 5.13 – Probabilidade de Falha ao longo do tempo (0.75V)	110
Figura 5.14 – Evolução da probabilidade de falha para cada nível de tensão e para a tensão de uso normal	111
Figura 5.15 – Valores para o limite de confiança a 90%.....	111
Figura 5.16 – Limite de confiança 90% na vida média.....	112
Figura 5.17 – Limite de confiança 90% na fiabilidade.....	112

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Metas de Portugal em matéria de Energia e Clima. Adaptado de: João Bernardo, DGEG (2024)	14
Tabela 2.2 – Potencial de redução de emissões em relação a 2005. Adaptado de Governo de Portugal (2019).....	17
Tabela 2.3 - Diferentes planos de ação para redução de GEE. Adaptado de: APLANET. (2022, 18 de outubro).....	19
Tabela 3.1 – Contribuição de cada fonte de energia para a produção de eletricidade no mundo (1985 vs. 2022). Adaptado de: Our World in Data (2024).	26
Tabela 3.2 – Comparação entre tipos típicos de armazenamento de energia. Adaptado de: Zhang, J. et al. (2023).	48
Tabela 4.1 – Características de vida e parâmetros associadas a diferentes distribuições. Adaptado de: Reliasoft (2024).	65
Tabela 4.2 – Modelos de degradação Não – Destrutiva. Adaptado de: Reliasoft (2024).	67
Tabela 5.1 – Valores de ensaio de TTF para diferentes tensões.....	104
Tabela 5.2 - Valores de ensaio de TTF para a gama de voltagens superior	105
Tabela 5.3 – Parâmetros do modelo de degradação e da distribuição de vida	106
Tabela 5.4 – Valores de vida para uma missão de 10000 minutos	108

Capítulo 1 – Introdução

Este capítulo faz um enquadramento global da dissertação, apresenta o contexto e objetivos e explica a estrutura adotada.

1.1. Enquadramento

Os supercondensadores e as baterias conseguem armazenar e utilizar energia elétrica sempre que necessário. Apesar das baterias serem tecnologicamente bem desenvolvidas e serem utilizadas numa elevada gama de aplicações, apresentam algumas desvantagens. Assim, para reduzir estes problemas surgiram os supercondensadores como alternativa de armazenamento de energia elétrica. Os supercondensadores conseguem operar com correntes extremamente altas, apresentam excelente densidade de potência, ciclos de vida prolongados e tempos de carregamento rápidos. Deste modo, os supercondensadores preenchem o vazio entre dispositivos de armazenamento de energia elétrica como baterias e condensadores comuns (Fernandes, A., 2022).

Torna-se assim importante realizar ensaios de modo a garantir que estes dispositivos atendam às expectativas de desempenho e durabilidade exigidas pelo mercado. Os ensaios acelerados de vida são, portanto, uma ferramenta essencial no desenvolvimento destes supercondensadores. Ao permitir uma avaliação rápida e precisa dos produtos, este tipo de ensaios não só aceleram o seu tempo de desenvolvimento, como também asseguram a fiabilidade e segurança, contribuindo significativamente para o avanço desta tecnologia de armazenamento de energia.

O tema do armazenamento de energia surge aliado a um tema cada vez mais emergente no cenário mundial que é a transição energética. A transição energética, no contexto atual, representa um dos desafios mais urgentes e significativos para a sociedade global. Diante das crescentes preocupações ambientais, da busca por soluções sustentáveis e da necessidade de reduzir as emissões de gases, o mundo passa por uma transformação fundamental na sua matriz energética. Contudo, a transição energética enfrenta desafios significativos, incluindo a necessidade de uma infraestrutura adaptada, investimentos substanciais e superação de resistências políticas e económicas. Além disso, a transição deve ser inclusiva, considerando os impactos sociais e económicos nas comunidades que dependem da indústria de combustíveis fósseis.

1.2. Objetivos do trabalho

No contexto acima descrito, os objetivos da presente dissertação são os seguintes:

- Realizar uma revisão bibliográfica relativa ao tema da transição energética e à produção e armazenamento de energia existentes em Portugal e no mundo.
- Realizar um enquadramento e aplicabilidade da área da fiabilidade e dos ensaios acelerados de vida nomeadamente à tecnologia de armazenamento de energia emergente que são os supercondensadores.
- Obtenção, tratamento e análise de dados relativos ao tempo de vida de supercondensadores submetidos a um envelhecimento acelerado através de ensaios acelerados.
- Elaborar propostas de trabalhos futuros no contexto.

1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos.

No primeiro capítulo, a dissertação é contextualizada e introduzida. São apresentados os objetivos e a estrutura do documento. Nos capítulos 2 e 3 procede-se a uma revisão bibliográfica alusiva à transição energética, à produção e às tecnologias de armazenamento de energia. No quarto capítulo faz-se um enquadramento à realização de ensaios acelerados e ao seu vínculo com a área da fiabilidade. No capítulo 5 é apresentado e explicado o caso de estudo e demonstrados os seus resultados. Por fim, no capítulo 6 são indicadas as conclusões do trabalho realizado e propostas algumas atividades futuras, a realizar na área e no seguimento do seguinte trabalho.

Capítulo 2 – Panorama Energético

2.1. Enquadramento

Historicamente dependente de fontes de energia não renováveis, baseadas em combustíveis fósseis como o carvão, o petróleo e o gás natural, a sociedade contemporânea está cada vez mais consciente da urgência em adotar fontes mais limpas e renováveis. Efetivamente, a utilização continuada de combustíveis fósseis é já perceptível, de acordo com dados da Organização Meteorológica Mundial (WMO). A temperatura média global subiu cerca de 1,1°C desde a época pré-industrial e a década de 2011 a 2020 foi a mais quente desde o início dos registos. As camadas de gelo pelo mundo diminuíram em 33,5 metros, 76% desta perda ocorreu desde 1980 e os oceanos atingiram temperaturas recordes no início da década de 2020 (Comissão Europeia, 2021).

O inventário nacional de emissões de gases com efeito de estufa contabiliza todas as emissões e sequestro de origem humana, constituindo o instrumento que permite monitorizar e verificar o cumprimento nacional face às metas assumidas, sendo por isso um elemento-chave da política climática. O inventário é elaborado anualmente, sendo o último inventário (2022) relativo às emissões de 2020.

De acordo com a APA (2023), as emissões de GEE, sem contabilização das emissões dos setores LULUCF (*Land Use, Land Use Change and Forests*), são estimadas em cerca de 57,6 Mt CO₂e correspondendo a uma redução de 19,3% em relação a 1990 e uma diminuição de 10,6% face a 2019. A figura 2.1 ilustra a evolução das emissões nacionais entre 1990 e os dados mais recentes de 2020.

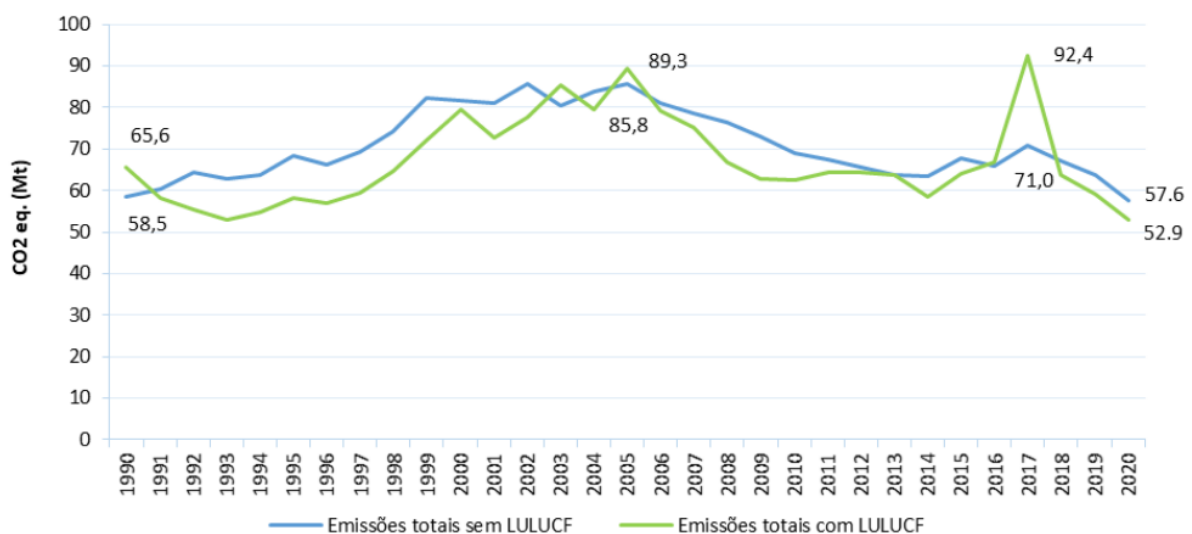


Figura 2.1 – Evolução das emissões nacionais de gases com efeito de estufa 1990-2017 (APA, 2023).

Segundo o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (Governo de Portugal, 2019), após um rápido crescimento das emissões de GEE (gases com efeito de estufa), durante a década de 90 do século passado, Portugal atingiu o seu pico de emissões nacionais (sem considerar o setor LULUCF) em 2005, altura a partir da qual estas registaram um decréscimo significativo e sustentado, resultado da trajetória de descarbonização da economia nacional consolidada desde então.

A evolução das emissões de GEE reflete, em grande escala, a evolução da economia portuguesa (APA, 2023):

- Forte crescimento económico na década de 90, associado ao aumento da procura de energia e da mobilidade.
- Redução das emissões a partir de 2005, fruto de melhores sistemas de controlo de poluição e eficiência energética (combustíveis menos poluentes, produção de energia a partir de fontes de energia renovável e medidas de gestão de resíduos).
- Aumento das emissões associadas ao consumo de energia primária e final em 2014 – 2017, com a retoma da economia no pós crise de 2008, e os anos de seca (2015 e 2017).
- Redução das emissões a partir de 2017 devido ao aumento de energias renováveis no consumo primário de energia, a redução no uso de carvão para produção de eletricidade e à desaceleração económica causada pela pandemia de COVID-19.

As emissões registadas em 2020 confirmam o cumprimento das metas nacionais e europeias de redução de emissões para 2020, representando as emissões totais uma redução de cerca de 33% face aos níveis de 2005.

Os principais setores da economia portuguesa responsáveis pelas emissões de GEE são (figura 2.2):

- Energia, incluindo transportes, residencial, serviços e produção de eletricidade, setor que é o principal responsável pelas emissões de GEE em Portugal. A produção de energia e os transportes são as fontes mais importantes representando em 2020 respetivamente cerca de 18,1% e 25,8% do total de emissões nacionais.
- Processos industriais e uso de produtos que contribui para 13% das emissões.
- Agricultura que contribui para 12% das emissões.
- Resíduos, incluindo águas residuais, que contribui 8% das emissões nacionais.

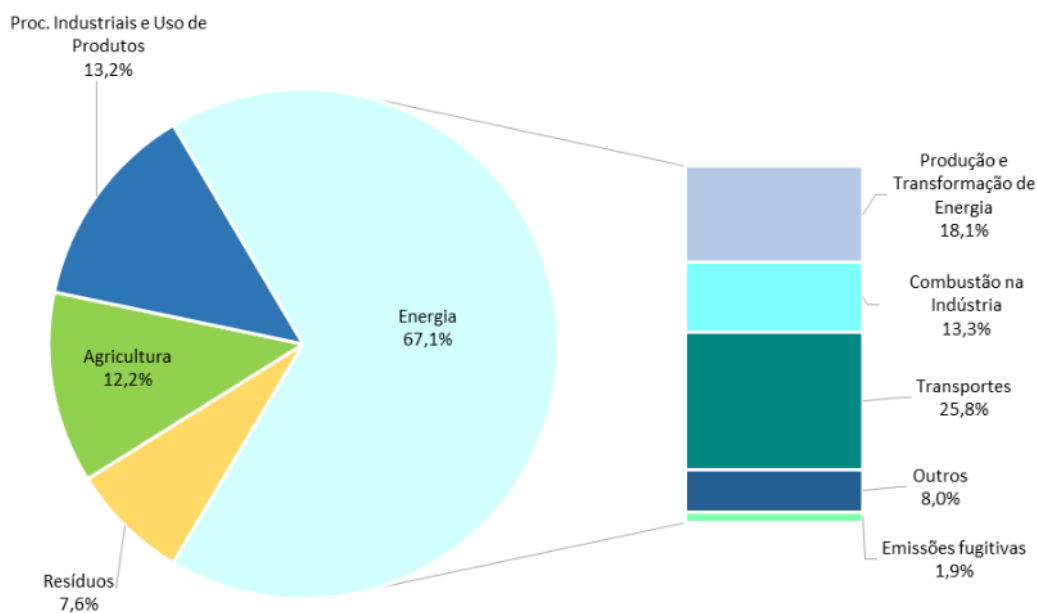


Figura 2.2 - Emissões setoriais de CO₂e, em Portugal, em 2020 (APA,2023).

O uso do solo, alteração do uso do solo e florestas, é um setor que se constitui como um sumidouro de carbono. A sua capacidade de sumidouro em 2020 foi de -46 Mt CO₂e (APA, 2023).

Uma análise das emissões de GEE por unidade de Produto Interno Bruto (PIB) permite verificar que em 2005 se iniciou uma tendência de dissociação entre o PIB e as emissões, resultante da descarbonização da economia, ou seja, uma economia com menos carbono emitido por cada unidade de riqueza produzida que se mantém, como se verifica na figura 2.3.

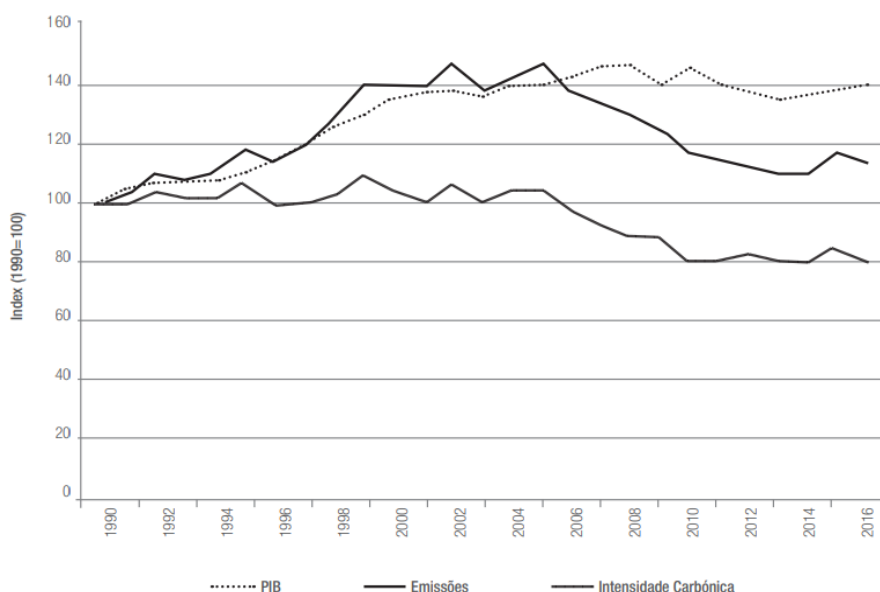


Figura 2.3 – Evolução da intensidade carbónica da economia nacional. (Observatório da Energia, 2019)

Vários fatores estão na base desta tendência, como o crescimento significativo da energia produzida a partir de fontes de energia renovável (principalmente eólica e hídrica), e a implementação de medidas de eficiência energética, bem como a substituição de fontes energéticas mais poluentes como o carvão por gás natural, com a construção de centrais de ciclo combinado e de unidades de cogeração (Governo de Portugal, 2019).

A adoção do Acordo de Paris em 2015 foi um marco histórico na agenda climática global devido à estrutura multilateral para a ação climática que foi criada. Este pacto, liderado pelas Nações Unidas, estabeleceu o objetivo de limitar o aumento da temperatura global a menos de 2 °C até o final do século em comparação com os níveis pré-industriais, deixando a possibilidade para um aumento de até 1,5 °C. O acordo atual exige que todos os países signatários apresentem contribuições climáticas nacionais a serem atualizadas periodicamente e obriga os países desenvolvidos a continuarem assumindo a liderança em contribuições financeiras (Grupo Iberdrola, 2024).

A mudança para fontes de energia sustentáveis, como a solar, eólica, hidroelétrica, biomassa e geotérmica, tem sido um fator chave na transição energética. As energias renováveis oferecem uma infinidade de vantagens em relação às não renováveis. Respeitam o meio ambiente pois a maioria não produz gases de efeito estufa ou outras emissões poluentes, são ilimitadas pois são obtidas através de recursos inesgotáveis da natureza e podem ser aproveitadas de forma permanente. São mais seguras para a nossa saúde pois não emitem gases e partículas que são prejudiciais aos seres vivos e oferecem maior flexibilidade devido ao facto de poderem ser instaladas em qualquer lugar como barcos, casas e prédios. Para além disso, não geram resíduos difíceis de tratar, são fáceis de desmantelar, não há necessidade de armazenar os seus resíduos, incentivam a geração de emprego (cinco vezes mais postos de trabalho do que a energia convencional) e favorecem a independência energética desenvolvendo a economia da região e promovendo a sua autonomia.

As energias solar e eólica, em particular, emergiram como protagonistas nesse cenário de transição. Os avanços tecnológicos significativos, a redução nos custos de produção e uma maior eficiência tornaram essas fontes mais acessíveis e viáveis para a geração de energia em larga escala. Contudo, a intermitência e a variabilidade – produção irregular devido a fatores climáticos – são dois desafios comuns associados com estas fontes. Uma das formas de ultrapassar esta limitação é o uso de sistemas de armazenamento de energia que permitem armazenar o excesso de energia gerado em momentos de maior produção para ser utilizado nos períodos de menor produção.

Assim, a inovação nas tecnologias de armazenamento de energia desempenha também um papel crucial na transição energética. Baterias avançadas e sistemas de armazenamento permitem que a energia gerada por fontes renováveis intermitentes, como a solar e eólica, seja armazenada para uso futuro, proporcionando uma maior estabilidade à rede elétrica.

Os esforços para eletrificar setores tradicionalmente dependentes de combustíveis fósseis, como transportes e aquecimento, também fazem parte integrante da transição energética. A popularização de veículos elétricos, a expansão da infraestrutura de carregamento e iniciativas para promover a eficiência energética em edifícios contribuem para reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

De acordo com o *European Investment Bank* (2018), a transição da União Europeia para emissões líquidas de carbono zero até 2050 é um grande desafio, mas também uma grande oportunidade para modernizar a economia do continente europeu e promover o crescimento, o emprego, o avanço tecnológico e a inclusão social. A transição é económica e tecnicamente viável e vai-se tornando mais fácil à medida que o custo das tecnologias de baixo carbono diminui.

Segundo o Grupo Iberdrola (2024), as principais ações que devem ser tomadas para acelerar a transição energética são as seguintes:

- **Incentivo à inovação tecnológica** – A evolução tecnológica permite a transição de todo o setor, desde melhorias na produção de energia até ao incentivo de redes inteligentes e a prestação de novos serviços aos clientes.
- **Eletrificação da economia** – A eletrificação da economia, dos transportes e dos edifícios é o principal motor energético da transição energética para a descarbonização.
- **Utilização de energia renovável** – Se o objetivo da transição energética é alcançar a descarbonização, é essencial conseguir a máxima integração e estabilidade das energias renováveis.

2.2. Transição Energética: Vantagens e Desafios

Na Europa, a transição energética traz consigo uma série de benefícios que vão desde a redução das emissões de gases de efeito de estufa até ao estímulo à inovação tecnológica e a criação de empregos verdes. Segundo a DGEG (2019), os benefícios são os seguintes:

- **Criação de Emprego** – A energia sustentável é responsável por mais de 4 milhões de empregos na Europa. Se a transição energética for ambiciosa pode ser responsável pela criação de 1% de todos os novos empregos na Europa.
- **Reindustrialização** – Depois da recente crise, o preço dos combustíveis voltou a aumentar, aumentando a capacidade de competitividade das energias renováveis.
- **Menor dependência** - A dependência da União Europeia das importações de energia deverá diminuir de 55% para 20% até 2050, aumentando a segurança de abastecimento de energia.
- **Competitividade** - As energias renováveis são uma forma de reduzir a intensidade energética nos processos, para os quais também contribui uma maior digitalização e automação.
- **Consumidores** - Consumidores no centro das decisões, agindo simultaneamente como produtores de energia e vendendo o excesso à rede.
- **Liderança na descarbonização** - A Europa começou a dissociar a sua economia das emissões de carbono há duas décadas, e a sua economia é agora 20% menos intensiva em carbono do que em 2000. Em termos de intensidade de carbono é 20% menor que a dos EUA e 70% menor que a da China.
- **Fontes de energia renováveis à prova de crises** - O investimento em energia renovável cresceu substancialmente nas últimas duas décadas e foi menos afetado pela crise financeira do que qualquer outro tipo de investimento.

Numa perspetiva mais social e de comunidade, a transição energética apresenta os seguintes benefícios:

- Melhoria da saúde e do bem-estar das pessoas;
- Aumento da consciência ambiental;
- Incentivo à eficiência energética;
- Mitigação de conflitos para recursos escassos;

- Democratização energética e equidade social;
- Proliferação de empregos verdes.

Foram já alcançados avanços significativos no desenvolvimento de sistemas de fontes de energia renováveis integradas (IRES – *Integrated Renewable Energy Systems*), no entanto, é importante reconhecer a existência de vários obstáculos que necessitam de ser abordados tais como limitações nas políticas de incentivo por parte dos governos, restrições geográficas e problemas de intermitência associadas às fontes renováveis, maturidade insuficiente relativamente às tecnologias de armazenamento de energia e a necessidade de aumentar a aceitação desta mudança por parte da comunidade (Zhu et al., 2024).

De um modo geral podem ser apontados os seguintes fatores como os principais desafios que a transição energética enfrenta (Zhu et al., 2024):

- **Políticas Governamentais** – O controlo do governo sob o sistema de fornecimento de eletricidade cria uma situação de monopólio em muitos países e mantém-se um entrave ao progresso da utilização de energias limpas. Apesar de terem sido introduzidas nos últimos anos condições favoráveis aos investidores privados, a ausência de um ambiente justo e aberto no mercado da eletricidade impede a evolução da transição. Para além disso, as suspensões súbitas nas políticas relativas às energias verdes, por vários motivos, podem levar à estagnação ou regressão no desenvolvimento destes sistemas, corroendo a confiança da população. Desta maneira, a continuidade de políticas que suportam esta transição desempenha um papel fundamental no avanço da transição energética e nos sistemas integrados de fontes de energia renováveis (Wen et al., 2020).
- **Instabilidade das Energias Renováveis** – A desvantagem mais proeminente das energias renováveis é a sua instabilidade inerente. Energias como a solar e a eólica são altamente condicionadas e dependentes das condições meteorológicas, resultando em flutuações e intermitências devido à variação na radiação solar e na velocidade do vento. A energia geotérmica, apesar de mais estável, requer uma gama de temperaturas de sub-superfície consistentemente favorável, o que atrasa o seu desenvolvimento devido aos extensos períodos de recuperação da temperatura do solo (Ren et al., 2022).

Para além disso, ao integrar energias renováveis na rede de distribuição de eletricidade, a instabilidade que possuem pode causar flutuações significativas no

fornecimento de eletricidade, podendo afetar a utilização da mesma por parte do consumidor (Cao et al., 2022).

- **Imaturidade das tecnologias de armazenamento de energia** - Primeiramente, os elevados custos associados aos ESS (*Energy Storage Systems*) permanecem por resolver. Por exemplo, fabricar baterias de lítio requer materiais metálicos raros tais como o cobalto, níquel e manganésio, para além de tecnologias avançadas, resultando num preço mais elevado. O facto de necessitarem de locais específicos para se alojarem e uma manutenção frequente tornam o preço ainda mais elevado. Em segundo lugar, o número limitado de ciclos de armazenamento dos ESS tornam o armazenamento de energia a longo termo um desafio, sendo necessária substituição regular e calendarizada de equipamentos. Para além disso, os ESSs possuem problemas como uma baixa eficiência de armazenamento de energia e potenciais riscos à segurança (Zhu et al., 2024).
- **Aceitação da comunidade** - O desenvolvimento e implementação bem-sucedido das tecnologias energéticas depende bastante na aceitação social. Apesar de que existe um apoio geral no que toca a políticas de energias limpas em países desenvolvidos, uma larga percentagem da comunidade não tem noção e conhecimento relativamente ao tema da energia e do ambiente. Aproximadamente um terço das pessoas nos países mais desenvolvidos da Europa não tem a certeza acerca do seu apoio às políticas referentes às energias renováveis (Azarpour et al., 2022).

Por outro lado, o alto custo relativo da utilização de energias renováveis torna-se uma barreira primária à aceitação de residentes rurais que preferam optar por diminuir a temperatura interna das suas casas de modo a poupar nas despesas de aquecimento (Liu, Luo, Li, Xing, Gao & Liu, 2022). Consequentemente, é necessário uma melhoria e esforços contínuos para melhorar o consentimento destes sistemas integrados entre os residentes de países desenvolvidos e em desenvolvimento (Zhu et al., 2024).

Como referido, um dos grandes desafios quando se fala em transição energética é o armazenamento da energia gerada por fontes intermitentes como a energia solar e eólica. Neste contexto, as baterias e o armazenamento de energia em geral são cruciais na transição da economia global com a sua capacidade de manter um equilíbrio entre oferta e procura. No entanto, para que a transição energética seja completa, as formas de armazenamento também devem ser de fontes verdes e sustentáveis. A chave para descarbonizar o mundo e combater as mudanças climáticas é a eletrificação movida a fontes renováveis, o que significa a eletrificação de carros, edifícios e cidades (L. Pimentel, 2023).

2.3. Planos Europeus e Nacionais no contexto da Transição Energética

O Acordo de Paris surgiu em resposta à necessidade global de enfrentar as mudanças climáticas causadas pelo aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) resultantes da atividade humana, em particular da queima de combustíveis fósseis, desflorestação e outras práticas que libertam carbono para a atmosfera. Desde a década de 1970 que os cientistas têm vindo a alertar sobre os impactos destas emissões na atmosfera e as consequências potencialmente devastadoras das mudanças climáticas. Para além disso, ONGs (Organizações Não Governamentais), movimentos sociais e ativistas ambientais têm pressionado os governos a tomarem medidas mais ambiciosas para enfrentar as mudanças climáticas e proteger o meio ambiente. Dessa forma, o Acordo de Paris foi uma resposta a essas circunstâncias e motivos, representando um marco histórico na cooperação internacional para combater as mudanças climáticas.

2.3.1. Acordo de Paris

O Acordo de Paris, adotado a 12 de dezembro de 2015, visou alcançar a descarbonização das economias mundiais, e estabeleceu como um dos seus objetivos de longo prazo, o limite do aumento da temperatura média global a níveis abaixo dos 2 graus centígrados acima dos níveis pré-industriais. Este acordo determinou ainda que se prosseguissem esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5 graus centígrados, reconhecendo que isso reduziria significativamente os riscos e impactos das alterações climáticas, em linha com o Relatório do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas, apresentado em 2019.

O Acordo de Paris exigiu que as Partes envidassem os seus melhores esforços de mitigação através de Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC) e que reforcem progressivamente esses esforços, a cada nova submissão das suas NDC. Para tal, todas as partes prestam informações regulares sobre as suas emissões e sobre os seus esforços de implementação, e, a cada 5 anos, é feito um balanço global para avaliar o progresso realizado (Silva & Fernandes, 2020).

O acordo inclui um plano de ação para limitar o aquecimento global. Segundo o Conselho da União Europeia, os seus principais elementos são os seguintes (Conselho da União Europeia, 2024):

- **Um objetivo a longo prazo** – Os governos acordaram em manter o aumento da temperatura média mundial bem abaixo dos 2°C em relação aos níveis pré-industriais e em envidar esforços para limitar o aumento a 1,5°C

- **Contributos** – Antes e durante a conferência de Paris, os países apresentaram planos de ação nacionais abrangentes no domínio das alterações climáticas para reduzirem as suas emissões
- **A ambição** – Os governos acordaram em apresentar os seus planos de ação de cinco em cinco anos, estabelecendo metas cada vez mais ambiciosas.
- **Transparência** – Os países concordaram em apresentar relatórios aos outros governos e ao público sobre o seu desempenho no alcance das suas metas, para assegurar a transparência e a supervisão.
- **Solidariedade** – Continuar a prestar financiamento à luta contra as alterações climáticas para ajudar os países vulneráveis a reduzirem as emissões e a criarem resiliência para lidarem com os efeitos das alterações climáticas.

O Acordo de Paris, esteve em vigor desde 4 de novembro de 2016 e logo em dezembro desse ano reuniu-se em Marraquexe a primeira sessão da Conferência das Partes. Aí, Portugal anunciou que cumpriria o objetivo da neutralidade carbónica até 2050. Foi a primeira nação do mundo a assumir este compromisso (Silva & Fernandes, 2020).

Tal como exigido pelo acordo, a UE apresentou a sua estratégia de redução a longo prazo das emissões e os seus planos atualizados em matéria de clima (contributo determinado a nível nacional) antes do final de 2020, comprometendo-se a reduzir as emissões da UE em, pelo menos, 55% até 2030, em comparação com os níveis de 1990. A UE e os Estados-Membro atualizaram os planos da EU em matéria de clima em 2023 (Conselho da União Europeia, 2024).

2.3.2. Metas, objetivos e resultados até 2020 – Energias Renováveis e Eficiência Energética

Segundo o site oficial do Portugal Energia, a Diretiva 28/2009/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, introduziu a obrigatoriedade de os Estados-Membros submeterem um plano de promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis. O Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER), fixou objetivos nacionais para cada Estado-Membro relativos à quota de energia proveniente de fontes renováveis consumida nos setores dos Transportes, Eletricidade e Aquecimento e Arrefecimento em 2020 (Portugal Energia, 2020) (Parlamento Europeu e do Conselho, 2009).

Portugal preparou e apresentou o primeiro PNAER em 2010, no qual se comprometeu a atingir os objetivos estabelecidos na Diretiva, nomeadamente a meta global de 31% de Renováveis

no consumo final bruto de energia e 10% de Renováveis no consumo final de energia nos Transportes em 2020. O grau de cumprimento da meta a 2020 estabeleceu-se nos 98%.

Para o horizonte de 2020, o objetivo foi redefinido para um limite máximo ao consumo de energia primária em 2020 equivalente a uma redução de 20% (24 Mtep, excluindo usos não-energéticos), tendo sido posteriormente adotado por Portugal uma meta mais ambiciosa de redução de 25% (22,5 Mtep, excluindo usos não-energéticos). Esta meta foi praticamente atingida em 2018 tendo-se alcançado um consumo total de energia primária em 2018 (incluindo aviação internacional e excluindo usos não-energéticos) de 22,4Mtep, o que correspondeu a uma redução deste consumo em 23% (Portugal Energia, 2020).

2.3.3. Plano Nacional Energia – Clima 2030 (PNEC)

Com o Acordo de Paris em 2015, dá-se uma mudança no paradigma na sociedade com o reconhecimento de que apenas com o contributo de todos é possível ultrapassar o desafio das alterações climáticas e travar o aquecimento global do planeta a apenas 2°C acima dos níveis pré-industriais. Surgem neste seguimento, por parte da Comissão Europeia, uma série de pacotes estratégicos que visam dar resposta nas diferentes áreas a este desafio global. Destes destacam-se o Pacote Energia Clima 2030, o Pacote Mobilidade Limpa e o Pacote Energia Limpa para todos os Europeus.

Neste sentido, a União Europeia aprovou metas ambiciosas que visam alcançar, em 2030 (Portugal Energia, 2020):

- 32% de quota de energia proveniente de fontes renováveis no consumo final bruto;
- 32,5% de redução do consumo de energia;
- 40% de redução das emissões de gases com efeito de estufa relativamente aos níveis de 1990;
- 15% de interligações elétricas.

O Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030) é o principal instrumento de política energética e climática para a década 2021-2030, rumo a um futuro neutro em carbono e surge no âmbito das obrigações estabelecidas pelo Regulamento da Governação da União da Energia e da Ação Climática, o qual prevê que todos os Estados-membros elaborem e apresentem à Comissão Europeia os seus planos integrados em matéria de energia e de clima.

De acordo com a Agência Portuguesa do Ambiente, o PNEC inclui uma caracterização da situação existente em Portugal abrangendo cinco dimensões previstas no Regulamento da

Governança da União da Energia e Ação Climática: descarbonização, eficiência energética, segurança de abastecimento, mercado interno de energia e investigação. O PNEC 2030 estabelece metas nacionais para o horizonte 2030, em termos de redução de emissões de gases com efeito de estufa, incorporação de energias renováveis, eficiência energética e interligações. Define os contributos nacionais e principais linhas de atuação planeadas para o cumprimento dos diferentes compromissos globais da União Europeia a nível da redução de emissões de gases com efeito de estufa, energias renováveis, eficiência energética e interligações (Agência Portuguesa do Ambiente, 2021).

Segundo o PNEC, todos os objetivos definidos até 2020 foram cumpridos no que toca às emissões de GEE, eficiência energética, energias renováveis, energias renováveis nos transportes e nas interligações elétricas. A tabela 2.1 resume os objetivos, resultados obtidos até 2020 e as metas até 2030.

Tabela 2.1 – Metas de Portugal em matéria de Energia e Clima. Adaptado de: João Bernardo, DGEG (2024)

	Resultados 2020	Meta 2020	Meta 2030
Emissões GEE	-32,9%	-18% a -23%	-55%
Eficiência Energética	29,3%	25%	35%
Renováveis	33,9%	31%	47%
Renováveis nos Transportes	9,7%	10%	20%
Interligações Elétricas	11%	10%	15%

Desde 2016 está em vigor o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050) onde o Governo Português se comprometeu a assegurar a neutralidade das suas emissões até ao final de 2050, traçando uma visão clara relativamente à descarbonização profunda da economia nacional, enquanto contributo para o acordo de Paris e em consonância com os esforços mais ambiciosos em curso a nível internacional.

2.3.4. Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050)

O Governo Português comprometeu-se em 2016 a assegurar a neutralidade das suas emissões até ao final de 2050, traçando uma visão clara relativamente à descarbonização profunda da economia nacional, enquanto contributo para o acordo de Paris e em consonância com os esforços mais ambiciosos em curso a nível internacional.

Visando concretizar este desígnio, foi desenvolvido o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050) que identifica os principais vetores de descarbonização em todos os setores. O desenvolvimento do RNC2050 foi feito em articulação com os trabalhos de preparação do Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC), que será o principal instrumento de política energética e climática para a década 2021-2030, estabelecendo as novas metas nacionais de redução de emissões de GEE, de energia renovável e de eficiência energética em linha com o objetivo de neutralidade carbónica.

O RNC2050 estabelece a visão e as trajetórias, e identifica linhas de orientação para as políticas e medidas para a concretização da Neutralidade Carbónica. Constitui igualmente a Estratégia de Longo Prazo de Portugal a submeter à EU e à CQNUAC (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima) no âmbito do Acordo de Paris. A concretização desta visão estratégica assenta em oito premissas fundamentais:

- i.** Promover a transição para uma economia competitiva, circular, resiliente e neutra em carbono, gerando mais riqueza, emprego e bem-estar.
- ii.** Identificar vetores de descarbonização e linhas de atuação subjacentes a trajetórias para a neutralidade carbónica em 2050.
- iii.** Contribuir para a resiliência e para a capacidade nacional de adaptação às vulnerabilidades e impactos das alterações climáticas.
- iv.** Estimular a investigação, a inovação e a produção de conhecimento em áreas-chave para a concretização do objetivo da neutralidade carbónica.
- v.** Garantir condições de financiamento e aumentar os níveis de investimento.
- vi.** Assegurar uma transição justa e coesa que contribua para a valorização do território.
- vii.** Garantir condições eficazes de acompanhamento do progresso alcançado rumo ao objetivo da neutralidade carbónica (governança) e assegurar a integração dos objetivos de neutralidade carbónica nos domínios setoriais.
- viii.** Envolver a sociedade nos desafios das alterações climáticas, apostando na educação, informação e sensibilização, contribuindo para aumentar a ação individual e coletiva.

Esta visão terá necessariamente de ser traduzida nas diversas estratégias e instrumentos de política setorial na energia, nos transportes, no comércio, nos serviços, na indústria, nos resíduos, na agricultura e florestas, tendo em conta os vetores de descarbonização identificados e a prosseguir pelo país nos próximos 30 anos (Governo de Portugal, 2019).

2.3.5. Trajetórias para a Neutralidade Carbónica em 2050

O objetivo da neutralidade carbónica traduz-se em igualar o nível de emissões de GEE com o nível de sumidouro até ao ano de 2050 (isto é, emissões líquidas iguais a zero). Isto obrigará a reduções substanciais das emissões e/ou aumentos substanciais dos sumidouros nacionais, que deverão materializar-se entre o presente e 2050. A figura 2.4 ilustra a redução de emissões de 85% a 90% até 2050 face a ano de 2005. Note-se que a trajetória de emissões inclui as emissões líquidas de agricultura e solos agrícolas, contabilizando o papel de sumidouro destes.

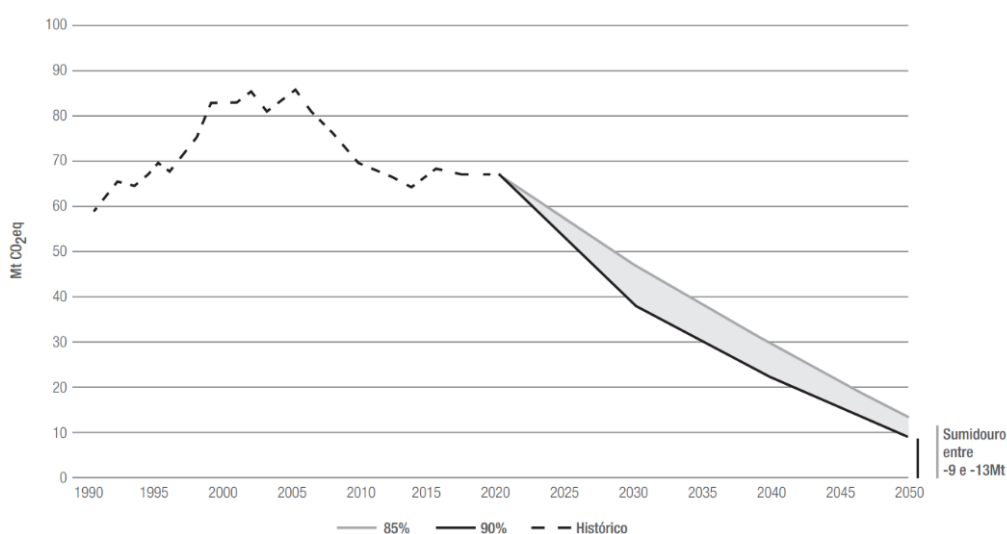


Figura 2.4 – Trajetória de redução de emissões de 85% a 90% até 2050 face a 2005 (Governo de Portugal, 2019).

As emissões médias anuais de Portugal foram, na década 2007- 2017, de 69 Mt CO₂. Quando desagregadas por setor, as emissões nacionais estão distribuídas por: 25% na produção de energia, 25% nos transportes, 23% na indústria, 10% na agricultura, 8% em outros usos de energia e 8% nos resíduos. Os sumidouros resultam de alguns usos de solo, nomeadamente na agricultura, pastagens, florestas e matos e, nesse período, absorveram da atmosfera cerca de -8,5 Mt CO₂ (de -13 a +7 Mt CO₂), ou seja, cerca de -12% das emissões dos restantes setores. A figura 2.5 e a tabela 2.2 permitem visualizar graficamente e estatisticamente, a contribuição de cada setor para a trajetória de redução de emissões.

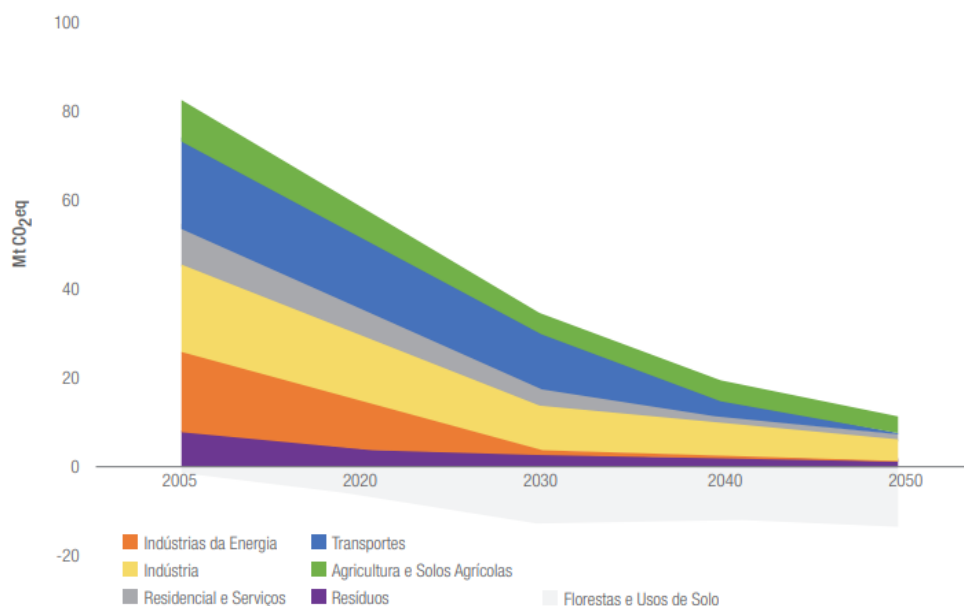


Figura 2.5 – Contribuição setorial para a trajetória de redução de emissões de GEE até 2050 (Governo de Portugal, 2019).

O total líquido de emissões e sumidouros é, portanto, atualmente de 60 Mt CO₂ e esta é a ordem de grandeza do montante que terá de ser reduzido até 2050 para se atingir a neutralidade carbónica.

Tabela 2.2 – Potencial de redução de emissões em relação a 2005. Adaptado de Governo de Portugal (2019).

Setores	Ano		
	2030	2040	2050
Energia	80% 81%	92%	96%
Indústria	48% 52%	59% 60%	72% 73%
Edifícios	48% 49%	73% 74%	85%
Transportes	43% 46%	84% 85%	98%
Agricultura e usos do solo	36% 39%	37% 49%	38% 60%
Resíduos e Águas Residuais	57% 58%	69% 71%	77% 80%

Na produção de eletricidade a transformação será profunda (redução de 99% das emissões de GEE face a 2005) e será alcançada com investimentos significativos em nova capacidade renovável, em particular energia eólica e fotovoltaica, e na forte redução ou abandono da

produção de eletricidade com recurso a combustíveis fósseis, como o carvão, o fuelóleo e o gás natural, suportado num sistema resiliente, flexível e moderno.

A descarbonização do setor dos transportes será quase total (redução de 98% das emissões de GEE face a 2005) e será alicerçada fundamentalmente no reforço do papel do sistema de transporte público e na substituição dos atuais veículos a combustíveis fósseis por uma frota essencialmente elétrica. O uso do hidrogénio e de biocombustíveis avançados terá também um papel importante na substituição dos combustíveis atuais. A conversão da mobilidade em veículos privados noutras formas permitirão aumentar significativamente o volume de passageiros ou de mercadorias transportadas, sem que seja necessário aumentar as frotas, principalmente a de automóveis privados.

Os edifícios, quer residenciais, quer de serviços, terão também um forte contributo de descarbonização (reduções superiores a 96%, face a 2005), devido a uma eletrificação quase total dos consumos de energia, apoiados ainda em grandes ganhos de eficiência energética por via do reforço do isolamento dos edifícios, do recurso a solar térmico e de bombas de calor.

Na indústria as reduções serão menos expressivas, mas ainda assim bastante significativas. Serão possíveis reduções de cerca de 80% nas emissões de queima de combustíveis, por via da eletrificação, uso de biomassa e aumentos de eficiência, enquanto nas emissões que resultam dos processos industriais o potencial é muito mais limitado (menos diversidade de tecnologias custo-eficazes disponíveis), pelo que as reduções de emissões deverão ficar-se pelos 60%, o que se traduz num potencial de redução global de emissões de cerca de 73%.

As emissões com origem na agricultura, em particular as que têm origem na produção animal, têm um potencial de redução menor, e este setor reduzirá 9% a 30% as suas emissões até 2050. Os solos agrícolas e as pastagens têm potencial para deixar de ser uma fonte de emissões. Considerando como sistema único as emissões da agricultura com a dos solos agrícola e das pastagens, o potencial eleva-se para reduções de emissões de 40% a 60%. Nos resíduos e águas residuais as reduções serão mais significativas (cerca de 75% face a 2005) por via de um forte aumento da circularidade da economia, da eliminação de resíduos orgânicos em aterro e da redução das produções *per capita* de resíduos total e orgânico. (Governo de Portugal, 2019).

De acordo com a DGEG (2019), O RNC/RNCP 2050 constitui uma visão de longo prazo de natureza transversal a todos os setores de atividade. Neste cronograma, o PNEC (Plano

Nacional Integrado Energia-Clima) está enquadrado na década de 2020 a 2030, como se pode observar na figura 2.6.

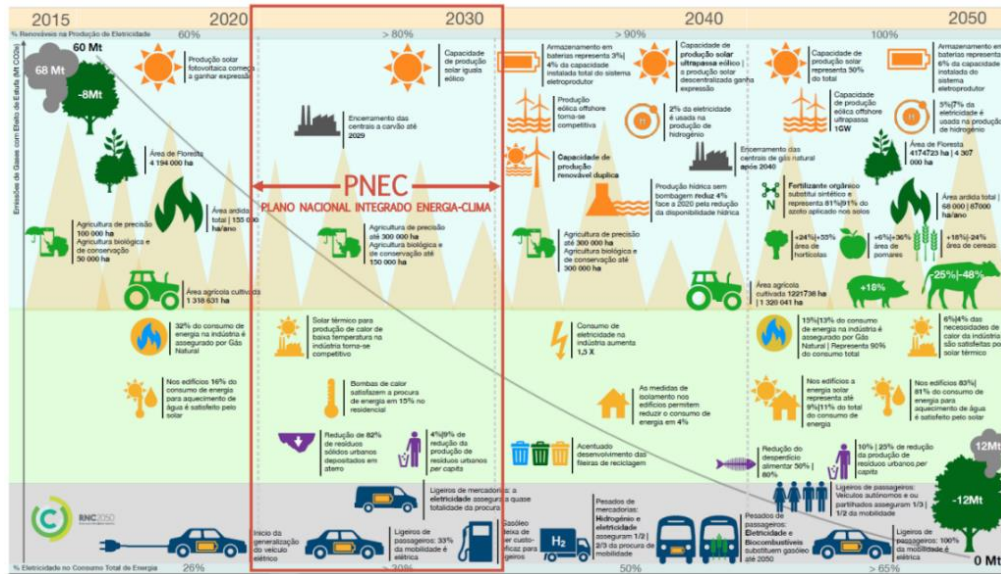


Figura 2.6 – Narrativa global de neutralidade carbónica até 2050, com destaque para o PNEC (DGEG, 2019).

O Net Zero é o objetivo acordado a nível internacional para mitigar os efeitos do aquecimento global a curto prazo. Os planos de ação apresentados na tabela 2.3, relacionados com cada termo, refletem o compromisso com que grandes empresas e instituições se comprometem para reduzir as suas emissões no futuro.

Tabela 2.3 - Diferentes planos de ação para redução de GEE. Adaptado de: APLANET. (2022, 18 de outubro).

	Quando são alcançados?	Exemplos de Empresas
Net Zero	Minimização da pegada de carbono das suas atividades + compensação das emissões residuais	Salesforce
Neutralidade de Carbono (Neutralidade Climática)	Equilíbrio das emissões de carbono através de compensações	Globo (media), Marks & Spencer
Carbono Positivo	Remoção de todas as emissões equivalentes que a sua organização emitiu durante a sua vida útil	Google
Carbono Negativo (Clima Positivo)	Remoção ou sequestro de mais CO2 da atmosfera do que aquele que é emitido	IKEA, Microsoft, Brewdog

De modo a dar um melhor suporte aos projetos de energias renováveis e, consequentemente, incentivar uma maior utilização de fontes de energia renováveis em toda a EU, a Comissão Europeia estabeleceu o mecanismo de financiamento da EU, que decorre do Artigo 33 da Regulação Governamental e está em vigor desde 2020. O seu processo de implementação está em andamento (European Commission, 2024).

Capítulo 3 – Produção e Armazenamento de Energia Elétrica

3.1. Sistemas de produção de energia

Para uma melhor compreensão da produção de energia elétrica à escala global, torna-se pertinente fazer uma contextualização do cenário atual e também narrar o seu desenvolvimento ao longos das décadas recentes.

A produção e armazenamento de energia elétrica são pilares fundamentais para o funcionamento da sociedade moderna. A energia elétrica é indispensável para o desenvolvimento económico, tecnológico e social, sendo utilizada numa ampla gama de atividades, desde o funcionamento de aparelhos domésticos até à operação de grandes indústrias.

De acordo com o Portal Portugal Energia (2020), em Portugal o setor energético é um suporte crucial 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. O funcionamento do setor elétrico é ilustrado na figura 3.1, que inclui as etapas de produção, transporte, distribuição, comercialização e finalmente uso por parte do consumidor final. Tem como entidade reguladora a ERSE (Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos), como entidades licenciadoras a DGEG (Direção-Geral de Energia e Geologia) e entidade fiscalizadora a ENSE (Entidade Nacional para o Setor Energético) (Portugal Energia, 2020).

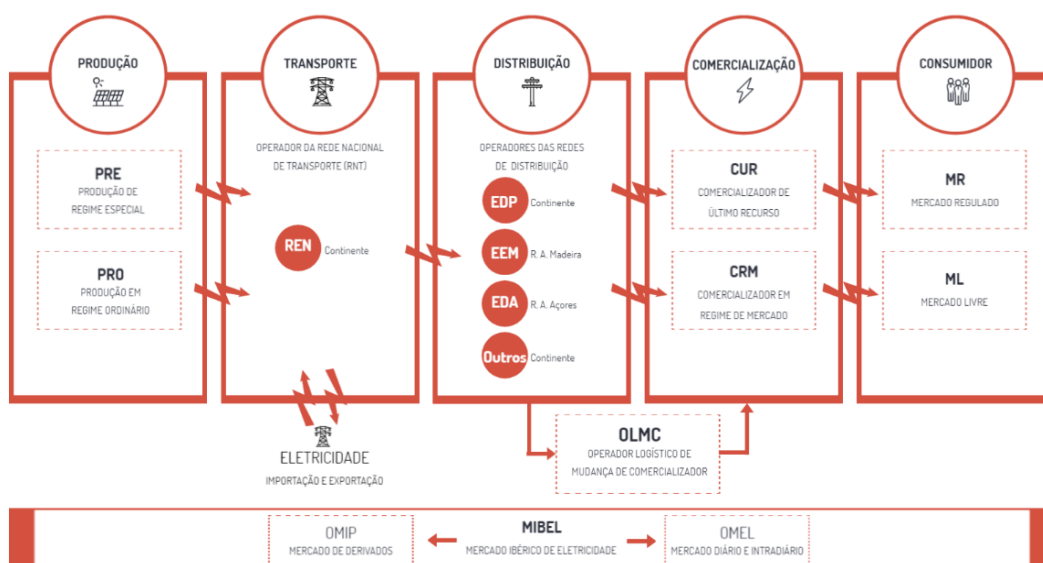


Figura 3.1 – Ciclo do setor energético (Portugal Energia, 2024).

A produção de energia elétrica envolve a conversão de diversas formas de energia primária em eletricidade. Pode-se definir como fonte de energia primária toda a fonte de energia passível de ser convertida ou transformada diretamente em energia elétrica. O petróleo, o gás natural, o carvão mineral, a energia proveniente do sol, do vento, da água e até do calor da terra são exemplos de fontes de energia primárias. Cada fonte tem as suas próprias características, vantagens e desvantagens em termos de impacto ambiental, custo, disponibilidade e eficiência.

As fontes de energia podem ser divididas entre Fontes de Energia Renovável (FER) e Fontes de Energia Não Renovável (FENR). Entende-se como FER a fonte de energia que permite a sua reutilização e, pelo contrário, uma FENR toda a fonte de energia que não permite a sua reutilização ou em que cuja fonte de energia primária é finita. Como FENR podem identificar-se o carvão, gás natural, petróleo e o urânio. Nas FER incluem-se a energia solar (que utiliza painéis fotovoltaicos para converter a luz do sol em eletricidade), a hídrica (que utiliza a força da água em movimento para gerar eletricidade), ou a eólica (que aproveita a força do vento para gerar eletricidade através de turbinas eólicas).

Embora as FENR sejam ainda predominantes, enfrentam desafios significativos relacionados com a sustentabilidade e impacto ambiental. A queima de combustíveis fósseis para a produção de eletricidade liberta grandes quantidades de dióxido de carbono (CO₂) e outros poluentes, contribuindo para o aquecimento global e a degradação do ambiente. A energia nuclear, por outro lado, oferece uma fonte de energia de baixa emissão de CO₂, mas enfrenta questões relacionadas com a segurança e com o despejo de resíduos radioativos.

Devido à crescente preocupação com as mudanças climáticas bem como com a necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis, as FER têm vindo a ganhar destaque.

3.2. O Cenário Português

A redução da dependência energética face ao exterior constitui um dos principais objetivos da política energética nacional, estando definida a meta de 65% em 2030 no PNEC. Nos últimos 20 anos, a representatividade no consumo total de energia primária, das fontes de energia fósseis de proveniência externa, dada a inexistência de produção nacional, tem manifestado uma tendência de redução. Em 2022, a dependência energética situou-se em 71,2% (4,1% acima de 2021 embora 3% abaixo de 2019). Tal deveu-se à recuperação da atividade económica cujo conseqüente aumento do consumo de energia se refletiu neste incremento. Desde 2019, que não se regista a importação de carvão de origem fóssil para a produção de eletricidade, o que tem contribuído de forma positiva para a redução da dependência

energética. A figura 3.2 ilustra graficamente a evolução da dependência energética desde 2002 até aos dados mais recentes de 2022 (Observatório da Energia et al., 2024).

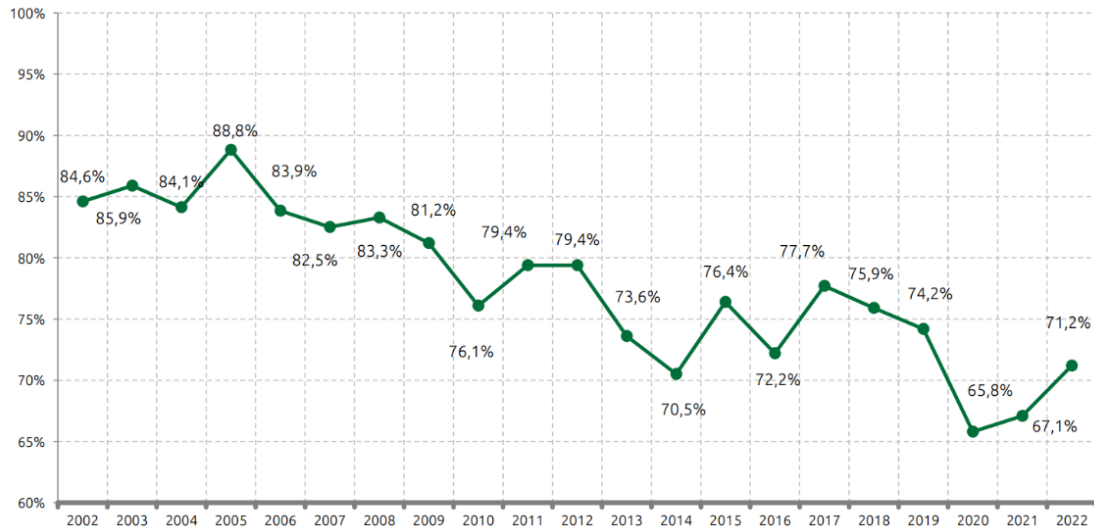


Figura 3.2 – Evolução da dependência energética de Portugal (Observatório da Energia et al., 2024).

Relativamente à dependência energética, ilustrada na figura 3.3, e comparando a nacional com a dependência entre os países da EU 27, verificou-se que em 2021 Portugal foi o 12º país com a maior dependência energética, cerca de 8,8% acima da média da EU-27, com 11,4%.

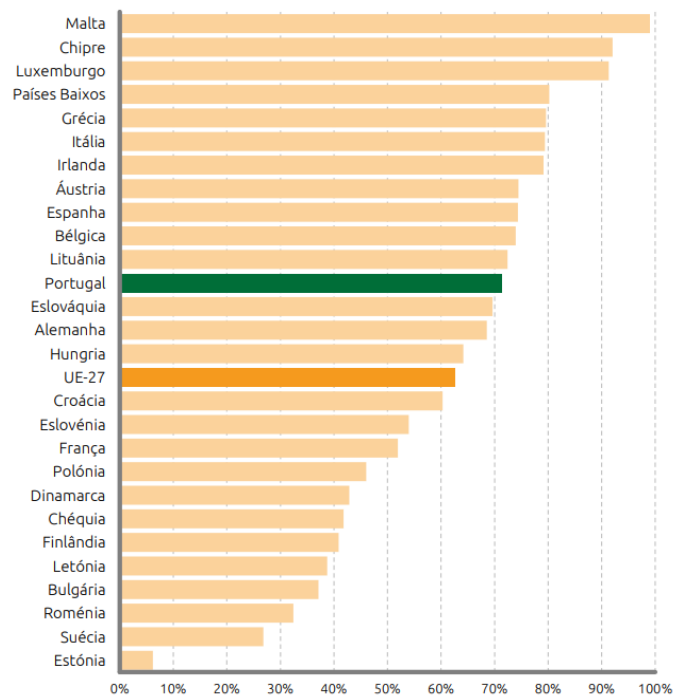


Figura 3.3 – Dependência energética na UE-27 em 2022 (Observatório da Energia et al., 2024)

A intensidade energética da economia em energia primária proporciona uma possível medida da eficiência energética da economia, ou seja, da quantidade de energia necessária para produzir uma unidade de PIB. Comparando os dados dos países da EU-27, verifica-se pela figura 3.4 que em 2022, Portugal foi o 14º país com a menor intensidade energética da economia, 5% acima da média da EU-27.

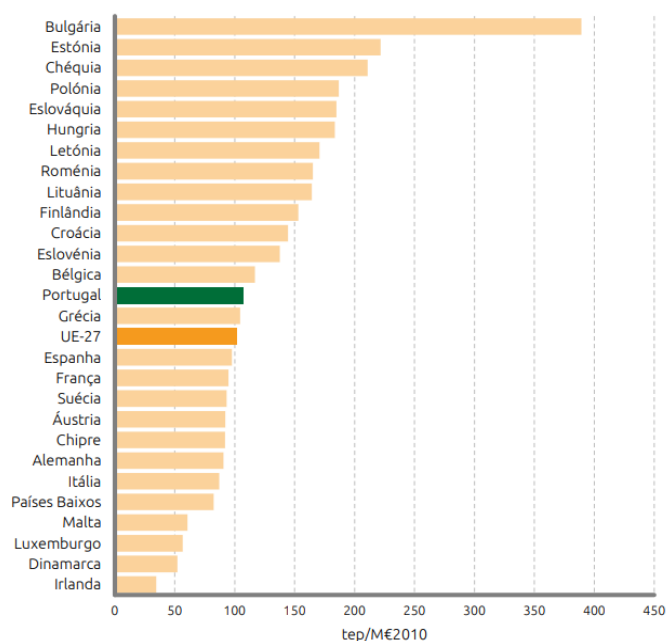


Figura 3.4 – Intensidade Energética da economia em energia primária na EU-27 em 2022 Observatório da Energia et al., 2024).

Analisando nas figuras 3.5 e 3.6 a intensidade energética por setor de atividade, em 2022, observa-se que nenhum dos setores registou aumento e que na maioria dos setores houve um decréscimo, em relação ao ano anterior. O setor doméstico foi o setor que registou a maior queda.

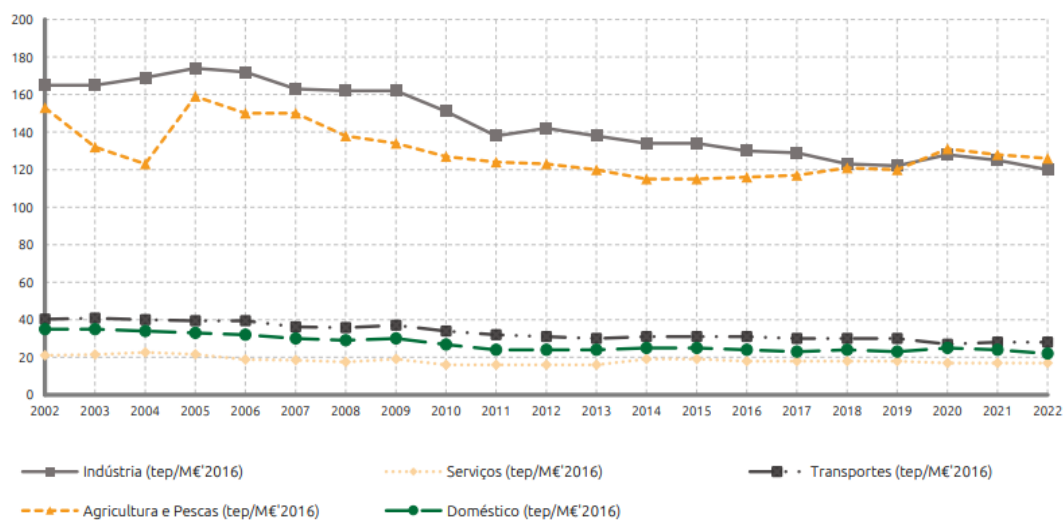


Figura 3.5 - Evolução da intensidade energética por setor de atividade (Observatório da Energia et al., 2024).

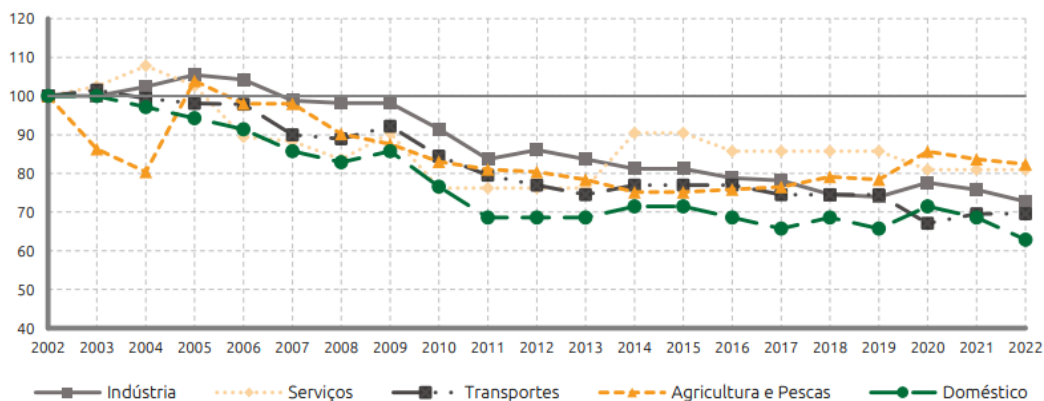


Figura 3.6 - Evolução da intensidade energética por setor de atividade (2022=100) (Observatório da Energia et al., 2024).

Em 2022, a produção doméstica de energia foi de 6778 ktep, menos 1,5% face ao ano anterior e foi a segunda maior de sempre desde que há registo.

Em 2022, a produção das centrais termoelétricas atingiu o valor de 1979 ktep, mais 5,1% face ao ano anterior e -21,1% comparativamente a 2012.

Em 2023, Portugal tinha uma potência total instalada de 24707 MW para produção de eletricidade, mais 5,5% face a 2022 e mais 25,9% em relação a 2013.

A potência instalada que mais tem crescido nos últimos anos é a fotovoltaica atingindo 3890 MW em 2023, mais 45% face a 2022 e 13 vezes superior à potência instalada em 2013.

3.3. O Cenário Mundial

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA) (2023), a recuperação da crise provocada pela pandemia Covid-19 e a resposta à crise de energia global proporcionaram um impulso significativo no investimento de energias renováveis. Comparando as estimativas de 2023 por parte da IEA, com a informação relativamente a 2021, o investimento anual em FER aumentou muito mais comparativamente com o investimento em FENR (24% vs. 15%).

No panorama mundial, vemos que o carvão, seguido pelo gás, é ainda a maior fonte de produção de eletricidade nos dias de hoje. Das fontes consideradas de baixo carbono, a energia hídrica e a nuclear são as que possuem maior contribuição, embora a energia eólica e solar estejam a crescer rapidamente.

A figura 3.7 ilustra a contribuição em percentagem que cada fonte de energia tem e teve ao longo dos anos. Até aos dias de hoje, segundo a informação presente na tabela 3.1, o carvão

lidera sendo a fonte de energia mais utilizada na produção de eletricidade com uma contribuição de 35.63% até 2022.

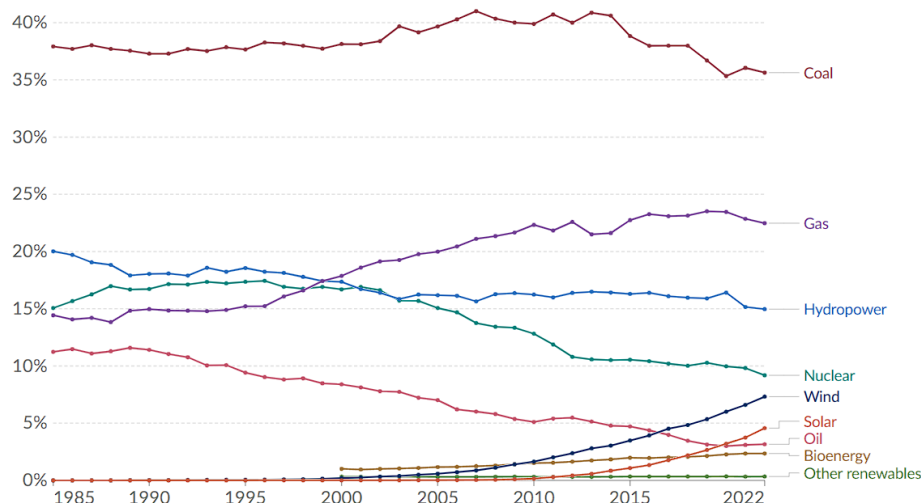


Figura 3.7 - Contribuição de cada fonte de energia para a produção de energia mundial (Our World in Data, 2024).

Tabela 3.1 – Contribuição de cada fonte de energia para a produção de eletricidade no mundo (1985 vs. 2022). Adaptado de: Our World in Data (2024).

Fonte de Energia	Contribuição para produção de eletricidade	
	1985	2022
Carvão	37.92%	35.63%
Gás Natural	20.02%	22.48%
Energia Hídrica	15.06%	14.96%
Energia Nuclear	14.43%	9.18%
Energia Eólica	11.24%	7.32%
Energia Solar	<0.01%	4.57%
Fuelóleo	<0.01%	3.15%
Bioenergia	0%	2.36%
Outras fontes renováveis	0%	0.34%

Em termos de contribuição nacional, o Canadá foi em 2023 o país com maior produção de eletricidade *per capita* no mundo, seguido da Suécia e dos Estados Unidos da América, como se observa na figura 3.8. Enquanto que na Suécia e no Canadá, grande parte da contribuição vem da energia hídrica, nos Estados Unidos a mesma tem pouca contribuição, sendo o Gás Natural a sua maior fonte de energia.

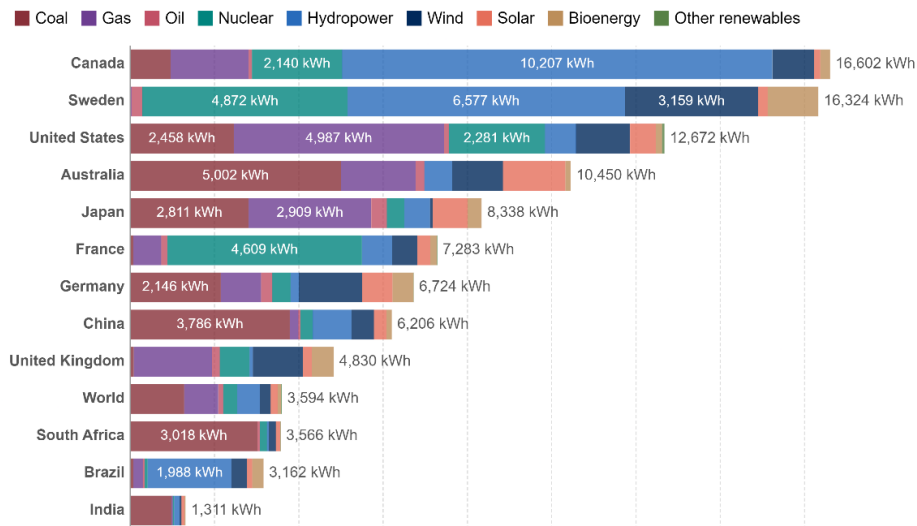


Figura 3.8 - Países com maior produção de eletricidade *per capita* (Our World in Data, 2024).

Em 2019, quase dois terços (63.3%) da eletricidade global veio de combustíveis fósseis. Dos 36% vindos de fontes *low-carbon*, as fontes renováveis contribuíram 26% e a energia nuclear os restantes 10%.

A contribuição relativa destas duas fontes *low-carbon* manteve-se estagnada durante décadas. Durante este período, a contribuição nuclear diminuiu enquanto a das energias renováveis aumentou. Esta evolução está ilustrada na figura 3.9. A grandeza do declínio nuclear foi quase tanta como o crescimento das energias renováveis. Em 2022 a contribuição nuclear foi 9.18% e a contribuição renovável foi 29.55% (Ritchie, H., Rosado, P., 2020).

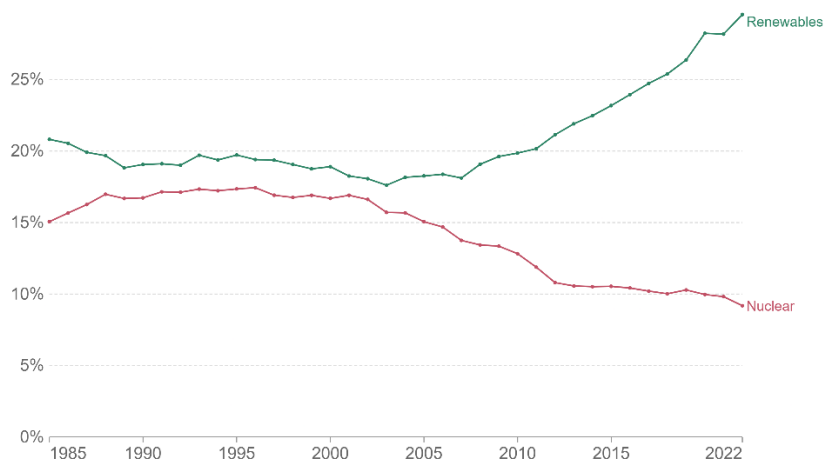


Figura 3.9 – Contribuição das energias nuclear e renováveis ao longo dos anos (Our World in Data, 2024).

3.4. Tecnologias de Armazenamento de Energia

As soluções de tecnologias de armazenamento de energia são frequentemente associadas em grandes grupos, de acordo com a natureza da energia armazenada. É assim comum falar de armazenamento mecânico (hídrica de bombagem, ou volantes de inércia), eletromagnético (supercondensadores eletrostáticos ou bobinas supercondutoras), eletroquímico (baterias), químico (hidrogénio ou combustíveis sintéticos) ou térmico (calor ou frio).

O armazenamento já está hoje presente, em diferentes graus e com recurso a diferentes tecnologias, em muitos setores, tais como:

- Residencial (acumulação de água para uso sanitário ou aquecimento ambiente ou, crescentemente, baterias acopladas a painéis fotovoltaicos);
- Serviços (armazenamento de calor e frio, por exemplo, em supermercados);
- Redes de abastecimento local de calor ou de calor e frio;
- Indústria (sobretudo calor – papel; química, cerâmica, etc., mas também frio – conservas);
- Mobilidade elétrica (através das baterias em cada veículo);
- Elétrico (armazenamento hídrico em albufeira).

Cada grupo possui um conjunto de métricas próprias – densidades de energia e potência, tempo de resposta, tempo de vida ou mesmo grau de potencial descentralização – pelo que é importante analisar as necessidades de cada setor e avaliar a adequação das tecnologias dominantes, em cada um, ao estado atual da arte e às novas políticas públicas de clima e energia tendo em vista o reforço da eficiência, resiliência, segurança e redução dos custos de funcionamento da rede elétrica. Por outro lado, é relevante classificar e caracterizar os diferentes tipos de serviços que as tecnologias de armazenamento podem prestar ao sistema elétrico no quadro da transição energética em curso.

3.4.1. Armazenamento Mecânico

Os sistemas de armazenamento mecânico são aqueles que armazenam a energia sob a forma de energia cinética ou potencial. Incluem a bombagem hídrica, volantes de inércia, sistemas de ar comprimido e sistemas gravíticos.

- **Hídrica de Bombagem**

É a tecnologia de armazenamento mais utilizada no mundo e das mais antigas. Representou em 2020, 95% de toda a capacidade mundial de armazenamento em sistemas elétricos.

O armazenamento hídrico de bombagem consiste em bombear água de um reservatório/curso de água para outro localizado a uma cota superior. A energia é armazenada sob a forma de energia potencial e posteriormente transformada em energia elétrica através de uma turbina hidráulica. A barragem de Alqueva, ilustrada na figura 3.10, e que permitiu a criação do maior reservatório artificial de água da Europa Ocidental, também chamado de Grande Lago, é um exemplo nacional de uma tecnologia hídrica de armazenamento de energia.



Figura 3.10 – Exemplo da barragem de Alqueva como hídrica de bombagem (Agência Lusa, 2024).

A potência de armazenamento varia desde algumas dezenas de kW até alguns GW. Relativamente à energia armazenada, depende da dimensão dos reservatórios, e pode variar entre centenas de kWh a dezenas de GWh.

- **Ar Comprimido**

Com uma capacidade total ligada à rede de cerca de 450MW, a tecnologia de ar comprimido é a segunda tecnologia de armazenamento de energia em termos de capacidade instalada, correspondendo a cerca de 0,3% do total mundial.

O princípio de funcionamento de uma central tradicional de armazenamento de energia com recurso a ar comprimido baseia-se na utilização de energia elétrica para comprimir ar durante períodos de vazio, no seu armazenamento a alta pressão em espaços confinados, e na produção de energia elétrica nos períodos de cheia, aproveitando o ar previamente comprimido para alimentar uma turbina, que por sua vez atua um gerador elétrico. Nas centrais de grande capacidade, como é o caso de Huntorf e McIntosh, o armazenamento do ar comprimido é feito em cavernas construídas em cavidades salinas. A figura 3.11 ilustra o princípio de funcionamento deste tipo de tecnologia.

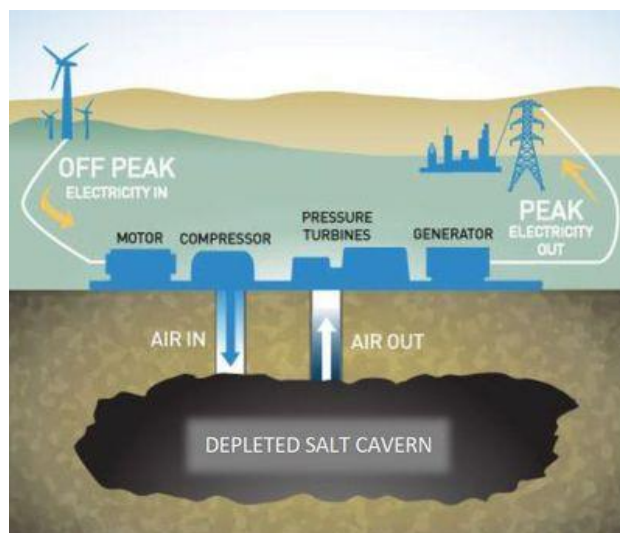


Figura 3.11 – Funcionamento de uma central operada a ar comprimido (Energy Storage News, 2017).

- **Volante de Inércia**

O armazenamento de energia em volantes de inércia é um sistema utilizado há milênios. Esta tecnologia, ilustrada na figura 3.12, foi muito utilizada durante o período da revolução industrial, acoplada aos motores a vapor para garantir estabilidade de potência.

O armazenamento em volantes de inércia consiste em acelerar um corpo em movimento rotativo, mantendo o mesmo em rotação com um mínimo de perdas e desacelerando o volante quando é necessário extrair energia. Desta forma, a energia é armazenada sob a forma de energia cinética e quanto maior for a velocidade de rotação, maior a capacidade de armazenamento. Nos sistemas atuais, as velocidades de rotação variam entre os 20000 e os 50000 rpm em câmaras de vácuo para minimizar as perdas por atrito aerodinâmico e recorre-se a rolamentos magnéticos para minimizar a fricção (atrito mecânico).

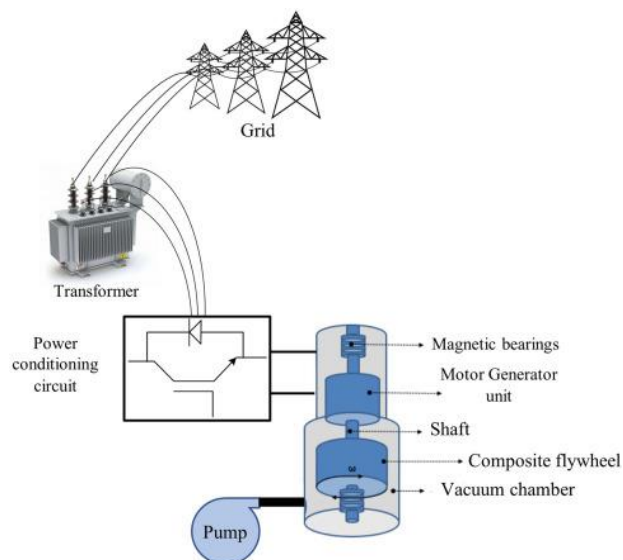


Figura 3.12 – Sistema de armazenamento de energia por volante de inércia (Journal of Energy Storage, 2020).

A potência de armazenamento varia desde entre algumas centenas de kW (100) até alguns MW (2). Relativamente à energia armazenada, é apenas possível manter a energia armazenada durante segundos a minutos, pelo que em geral a capacidade é de alguns kWh. Este tipo de sistemas é utilizado para armazenamento de muito curto prazo, em geral para controlo de frequência e capacidade de reserva durante alguns minutos. O grau de maturidade tecnológica e comercial é muito elevado, mas têm sido observados desenvolvimentos tecnológicos recentes. Do ponto de vista comercial, esta tecnologia é utilizada há década, mas existem muito poucos fabricantes no mercado, dominado atualmente pela empresa ABB. Este tipo de sistemas é utilizado essencialmente em sistemas elétricos isolados como ilhas, laboratórios autossuficientes e instalações militares (ADENE, Observatório da Energia, 2021).

3.4.2. Armazenamento Eletromagnético

Os sistemas de armazenamento eletromagnéticos são aqueles que armazenam a energia sob a forma de campos elétricos (supercondensadores eletrostáticos, nos quais a carga elétrica é armazenada electrostaticamente sem a ocorrência de reações *redox* (isto é transferência de carga entre os elétrodos e os iões do eletrólito), ou de campos magnéticos (bobinas supercondutoras). No entanto, têm vindo a ganhar expressão outro tipo de condensadores – os supercondensadores, capazes de armazenar quantidades muito superiores de energia. Estes dispositivos designam-se por supercondensadores eletroquímicos ou *redox*, e baseiam-se em processos farádicos envolvendo transferência de carga entre os elétrodos e o eletrólito), de forma semelhante ao que ocorre em baterias), sendo também por essa razão classificados na categoria do armazenamento eletroquímico.

Outra forma de armazenamento eletromagnético são as bobinas supercondutoras.

A Agência para a Energia (ADENE) (2021) afirma que:

O armazenamento de energia em bobinas supercondutoras baseia-se na possibilidade de armazenar energia elétrica sob a forma de um campo magnético gerado por uma corrente contínua que circula numa bobina de material supercondutor, ou seja, com resistência nula. A supercondutividade, caracterizada, caracterizada por um estado no qual os materiais apresentam uma resistência elétrica nula, observa-se em vários materiais, por exemplo nos metais, abaixo da sua temperatura crítica, que ocorre a muito baixas temperaturas. Nestas circunstâncias, uma corrente que seja introduzida numa bobina supercondutora manter-se-á em circulação, sem quaisquer perdas, durante um período ilimitado, enquanto o material onde circula se mantiver no estado supercondutor.

Este tipo de sistema de armazenamento de energia caracteriza-se por uma elevada densidade de armazenamento de energia (da ordem de 13kJ/kg) e de potência (da ordem de 2kW/kg), um tempo de resposta muito baixo (da ordem dos milissegundos) e um número teoricamente ilimitado de ciclos de carga/descarga. Apresenta uma eficiência de ciclo completo muito elevada (superior a 90%).

3.4.3. Armazenamento Químico

O armazenamento químico ocorre, no contexto deste trabalho, quando se convertem fontes de energias renováveis em gases combustíveis, incluindo combustíveis sintéticos, os quais podem ser armazenados ou usados diretamente em diferentes aplicações, como por exemplo veículos, ou ainda introduzidos na rede de gás. Estes combustíveis, quando armazenados, podem a qualquer momento ser convertidos novamente em eletricidade para ser disponibilizada à rede elétrica num momento de maior procura, contribuindo assim para a sua gestão.

Este e os outros tipos de armazenamento são particularmente relevantes em períodos nos quais se verifica excesso de produção de eletricidade via fontes renováveis relativamente à sua procura na rede elétrica.

Na figura 3.13 apresenta-se a título de exemplo o aproveitamento do excesso de energia para a gaseificação de biomassa para produção de gás monóxido de carbono e hidrogénio que são utilizados na produção de biocombustíveis. Para além do armazenamento via combustíveis sintéticos é ainda referida a eletrólise da água para a produção de H₂ ou a captura de CO₂ e seu reaproveitamento para produção de metano.

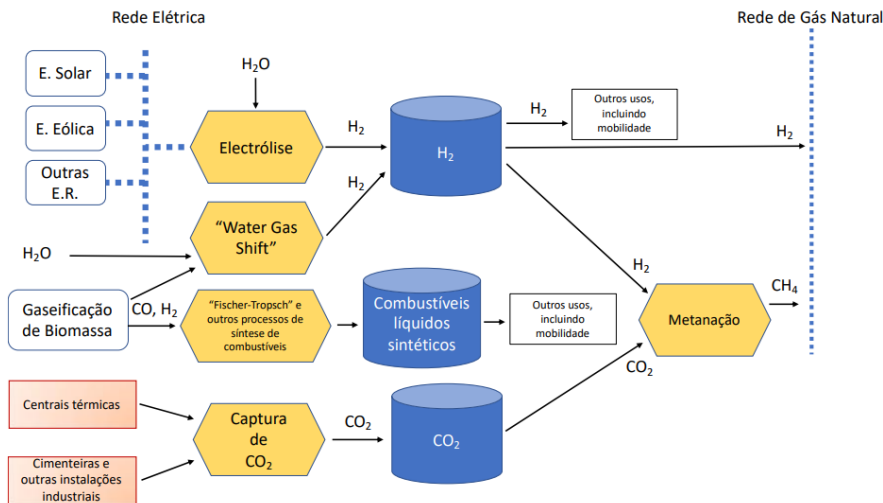


Figura 3.13 – Representação do sistema de armazenamento químico associado a energias renováveis (ADENE et al., 2021).

3.4.4. Armazenamento Térmico

O armazenamento térmico de energia pode ser realizado sob a forma de calor sensível, calor latente e energia termoquímica (figura 3.14).

O armazenamento sob a forma de calor sensível consiste no aquecimento de materiais que não alteram o seu estado durante a fase de acumulação, utilizando posteriormente o calor armazenado para distribuição térmica direta ou para produzir vapor de água que será utilizado para acionar um sistema turbina-gerador. O calor latente das reações de mudança de fase depende da utilização de materiais com elevada temperatura de fusão que, depois de fundidos e solidificados a uma determinada temperatura, são capazes de armazenar e libertar elevadas quantidades de energia. Os materiais com estas características apresentam como desvantagens o elevado custo, os problemas de transferência de calor, a limitada estabilidade a longo prazo e a baixa condutividade térmica. As reações termoquímicas e a absorção e adsorção de materiais podem também fornecer uma capacidade de armazenamento térmico, sendo essa capacidade superior em relação a todos os outros meios de armazenamento térmico.

Por outro lado, este tipo de armazenamento pode ser efetuado à escala local, por exemplo em edifícios ou na indústria ou em larga escala, por exemplo ao nível das redes de energia (ADENE et al., 2021).

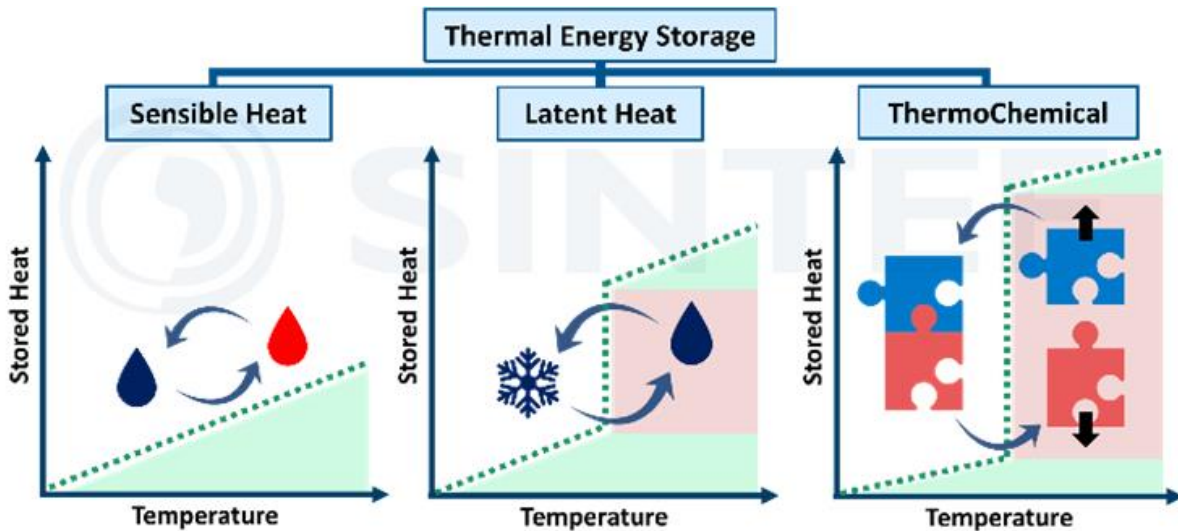


Figura 3.14 – Classificação dos sistemas de armazenamento térmico com variação de temperatura (SINTEF, 2022).

3.4.5. Armazenamento Eletroquímico

O armazenamento de energia por via eletroquímica cobre um conjunto de tecnologias onde se destacam as diversas famílias de baterias, primárias e secundárias, células de fluxo *redox*, células de combustível e supercondensadores eletroquímicos. Todas estas tecnologias encontram-se implementadas no mercado com diferentes estados de maturidade, e com valores de mercado muito distintos. As baterias encontram-se na linha da frente da transição energética e são uma solução muito competitiva ao longo de toda a cadeia de produção e distribuição descentralizada. As tecnologias de armazenamento de energia por via eletroquímica são vistas como uma prioridade em qualquer agenda relacionada com a transição energética e constituem uma forte preocupação na União Europeia. Esta preocupação está bem patente na iniciativa EBA250 na qual Portugal está fortemente envolvido e que visa estabelecer a liderança da Europa na produção de baterias. A figura 3.15 evidencia a organização das tecnologias de armazenamento eletroquímico e inclui a tecnologia dos supercondensadores pois as novas gerações de supercondensadores *redox* também envolvem processos eletroquímicos.

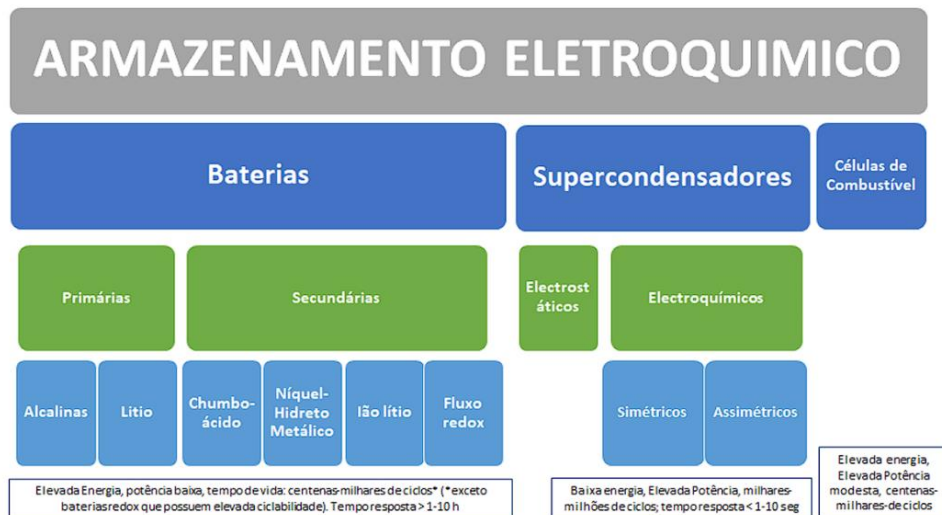


Figura 3.15 – Organização das tecnologias de armazenamento de energia por via eletroquímica (ADENE, 2021).

- **Baterias Primárias**

As baterias primárias, também designadas como baterias não recarregáveis, ou mais vulgarmente “pilhas”, são dispositivos que convertem energia química em elétrica. São baterias descartáveis, de única utilização e a tecnologia envolvida é muito simples. O dispositivo consiste num eletrólito sólido, líquido ou em pasta, num elétrodo positivo (ânodo), num elétrodo negativo (cátodo) e num separador, como mostra a figura 3.16. A corrente elétrica é gerada através de reações não reversíveis entre os materiais do elétrodo e o eletrólito e, enquanto a reação decorrer, a bateria produz energia. Uma vez consumido o material a bateria cessa a sua função, não sendo possível recarregá-la. Possuem uma elevada densidade de energia e boa capacidade de armazenamento, pelo que são essenciais em determinadas aplicações para as quais é necessária estabilidade e durabilidade. Nesta categoria de pilhas incluem-se as baterias de carbono-zinco, zinco-ar, baterias alcalinas de manganês, de óxido de prata-zinco, lítio, entre muitas outras. As mais comuns são as baterias primárias alcalinas, à base de manganês e as baterias primárias de lítio. São comercializadas em larga escala e não existe uma estimativa exata de produção acumulada destes dispositivos.

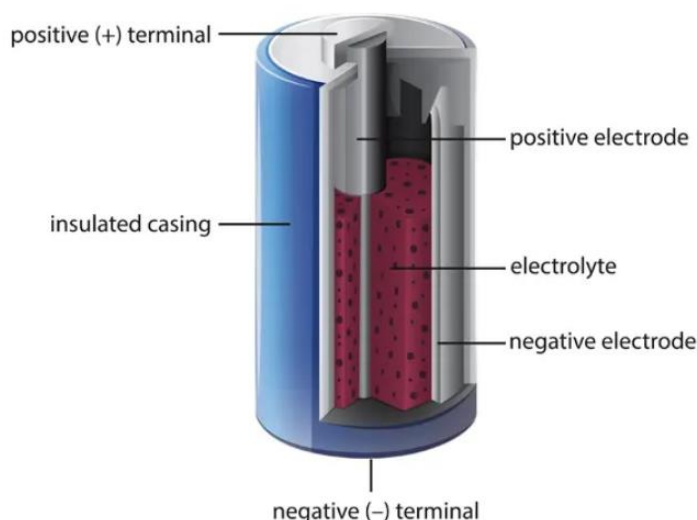


Figura 3.16 – Composição típica de uma bateria primária (TYCORUM, 2023).

São uma tecnologia amplamente comercializada e em contínuo desenvolvimento desde que foram construídas, pela primeira vez, em 1971. À presente data, representam cerca de 35% da procura global de baterias, das quais 65% correspondem a baterias alcalinas. As baterias alcalinas são as mais comuns no mercado e possuem uma voltagem de 1.5V, uma boa densidade de energia e uma auto-descarga de quase 10 anos. As matérias-primas são abundantes e o seu baixo preço e estabilidade permite-lhes uma vasta gama de aplicações, fiabilidade e bom desempenho. As baterias primárias de lítio destacam-se pela sua elevada tensão (>3V) e boa densidade energética, excelentes características de descarga, boa resistência a auto-descarga, segurança e estabilidade térmica.

Os fabricantes com mais expressão na Europa são a Cegasa International, Energizer, GP Batteries Europe, Eastman Kodak Company, Panasonic Energy Europe N.V., Procter & Gamble International Operations, Renata AG, Sony Europe Ltd, Systems Sunlight SA, VARTA Consumer Batteries GmbH & Co. KgaA. Em Portugal, as linhas de negócio mais relevantes (para além da venda a retalho) prendem-se com a reciclagem e recuperação de materiais utilizados na construção destas baterias.

- **Baterias Secundárias / Baterias de Iões de Lítio**

As baterias secundárias também transformam a energia química em elétrica mas, neste caso, o processo é reversível pelo que são passíveis de ser recarregadas e reutilizadas: no processo de descarga, a energia fornecida por uma fonte elétrica externa força a inversão da reação original, restaurando a composição original (que ocorre durante o funcionamento), restaurando a composição original dos materiais do eletrodo. As baterias secundárias mais comuns são as de chumbo (utilizadas comumente nos automóveis), as de iões de lítio e as de níquel-hidreto metálico (Ni-MH). No passado foram bastante utilizadas outras baterias

como as de níquel-cádmio (abandonadas devido ao preço e toxicidade do cádmio) ou as de níquel-ferro (muito robustas, mas suscetíveis a problemas de corrosão).

Tal como as pilhas, as baterias secundárias incluem na sua célula base um ânodo, um cátodo, uma membrana separadora e um eletrólito, evidenciado na figura 3.17. No caso das baterias de lítio, muito utilizadas na atualidade em veículos elétricos, o cátodo é constituído por óxidos metálicos litiados, nomeadamente, óxido de cobalto e lítio (LCO), óxido de manganês, lítio e níquel (LMNO), fosfato de ferro e lítio (LFPO), titanato de lítio (LTO) e óxido de alumínio, cobalto e lítio (LCAO). O ânodo é composto por um material que permita fácil intercalação de íons lítio, normalmente, carbono (grafite), compósitos de carbono e silício ou um óxido metálico de lítio e titânio. Os eletrólitos podem variar muito e vão desde eletrólitos líquidos, de gel, poliméricos ou mesmo sólidos.

A voltagem das baterias de Li situa-se tipicamente entre 3.5 e 4V e a sua energia específica situa-se entre 100-300 Wh/kg e a sua eficiência entre 80-95%.

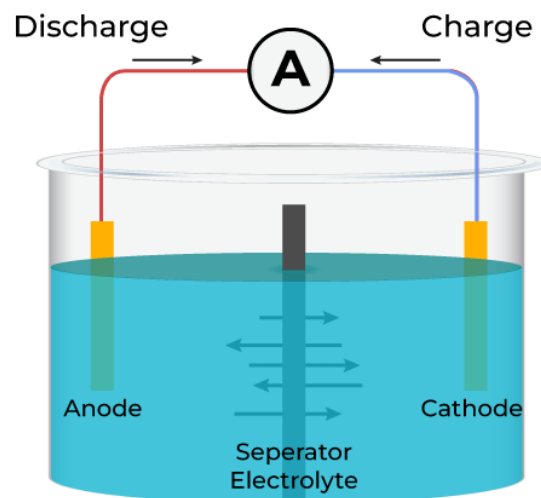


Figura 3.17 – Composição típica de uma bateria secundária (Geeks for Geeks, 2023).

Apesar do seu preço mais elevado, as baterias de íons de lítio podem também ser utilizadas em sistemas de reserva de energia e em sistemas de emergência. O seu maior mercado, em números e em valor é o que inclui toda a eletrónica portátil: telemóveis, computadores portáteis e dispositivos eletrónicos comuns. Estas baterias estão atualmente a ser consideradas para aplicações estacionárias, para armazenamento de energia renovável. O crescimento anual é elevado e estima-se que mais de 60% da capacidade instalada atualmente está afeta ao mercado automóvel, enquanto apenas 7% está afeto a armazenamento de energia renovável.

Existe um forte interesse na definição de métricas e requisitos para aplicação destas baterias em segunda vida para aplicações estacionárias e estão a ser desenvolvidos vários projetos piloto nesse sentido, inclusivamente em Portugal. Na Europa destaca-se a atividade da Nissan e da empresa Eaton que instalaram um sistema de armazenamento de energia solar com baterias usadas Nissan, no estádio do Ajax em Amsterdão. Em Portugal destaca-se o projeto 2Life liderado pela EDP.

A reciclagem de grandes volumes de baterias usadas de iões de lítio e o seu armazenamento seguro são alguns dos desafios a enfrentar no futuro. Portugal está a avaliar algumas iniciativas nesse sentido, e algumas empresas já estão a desenvolver projetos relevantes como é o caso da Valorcar e da Zeev (ADENE et al., 2021).

Segundo a Enel X (2024), devido à crescente procura de tecnologia de energia limpa, como baterias, turbinas eólicas, painéis solares ou veículos elétricos, prevê-se que a produção de minerais como o lítio, cobalto e grafite aumente significativamente. Dessa maneira, os atuais avanços técnicos e iniciativas para eletrificar a economia dependem fortemente de baterias de iões de lítio. Devido ao seu desempenho, eficiência e segurança superiores comparativamente às baterias convencionais, estas baterias tornaram-se as preferidas para a maioria dos carros elétricos. A instalação de sistemas de armazenamento de energia por bateria em centrais termoelétricas permite armazenar a eletricidade produzida para que esteja disponível para uso posterior. Esta solução destina-se a dar uma resposta definitiva a quem continua a duvidar da fiabilidade das renováveis e da possibilidade de ter sistemas elétricos 100% verdes.

- **Células de fluxo *Redox***

São baterias secundárias que armazenam energia graças à oxidação e redução de espécies eletroativas solúveis num eletrólito, tipicamente ácido, que é armazenado em tanques. Este eletrólito é bombeado através de eletrodos onde ocorrem as reações que armazenam energia quando a bateria é carregada ou que fornecem energia quando a bateria é descarregada.

As baterias de fluxo *redox* mais comuns, e num estado de maturidade comercial são as de vanádio, como ilustra a figura 3.18. São simples de operar, robustas e possuem uma boa densidade de energia (ADENE et al., 2021). Segundo Ha et al. (2015), são uma tecnologia muito fiável e podem ser carregadas e descarregadas durante milhares de ciclos, o que lhes confere tempos de vida muito longos e custos de operação mais baixos. São mais baratas, mais fiáveis e mais seguras do que as baterias à base de lítio e a sua potência e a energia

podem ser definidas de forma independente, o que as torna muito competitivas, quer do ponto de flexibilidade quer do ponto de vista de investimento inicial, face a outras tecnologias.

Redox Flow Battery

Principle of Cell Design

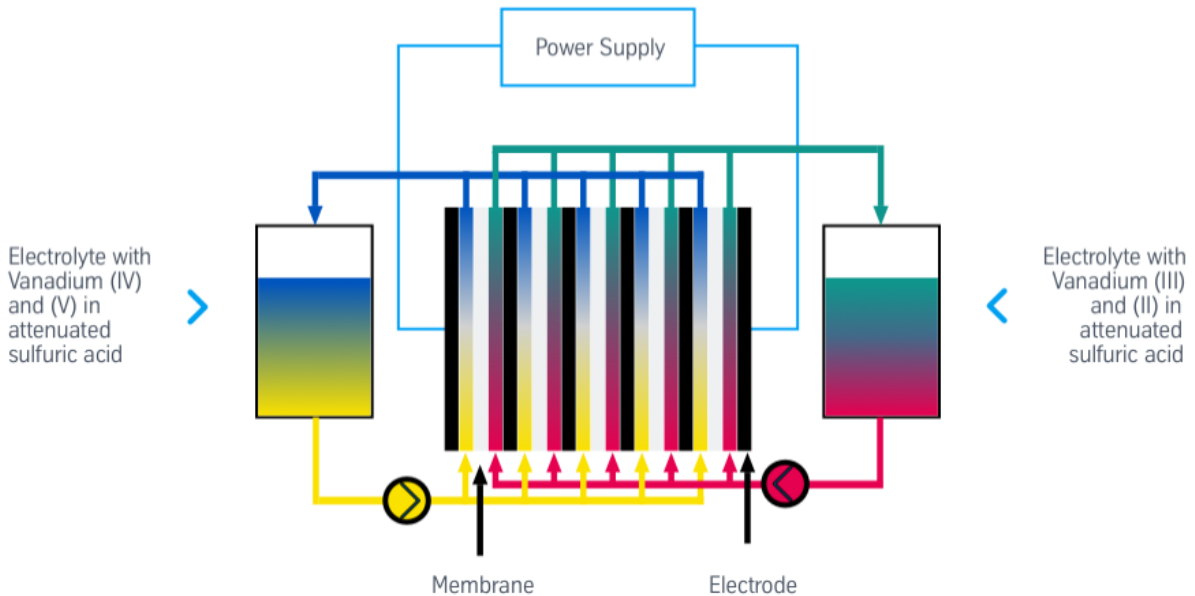


Figura 3.18 – Composição típica de uma célula de fluxo *redox* de vanádio (Thyssenkrupp, 2024).

- **Células de Combustível**

As células de combustível (sendo o conjunto de diversas células de combustível designado por pilha de combustível) são um dispositivo de conversão de energia implementado no mercado há várias décadas. Tal como as anteriores, estas células são compostas por 2 elétrodos, o ânodo e o cátodo, e um eletrólito. No cátodo o principal reagente é o oxigénio do ar enquanto no ânodo se pode alimentar por exemplo por hidrogénio, sendo estas as células mais atrativas. O principal produto obtido é a água, daí que sejam consideradas dispositivos amigos do ambiente. O interesse crescente na economia do hidrogénio produzido a partir de fontes renováveis tem vindo a estimular novos desenvolvimentos a nível das células de combustível de hidrogénio no sentido de aumentar a sua eficiência e, simultaneamente, reduzir os seus custos. As métricas são muito variadas, dependem do tipo de célula de combustível, mas podem ser encontrados no mercado sistemas de alguns Watts até sistemas mais vocacionados para aplicações industriais na ordem dos MegaWatts. A sua eficiência situa-se em média nos 50% e o seu tempo de vida estende-se por alguns anos. As principais aplicações incluem: o setor dos transportes, nomeadamente automóvel e transportes públicos citadinos, o setor residencial e comercial e aplicações ao nível da rede elétrica.

Os custos associados a veículos movidos a células de combustível são significativamente mais altos que os das baterias, mas poderão vir a decrescer com a dinamização do mercado

de hidrogénio. No entanto, o custo do hidrogénio, considerando produção e armazenamento, ainda não é suficientemente competitivo. A implementação a larga escala requer uma rede de distribuição de hidrogénio que na maior parte dos países da Europa, incluindo Portugal, não está implementada (ADENE et al., 2021). A figura 3.19 ilustra a constituição típica de uma célula de combustível.

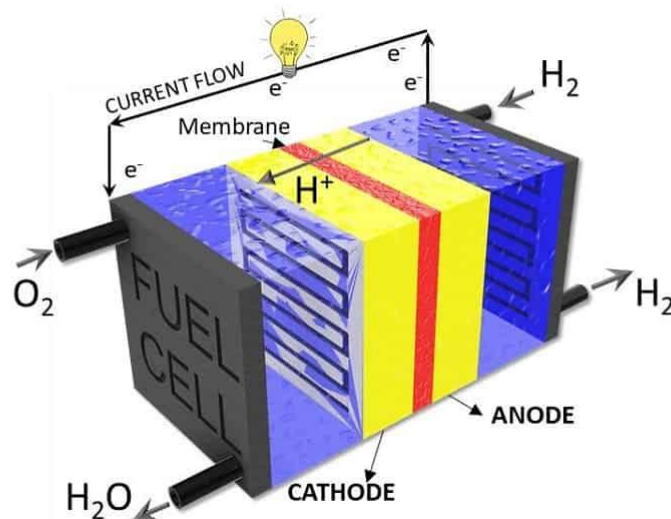


Figura 3.19 – Composição típica de uma célula de combustível (Olhar Digital, 2023).

3.4.6. Supercondensadores

Os supercondensadores são dispositivos de armazenamento de energia, com composição semelhante à das pilhas e baterias (dois elétrodos, separados por uma membrana, imersos num eletrólito), que têm como vantagem possuírem uma excelente densidade de potência (são capazes de fornecer energia quase instantaneamente) e elevado tempo de vida (suportam milhões de ciclos de carga e descarga) embora apenas consigam armazenar quantidades relativamente baixas de energia. Devido à sua estrutura distinta e aos mecanismos de armazenamento inerentes destes dispositivos, podem ser identificados três tipos principais de supercondensadores: supercondensadores elétricos de dupla camada, pseudo-condensadores e supercondensadores híbridos. A representação esquemática de cada um pode ser observada na figura 3.20.

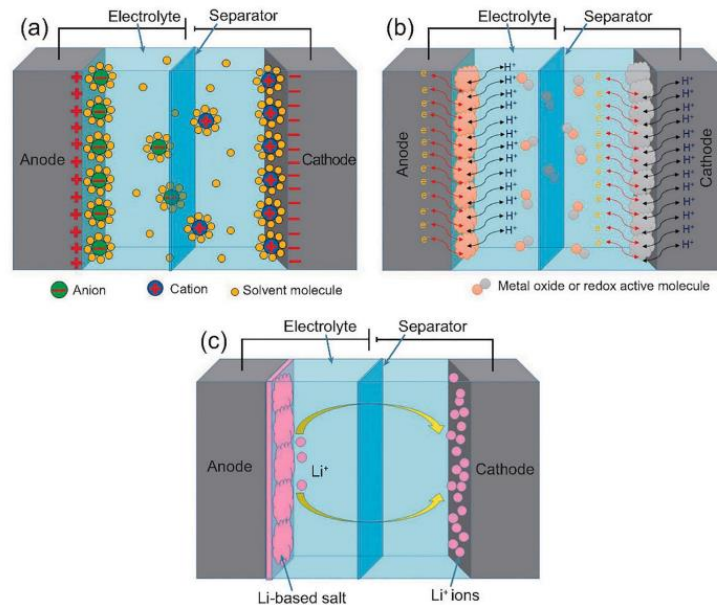


Figura 3.20 – Representação Esquemática de um: (a) EDLC, (b) Pseudo-Supercapacitor, (c) Supercondensador Híbrido (Zhang, J. et al., 2023).

- **Supercondensadores elétricos de dupla camada**

Os supercondensadores elétricos de dupla camada (EDLC – *electrochemical double layer capacitors*) armazenam energia graças à acumulação de espécies carregadas, presentes no eletrólito, na superfície de um material de elevada área específica. Esta interação, puramente física (eletrostática), armazena pouca energia mas envolve processos muito rápidos pelo que os EDLC apresentam uma elevada densidade de potência e baixa densidade de energia, podendo ser carregados/descarregados inúmeras vezes. Tradicionalmente estes dispositivos usam como elétrodos o carbono ativado. Recentemente, com vista a melhorar o seu desempenho, nomeadamente a densidade energética, têm sido propostos na literatura novos materiais de elétrodo como o grafeno, óxido de grafeno reduzido, grafite, nanotubos de carbono, biochar, carbono mesoporoso (Zhang et al., 2023). Estes tipos de materiais são escolhidos pois teoricamente, os EDLC necessitam de elétrodos com uma área superficial significativa e condutividade superior, um requerimento que os materiais carbónicos mencionados cumprem.

Os supercondensadores convencionais de carbono são constituídos por dois elétrodos de carbono ativado, i.e carbono de elevada área superficial, imersos num eletrólito orgânico (que permite aumentar a voltagem), isolados um do outro por um separador, como ilustra a figura 3.21.

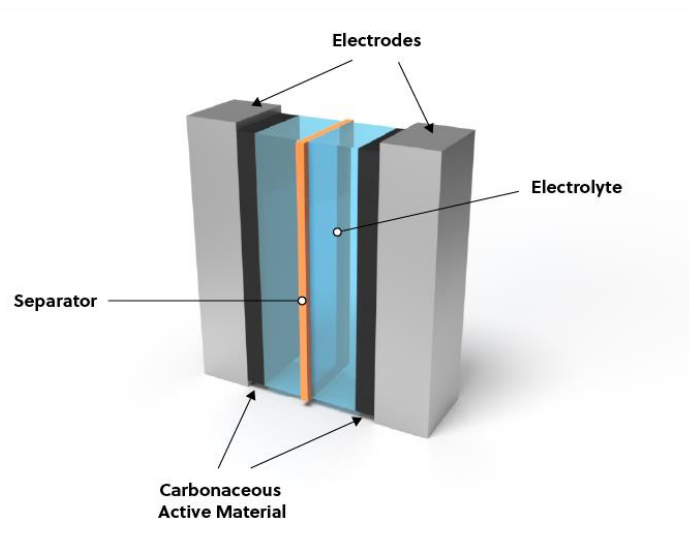


Figura 3.21 – Construção geral de um supercondensador (CAS Science Team, 2023).

Estes supercondensadores são produzidos em diferentes formas e tamanhos e a sua capacidade vai de alguns microfarads até milhares de Farads. A sua densidade de energia é tipicamente inferior a 10Wh/kg enquanto que a sua potência é superior a 1 Kw/kg. O seu tempo de vida garante até milhões de ciclos com perdas de eficiência inferiores a 10%.

Os supercondensadores de dupla camada são uma tecnologia perfeitamente implementada no mercado e são utilizados numa larga variedade de aplicações. O seu mercado tem vindo a crescer significativamente graças às aplicações no setor automóvel (sistema *start/stop*), recuperação de energia da travagem, auxiliares de baterias) e no setor da eletrónica de consumo (*smartphones*, câmaras portáteis), sistemas de emergência e mesmo em transportes pesados (autocarros, escavadoras e comboios, especialmente para suportar picos de potência, salvaguardando a vida da bateria). Possuem bastante interesse para gestão de rede e para redução de picos (“*peak shaving*”). A sua implementação em sistemas de conversão, armazenamento e gestão de energia é ainda pouco expressivo. Estima-se que o seu mercado venha a crescer entre 12% e 20% ao ano e que a Europa venha a absorver 25% deste mercado. Em termos ambientais o seu impacto não é desprezável porque utilizam eletrólitos orgânicos que possuem alguma toxicidade. Os restantes componentes são recicláveis embora este negócio tenha pouca expressão na Europa. A União Europeia tem estimulado mecanismos que visam a substituição destes eletrólitos por outros mais amigos do ambiente.

No contexto europeu existem algumas empresas em franca expansão, como a Skeleton Technologies, por exemplo. No setor da produção em massa, a Maxwell é a maior produtora

mundial, com forte expressão na Europa. Recentemente parte desta empresa foi adquirida pela Tesla.

- **Pseudo-Supercondensadores**

Uma característica que distingue este tipo de supercondensadores dos EDLCs é o envolvimento de processos reacionais que ocorrem durante o armazenamento ou libertação de energia (Wang, Y. F. et al., 2021). Neste caso o mecanismo de armazenamento de energia é semelhante ao das baterias, mas utiliza reações *redox* de superfície mais rápidas. Consequentemente os pseudo-supercondensadores possuem uma capacidade específica muito superior aos EDLCs, sendo capazes de armazenar muito maiores valores de energia. No entanto, o facto de haver envolvimento de processos químicos e não apenas eletrostáticos torna o processo de carga/descarga mais lento que o dos EDLCs. Por outro lado, as reações *redox* podem levar a transformações irreversíveis dos materiais de eléctrodo e sua consequente degradação, pelo que o tempo de vida este tipo de dispositivos é menor comparado com EDLCs.

São utilizados vários materiais avançados nos eléctrodos dos pseudo-supercondensadores, como os materiais baseados em óxidos de metais de transição (manganês, ruténio ferro níquel, cobalto etc.) e seus compósitos com materiais carbonosos para aumentar a condutividade. (Xu, H. B. et al., 2010). Destacam-se entre estes os pseudo-supercondensadores à base de óxido de manganês.

- **Supercondensadores Híbridos**

Os supercondensadores híbridos combinam os dois tipos de mecanismo de armazenamento de carga: supercondensador *redox* e EDLC. Para tal utilizam cátodos de metais de transição (óxido de manganês por exemplo) e ânodos de materiais carbonosos (Liu, H. et al., 2020).

Adicionalmente aos materiais de carbono, Naoi et al. (2010) afirmam que foram implementados em supercondensadores híbridos vários materiais funcionais para melhorar a sua performance, tais como componentes de lítio, de níquel e de cobalto, entre outros. Estes materiais são usados como eléctrodos ou combinados com materiais com carbono como base para melhorar ainda mais a sua eficiência. Estas abordagens inovadoras aumentaram significativamente a performance dos supercondensadores híbridos ao combinar as vantagens tanto dos supercondensadores como das baterias.

O mercado dos supercondensadores está também representado em Portugal, através da empresa C2C-NewCap que visa implementar no mercado novas soluções de hibridização

utilizando para o efeito supercondensadores assimétricos, de níquel essencialmente para aplicações no setor automóvel. Estes possuem a vantagem de utilizar eletrólitos aquosos mais amigos do ambiente e um elevado nível de reciclabilidade (ADENE et al., 2021).

No contexto dos supercondensadores, este trabalho tem como objetivo a definição do tempo de vida de novos materiais recorrendo à aceleração do seu envelhecimento através da utilização de ensaios acelerados de vida.

3.5. Importância do armazenamento eletroquímico na Transição Energética

O mundo está a evoluir rapidamente e a indústria dos transportes e da mobilidade não é exceção. Com o rápido progresso na tecnologia, a mobilidade está a atravessar uma transformação significativa, com novas tecnologias e serviços emergentes que têm o potencial de revolucionar a maneira como nos movemos.

Segundo Chen et al. (2020) e Paiva et al. (2021), a eletrificação vai ter um papel essencial na modificação deste setor e tem oferecido grandes oportunidades nos recentes anos incluindo a redução das emissões de CO₂ e dos impactos ambientais criados no transporte. Com efeito, um dos desenvolvimentos e tendências mais significativos é a transição de veículos de combustão interna para veículos eletrificados. Os veículos elétricos (EVs) são movidos a baterias em vez de combustíveis fósseis e produzem zero emissões quando são operados. Desta maneira, os veículos elétricos são opções mais sustentáveis. Adicionalmente, a redução de custo das baterias e os avanços nas infraestruturas de carregamento fazem dos EVs uma escolha mais atrativa para todas as pessoas. (Chen et al., 2020; Foadelli et al., 2018; Paiva et al., 2021).

As taxas de crescimento da indústria das baterias foram de 30% na última década e é expectável que cresça cerca de 20% nas próximas duas décadas. Até 2010, a maioria da capacidade de armazenamento eletroquímico era em baterias chumbo-ácido (LAB), com 300GWh de armazenamento novo instalado anualmente (Pilot, C., 2022). Desde 2010 que o foco mudou para baterias de íões de Lítio (LIBs). Inicialmente, as LIBs eram utilizadas em dispositivos eletrónicos portáteis, no entanto agora, estas baterias dominam nos veículos elétricos. Com este crescimento rápido, a preocupação relativamente à disponibilidade e ao impacto ambiental tem sido cada vez mais importante (Helbig, C. et al., 2018; Mohr, M. et al., 2020).

Efetivamente, o crescimento repentino do mercado das baterias levou a um aumento exponencial da procura dos materiais que compõem as baterias (cátodos, ânodos, separadores, eletrólitos, conectores, revestimentos e invólucros, equipamentos de segurança e sistemas de gestão), com consequentes impactos ambientais na cadeia de abastecimento, na mineração, processamento e nas fases de fabrico (Mohr, M. et al., 2020).

A economia circular é um conceito que mantém os materiais num ciclo. É uma alternativa à economia tradicional e linear onde os recursos são usados na produção e consumo para fornecer utilidade às pessoas e à sociedade. Para além disso, a economia circular gera pouco a nenhum desperdício (Andersen, M.S., 2007). As baterias são um setor promissor para estabelecer uma economia circular pois representam um mercado em crescimento, com elevado índice de procura de material. O seu setor está sujeito a mudanças tecnológicas e os benefícios desta mudança promoveriam a transição para tecnologias *low-carbon* (Kirchherr, J. et al., 2017).

Para as LIB's, é ainda mais proeminente o desafio de instalar uma economia circular funcional. As LIB's têm diferentes tamanhos, formas, tipos e composições em termos de material, que afeta a separação do desperdício e a metalurgia no processo de reciclagem. As células consistem em coletores de corrente de alumínio e cobre, ânodos e cátodos feitos de materiais ativos, capas de carbono, o eletrodo e um separador poroso. A célula, o cátodo e o ânodo formam o módulo da bateria.

Tecnologicamente, tem existido um grande debate e muito desenvolvimento no que toca a materiais ativos do cátodo, com as opções níquel-cobalto-alumínio, níquel-manganésio-cobalto e ferro-fosfato sendo as opções mais escolhidas para baterias de veículos elétricos (Li, W. et al., 2020). Consequentemente, a procura e fluxo de fim de vida de materiais como o lítio, o cobalto e o níquel continuará a aumentar (Xu, C. et al., 2020).

A figura 3.22 demonstra uma estimativa da atual e futura procura de materiais como o lítio, níquel, cobalto, manganésio, cobre e grafite.

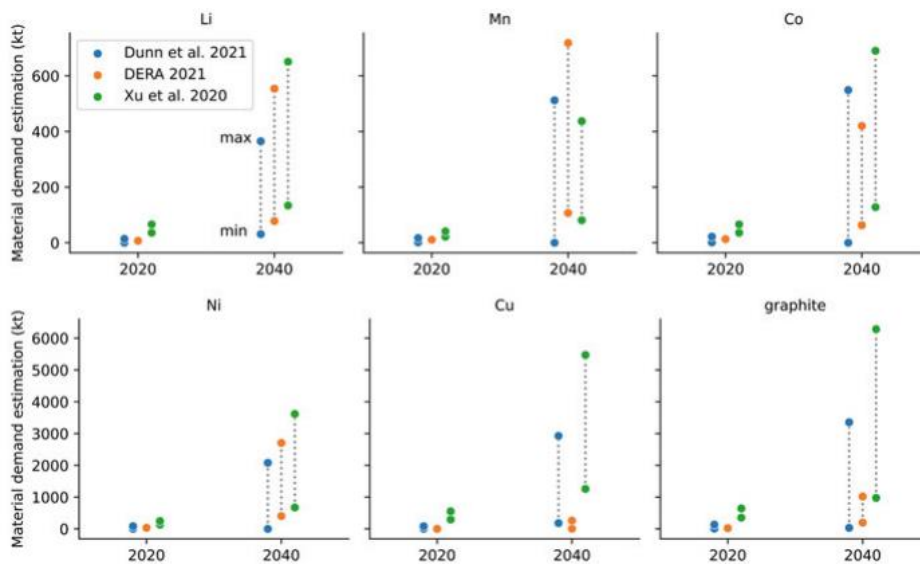


Figura 3.22 - Estimativa mínima e máxima da procura de materiais (Li, Ni, Co, Mn, Cu, grafite) para 2020 e 2040 (Xu, C. et al., 2020).

A Agência Internacional da Energia estima que em 2040, cobre, lítio e níquel reciclados de baterias gastas possam reduzir as necessidades de abastecimento primárias para estes minerais em 10% (IEA, 2022).

3.6. Supercondensadores em aplicações renováveis

Durante muitos anos, a produção de energia proveniente via fontes renováveis não esteve alinhada com os períodos onde os consumos de energias alcançavam o seu pico, levando a um desperdício significativo de energia no dia-a-dia. Assim, apesar dos seus inúmeros benefícios, como ilustra a figura 3.23, persistem algumas dificuldades em implementar essa energia em diferentes cenários do quotidiano. Por exemplo, os painéis fotovoltaicos conseguem transformar luz solar em eletricidade apenas quando a luz solar está disponível exigindo por isso sistemas de armazenamento dessa energia. O mesmo é válido no caso de energias sazonais, como a proveniente do vento e das marés.

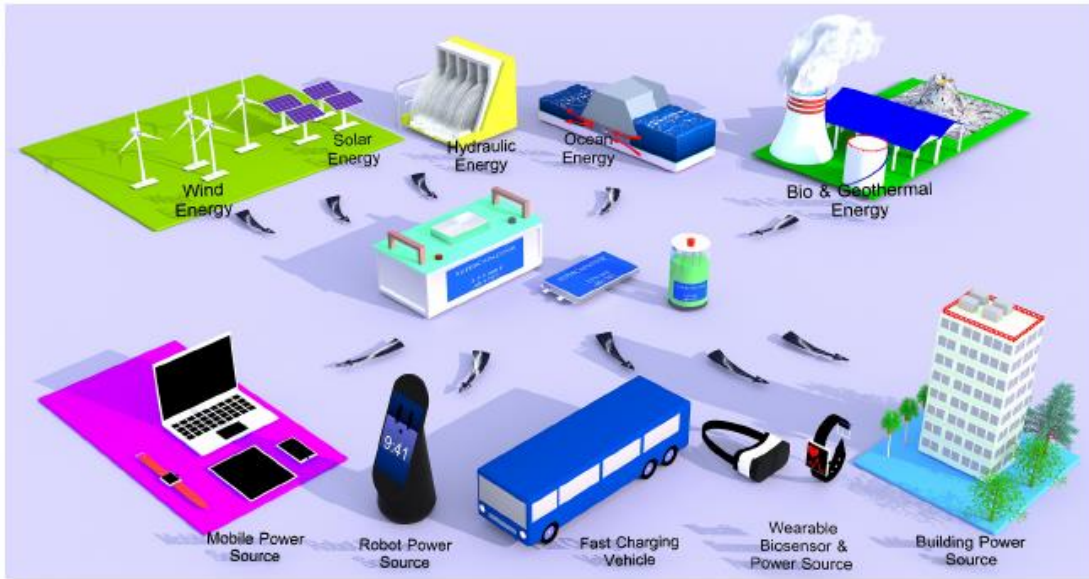


Figura 3.23 – Energias Renováveis e Aplicações dos Sueprcondensadores (Zhang, J. et al., 2023).

Convencionalmente, existem vários tipos de armazenamento de energia: baterias, condensadores eletrostáticos e supercondensadores (também conhecidos como condensadores eletroquímicos). Tal como o gráfico da figura 3.24 ilustra, estes últimos dispositivos preenchem a lacuna que existia entre os condensadores e as baterias, caracterizando-se por apresentarem maior capacidade de armazenamento relativamente aos condensadores e uma maior densidade de potência (tempos de carga-descarga menores) relativamente às baterias (Liu, W., et al., 2013) (Winter, M. et al., 2004).

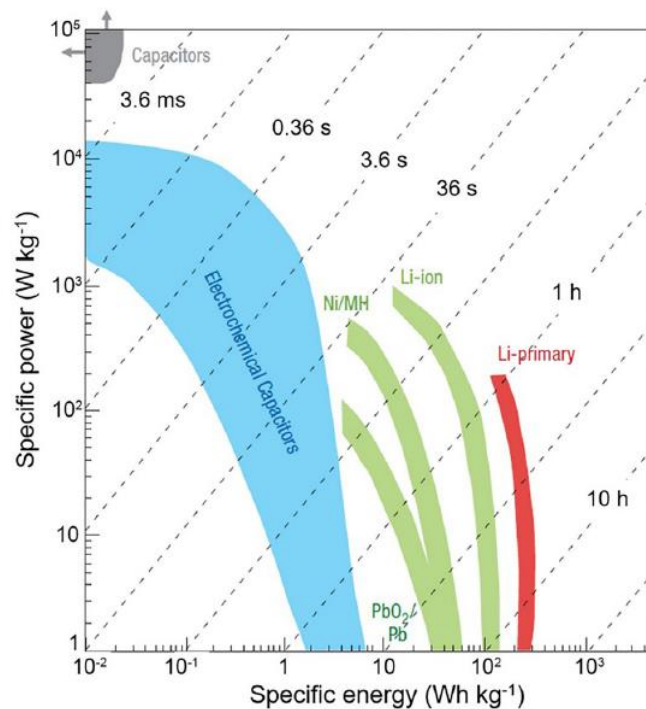


Figura 3.24 - Gráfico de Ragoone para diferentes dispositivos de armazenamento de energia (P. Simon et al., 2008).

A tabela 3.2 mostra as diferenças entre estes dispositivos de armazenamento de energia. Os supercondensadores têm uma vantagem competitiva sobre os condensadores e as baterias, compensando a incompatibilidade entre a alta densidade de energia e baixa densidade de potência das baterias, e as características inversas dos condensadores.

Tabela 3.2 – Comparação entre tipos típicos de armazenamento de energia. Adaptado de: Zhang, J. et al. (2023).

Tipologia	Capacidade Específica	Densidade de Energia	Retenção de Capacidade	Fonte
Bateria	999.0 mAh	106.4 Wh kg ⁻¹	88.3% (8000 ciclos)	Niu, J. et al., 2018
Supercondensador	209.0 Fg-1	59.9 Wh kg ⁻¹	95% (300h, 3.5V)	Yang, X. et al., 2013
Condensador	26.0 pF	4.1 Wh kg ⁻¹	N/A	Tang, H. et al., 2012

Os supercondensadores e as baterias podem ser integrados para criar um sistema de armazenamento de energia onde o objetivo chave é amplificar os pontos fortes e mitigar as fragilidades de cada um.

- **Aplicações na energia solar**

Neste momento, as baterias são regularmente usadas para armazenar as quantidades significativas de energia gerada pelas células fotovoltaicas solares. No entanto, o seu tempo de vida é limitado devido às oscilações no fornecimento de energia e ao consumo intermitente, o que pode danificar a capacidade do sistema de armazenamento de energia. Os supercondensadores têm vindo a ser introduzidos como alternativas às baterias para armazenamento de energia em sistemas fotovoltaicos para ultrapassar as limitações associadas às baterias, já que oferecem potenciais soluções para os desafios que as baterias têm dificuldade em resolver: garantem maior estabilidade durante a sua vida útil, ciclos rápidos de carga-descarga e densidade de potência elevada. A incorporação de supercondensadores num sistema deste tipo otimiza a resposta de potência, melhorando tanto a qualidade como a eficiência do processo de armazenamento e oferta da energia armazenada (Kularatna, N. et al., 2015) (Yun, J. et al., 2018).

Um sistema de armazenamento de energia híbrido (HESS – *Hybrid Energy Storage System*) combina as características dos supercondensadores e das baterias, melhorando a robustez do sistema e aborda o desafio da instabilidade na conversão e armazenamento da energia (Luta, D.N. et al., 2019).

Nestes sistemas, os supercondensadores são implementados para mitigar as flutuações de energia com altas frequência em situações de curta duração enquanto que as baterias conseguem manter valores de tensão pré-definidos para o sistema, devido às suas características elétricas estáveis superiores. Para além disso, a utilização de um supercondensador em um sistema pode reduzir o custo das baterias e de manutenção. O tempo de vida de uma bateria pode também ser estendida pois o supercondensador pode suportar teoricamente um número infinito de ciclos de carga e descarga (Chia, Y.Y. et al., 2015).

- **Aplicações na energia eólica**

A eficiência da conversão do vento em energia é afetada significativamente por variáveis ambientais devido à inconsistência nas velocidades do vento. Esta inconsistência traduz-se em flutuações de energia no output de potência da turbina, dificultando a geração de uma energia fiável e de qualidade, que é vital em sistemas de energia. Estas flutuações também dependem bastante no *output* de potência do espectro de frequência durante a produção de energia eólica. Os ESS, ou HESS, foram desenvolvidos para responder essas deficiências na energia eólica já que a adição de supercondensadores pode aliviar flutuações de tensão de curta duração de tensão (Abbey, C. et al., 2005; de Carvalho, W. C. et al, 2020; Park, G.L et al., 2013).

Perera et al. estabeleceram um sistema de alimentação que incorpora um sistema de armazenamento de energia híbrido consistindo numa bateria e um supercondensador. Este sistema facilitou a manutenção de uma tensão constante perante uma gama de frequências tolerável, utilizando energia vinda de um gerador de energia eólica. Nesta configuração, o supercondensador serviu para proteger a bateria de zonas de alta taxa de descarga, estendendo assim a sua vida útil. O componente de alta frequência de energia foi gerido pelo supercondensador e o componente de baixa frequência pela bateria. A utilização deste HESS num gerador de energia eólica providenciou benefícios tais como uma redução de 45% na perda de capacidade da bateria, levando a uma redução no seu preço de 5% (Mendis, N. et al., 2012).

- **Aplicações em veículos elétricos**

Como já foi falado anteriormente, os HESS têm a capacidade de melhorar *outputs* de potência, comparativamente ao uso isolado de baterias de iões de Lítio. Neste contexto, os supercondensadores têm vindo a ser implementados em veículos elétricos para mitigar a baixa densidade de potência, os longos ciclos de carga, os tempos de ciclos carga/descarga

limitados e outras preocupações inerentes à utilização exclusiva de baterias. A figura 3.25 ilustra a utilização de um supercondensador num sistema regenerativo de um amortecedor, que prolonga a vida de uma bateria de um carro elétrico. Tipicamente, a energia absorvida por um amortecedor é dissipada por fricção e calor. O sistema sugerido permite capturar a energia mecânica e convertê-la em energia elétrica, que é armazenada num supercondensador (Zhang, Z.T. et al., 2016).



Figura 3.25 – Esquema de uma proposta de regeneração de energia numa suspensão de um carro (Zhang, Z. T. et al., 2016).

- **Aplicações na inteligência artificial**

Com o rápido avanço da tecnologia e do desenvolvimento da economia global, surge uma procura exponencial por equipamentos operados por inteligência artificial, como os robôs. É crucial desenvolver-se um sistema inteligente de controlo que consiga lidar eficientemente com as diversas cargas a que um robô está sujeito durante longos períodos. A figura 3.26 ilustra algumas aplicações de supercondensadores em diferentes dispositivos, mais em específico demonstrando um robô inteligente com uma mão prótica acionada por um supercondensador. O robô demonstra um controlo muito exato dos dedos, permitindo manusear objetos mais pequenos com grande precisão (Nigam, R. et al., 2020). O sistema de controlo permite ao robô que opere sem dificuldades em várias condições de funcionamento, graças à capacidade da unidade de energia.

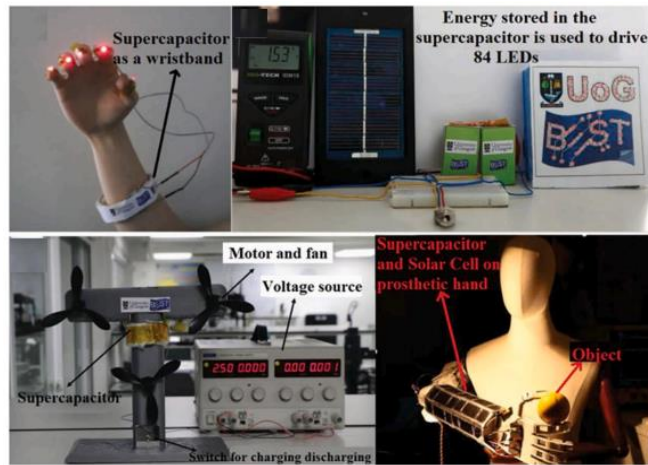


Figura 3.26 – Aplicações de supercondensadores em vários dispositivos portáteis (Nigam, R., et al. 2020).

Capítulo 4 – Ensaaios Acelerados de Vida

4.1. Introdução

O rápido desenvolvimento tecnológico, aumento da exigência por parte do consumidor e um mercado altamente competitivo aumentaram a pressão do lado dos fabricantes para entregar produtos com uma maior qualidade e fiabilidade. Aliado a isso, existe também um acréscimo na pressão para reduzir o tempo entre a conceção e o fabrico, com a condicionante de fabricar um produto com uma alta fiabilidade.

Alcançar esses objetivos requer mais atenção para a fiabilidade numa etapa mais inicial no processo de design do produto e tem levado à inclusão de várias metodologias dentro da área da qualidade como o “*Design for Reliability*” e “*Design for Six Sigma*”. Consequentemente, houve um aumento da necessidade para a realização de ensaios em materiais e produtos, normalmente acompanhados de ensaios em sistemas e subsistemas.

Os clientes tendem a antecipar que os produtos funcionem corretamente durante anos ou até décadas. Por exemplo, um frigorífico é expectável que funcione sem falhas por pelo menos uma década. Realizar testes e ensaios com condições normais de funcionamento durante longos períodos tem probabilidades muito baixas de se alcançar a falha e, para além disso, poucos resultados se retiram acerca da fiabilidade do produto. Desta maneira, os fabricantes realizam ensaios acelerados nos seus produtos ao expô-los a condições mais agressivas de maneira a provocar falhas nos produtos com o intuito de recolher informação importante acerca da sua fiabilidade, de uma maneira rápida (Pascual, F. et al., 2006).

Segundo Collins et al. (2013), e com base na norma ISO (1986), fiabilidade é a capacidade de um componente de realizar uma determinada função sob condições ambientais e operacionais definidas e durante um certo período de tempo. Paraphrasing Aitchison e Dunsmore (1975), define-se como predição (*prediction*) o uso de informação retirada de um teste realizado com o objetivo de formular uma conclusão sustentada relativamente a resultados retirados de ensaios futuros.

Em estudos de fiabilidade, o termo “falha” ou a “avaria” de um componente define-se como o instante em que o componente cessa a sua função, ou deixa de conseguir desempenhar as suas funções na totalidade.

É cada vez mais crucial determinar-se e/ou prever-se o tempo até à falha de um componente pois:

- **Permite planejar-se a manutenção** – As organizações e empresas podem assim definir tarefas de manutenção preventiva ou substituições antes que o componente falhe. Esta abordagem reduz o risco de paragens de produção, minimiza tempos mortos e otimiza custos de manutenção
- **Aumenta-se a fiabilidade e a segurança** – Componentes em fim de vida tornam-se menos fiáveis e ficam propensos a avarias ou falhas. Ao identificar o tempo até à falha, as organizações tomar medidas proativas de modo a garantir a segurança e prevenir acidentes ou falhas críticas. Isto é particularmente importante em sistemas crítico tais como equipamento aeronáutico, médico e de transporte, onde a falha do componente pode provocar consequências severas.
- **Otimização de Custos** – Os componentes têm uma duração de vida útil limitada, e substituí-los precocemente resulta num aumento desnecessário de custos. Por outro lado, adiar a substituição para lá do tempo até à falha expectável de um componente pode aumentar os tempos mortos, os custos de reparação e a probabilidade de danificar outros componentes dos sistemas. Ao determinar o tempo até à falha, as organizações podem melhorar as suas estratégias de manutenção e substituição, alcançando um equilíbrio entre custos e performance.
- **Gestão de Stocks** – Permite prever a reposição necessária, minimizando interrupções na produção e evitando excesso de inventário.
- **Otimização da Performance** - Permite a antecipação de manutenções e minimiza paragens não planeadas, garantindo eficiência e fiabilidade no sistema.

4.2. Identificação dos vários modelos de ensaios acelerados de vida

Os ensaios acelerados de vida (ALT – *Accelerated Life Testing*) e os ensaios acelerados de degradação (ADT – *Accelerated Degradation Testing*) são métodos de testagem que consistem na aceleração do envelhecimento/degradação de um produto ao submetê-lo a condições de funcionamento fora do intervalo de utilização em condições normais. Estas condições podem incluir, mas não são limitadas, a cargas mecânicas, temperatura, vibrações e ciclos de *ON/OFF*. O objetivo destas metodologias de ensaio, em conjunto com um modelo estatístico para o efeito do fator de aceleração, é de permitir a estimativa ou predição do tempo de vida útil de um componente, a partir de um intervalo de tempo bastante mais reduzido (Collins et al., 2013).

Os ensaios acelerados envolvem a aceleração do surgimento de falhas com o único propósito de quantificar as características de vida de um produto em condições normais de utilização. Mais especificamente, os ensaios de aceleração de vida podem ser divididos em dois tipos:

1. Ensaios qualitativos (HALT, HAST, *torture tests*, *shake and bake tests*, etc.).
2. Ensaios quantitativos.

Nos ensaios qualitativos, quem realiza o ensaio tem como principal interesse identificar falhas e modos de falha sem especial interesse em prever tempos até à falha do produto sob condições normais de utilização. Nos ensaios quantitativos, o interesse está na predição da vida do produto (características como o *Mean Time To Failure* (MTTF), vida B (10), etc.), a partir de informação recolhida do ensaio acelerado.

Todos os ensaios que são considerados acelerados dão informações sobre o produto e os seus respetivos mecanismos de degradação e falha.

1. Ensaios Qualitativos

São realizados em populações reduzidas, onde o produto é sujeito a um ou múltiplos níveis intensos de carga. Se o produto não falhar, passou no ensaio. Pelo contrário, se falhar, irão ser tomadas medidas apropriadas para melhorar o seu design e fabrico de modo a eliminar essas falhas.

Os ensaios qualitativos são usados principalmente para revelar modos de falha prováveis. No entanto, se não forem devidamente realizados, são capazes de fazer o componente falhar de um modo que não iria acontecer sob condições normais. Em geral, os ensaios qualitativos não são concebidos para revelar informações que possam ser usados em futuras análises de vida de componentes. Não quantificam a vida ou fiabilidade do produto segundo condições normais de funcionamento, no entanto, fornecem informação valiosa no que toca aos tipos e níveis de carga que se queiram aplicar em consequentes ensaios mais quantitativos.

As vantagens dos ensaios qualitativos são:

- O aumento da fiabilidade através da deteção de modos de falha;
- Fornecem informações úteis caso haja ensaios quantitativos posteriores.

A condicionante, por outro lado, é:

- Não quantificam a fiabilidade do produto em condições normais de funcionamento (Reliasoft HBK, 2024).

2. Ensaios Qualitativos

Estes ensaios consistem em testes realizados para quantificar as características da vida de um produto, componentes ou sistema em condições normais de funcionamento, e aliado a isso, conclusões acerca da sua fiabilidade. Estas informações incluem a probabilidade de falha, tempo de vida útil e custos de garantia e de devolução. Podem também ser usados para assistir na performance de avaliações de risco, comparações de design, etc.

A aceleração pode tomar duas formas: Ou acelera-se a utilização (*Usage Rate Acceleration*) ou aumenta-se o nível de carga (*Overstress Acceleration*):

- *Usage Rate Acceleration* – Para produtos que não operam continuamente sob condições normais, se as unidades submetidas a testes forem operadas continuamente, vão induzir a falha mais rapidamente. Por exemplo, um micro-ondas opera algumas vezes por dia. Neste caso opera-se o micro-ondas com mais frequência até à falha. Os resultados que se retiram destes ensaios podem ser analisados segundo os mesmos métodos usados para análises tempos até à falha normais. As limitações surgem quando produtos como por exemplo servidores de computadores e periféricos mantêm uma utilização muito alta e contínua. Nesses casos, *Usage Rate Acceleration*, não é uma alternativa fiável.
- *Overstress Acceleration* – Para produtos que operam a um ritmo constante e/ou intenso, deve-se estimular o produto de modo que falhe no ensaio. Isso é alcançado ao se aplicarem níveis de carga que excedem os níveis a que o produto vai operar em condições normais. A informação relativa a tempos até à falha dos ensaios é expectável que seja extrapolada para condições reais de utilização. Ensaios acelerados podem ser realizados a baixa ou alta temperatura, humidade, tensão, pressão, vibração, etc. de maneira a acelerar o processo de falha. São também passíveis de serem realizados com uma combinação de mais que um tipo de carga (*stress*) (Reliasoft, 2024).

ALT vs. HALT

Uma segunda classe de metodologias de ensaio é designada de “*highly accelerated*” – HALT (*highly accelerated life testing*), HASS (*highly accelerated stress auditing*) e HASA (*highly accelerated stress auditing*). Estes termos, estabelecidos pelo engenheiro Gregg Hobbs (2002) formalizam metodologias de testagem já em uso há vários anos. Apesar das semelhanças na sua terminologia, os ensaios mais acelerados (*highly accelerated*) têm

objetivos que diferem dos apenas acelerados. De acordo com Hobbs, “HALT é uma metodologia com o objetivo de descobrir e posteriormente melhorar pontos fracos do produto na fase de design e desenvolvimento do produto. HASS deteta e soluciona erros de processo durante a fase de produção (Hobbs, G.K., 2002).

Até hoje não foi possível descrever uma definição precisa de “acelerado”, ou então da distinção, se sequer existe alguma, entre “*accelerated*” e “*highly accelerated*”. Em ambos os testes, são usados vários níveis de carga de maneiras semelhantes: variações de parâmetros tais como temperatura, humidade, pressão, vibração ou uma combinação destes, aumentos sequenciais de carga até se alcançar a falha. A diferença está no tipo de informações retiradas do ensaio e do uso que se dá das mesmas (Collins et al., 2013).

Cargas, níveis e tipos

As cargas e níveis de cargas dos ensaios acelerados devem ser definidas de tal forma que permitam acelerar os modos de falha, mas não induzir modos de falha que nunca iria ocorrer sob condições normais de funcionamento. Por norma, estes níveis de cargas estão fora dos limites especificados (*specification limits*) mas incluídos nos limites de design (*design limits*). A figura 4.1 ilustra os vários níveis de carga que existem e podem ser aplicados neste tipo de testagens.

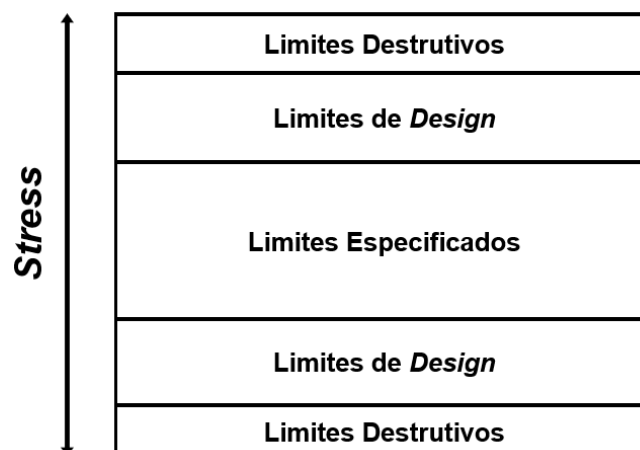


Figura 4.1 – Níveis de Carga. Adaptado de: Reliasoft (2024).

A escolha do tipo e da intensidade das cargas na preparação dos ensaios é um fator extremamente importante. Se o tipo de carga e a intensidade a ser usada forem desconhecidos, devem ser realizados testes qualitativos para a sua determinação.

A metodologia *Design of Experiments* (DOE) é também crucial. Para além de uma correta escolha dos níveis de carga, a sua aplicação deve também ser implementada de uma maneira lógica, controlada e quantificável. É uma abordagem estatística e sistemática usada para

planejar, conduzir e analisar ensaios e testes de forma eficiente e eficaz. O objetivo do DOE é otimizar processos, produtos ou sistemas, identificando as variáveis-chave que afetam um resultado específico e determinando como essas variáveis devem ser ajustadas para atingir os melhores resultados possíveis. Logicamente, à medida que a intensidade da carga vai aumentando num ensaio, a duração do mesmo diminui (a falha vai ocorrer mais rapidamente). No entanto, quanto mais esses níveis se desviarem dos níveis de condições normais, mais aumenta a incerteza da extrapolação. Os intervalos de confiança fornecem uma medição dessa incerteza na extrapolação (Reliasoft, 2024).

O tipo de cargas aplicados depende das condições de operação do produto pretendidas e nos possíveis motivos de falha. Os tipos de cargas são classificados da seguinte maneira:

- **Carga Mecânica** – Os ensaios de fadiga são os mais utilizados em componentes mecânicos. Quando os componentes são sujeitos a temperaturas elevadas, deve ser aplicado ensaios de fluência pois combinam carga com temperatura na sua realização. Ensaios de choque e vibração são adequados a componentes ou produtos sujeitos a essas mesmas condições tais como rolamentos, suspensões e pneus.
- **Carga Elétrica** – Estes incluem ciclos de energia, campos magnéticos, densidade de corrente elétrica e a eletromigração. O campo magnético é uma das cargas elétricas mais comuns pois induzem a falha em períodos relativamente curtos. O seu efeito é também consideravelmente mais evidente que outros tipos de cargas.
- **Carga Ambiental** – Ciclos térmicos e de temperatura são o tipo de ensaios ambientais mais comuns. A humidade pode ser tão crítica como a temperatura, mas a sua utilização requer normalmente mais tempo antes que o seu efeito se torne evidente. Outras cargas ambientais incluem luz ultravioleta, dióxido de enxofre, sal e radiação alfa e gama (Pham, H., 2003).

As cargas nos ensaios acelerados podem ser aplicadas de várias maneiras, com vários padrões, como de forma constante, cíclica, incremental, progressiva, aleatória ou uma mistura de várias. A figura 4.2 ilustra diferentes maneiras de aplicação das cargas, sendo elas de modo constante, incremental, em rampa, cíclica, ou uma combinação de várias, dependendo do objetivo final.

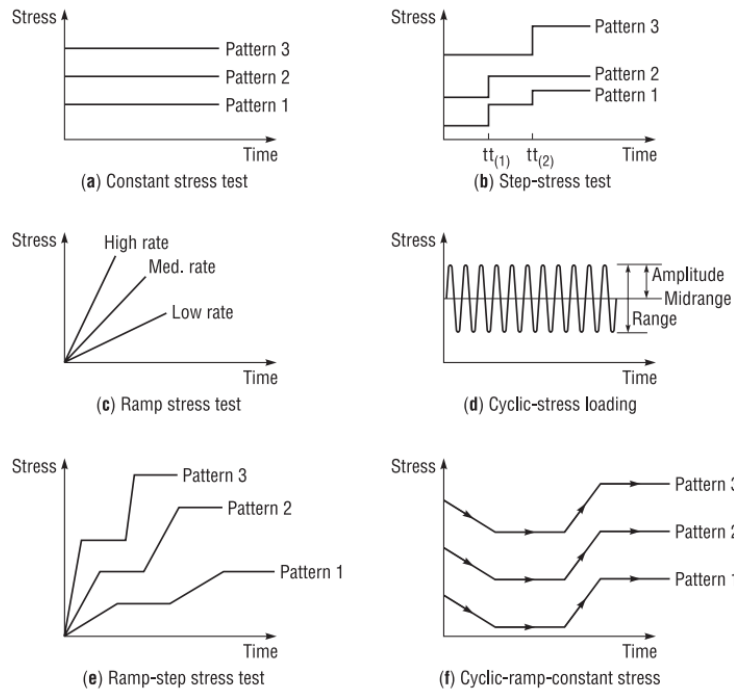


Figura 4.2 – Tipos de aplicação da carga em ALT (Pham, H., 2003).

• Análise e compreensão de informação obtida em ensaios quantitativos

Numa análise de vida típica, é determinada a vida de um componente que descreve o tempo até à falha, através de distribuições estatísticas. Estatisticamente falando, o objetivo é determinar a função de densidade de probabilidade dos tempos até à falha.

Após determinação desta função, todos os resultados fiabilísticos de interesse podem ser determinados, como por exemplo:

- Percentagem de falha dentro da garantia;
- Avaliação/Análise de Risco;
- Comparação de design;
- Período de degradação do produto (*wear out period*).

Em análise de vida, a função de densidade de probabilidade dos tempos até à falha pode ser facilmente determinada utilizando tempos até à falha e dados suspensos e distribuições como Weibull, exponencial e logarítmica, entre outras.

Em análise de vida acelerada, surge o desafio de determinar a função densidade de probabilidade dos tempos até à falha através dos resultados dos ensaios em vez de através de tempos até à falha típicos. Para isto ser possível, é necessário desenvolver um método que permita extrapolar dados obtidos num ensaio acelerado para dados em condições normais de funcionamento (Reliasoft, 2024).

- **Ensaio acelerado com apenas uma carga de intensidade constante – Processo de extrapolação dos resultados**

Para ser mais fácil entender o processo que envolve a extrapolação, tome-se como exemplo um ensaio acelerado simples. De modo a simplificar, assume-se que o produto foi submetido a apenas uma carga e a uma determinada intensidade constante. Os tempos até à falha neste nível de carga podem ser analisados utilizando uma distribuição de vida subjacente. Uma função densidade de probabilidade dos tempos até à falha de um produto pode ser obtida a esse único nível de carga utilizando técnicas tradicionais. Esta distribuição, dos tempos acelerados pode também ser utilizada para realizar previsões e estimativas de vida a esse nível. No entanto, o objetivo num ensaio acelerado não é de obter estimativas de vida a esse nível, mas sim obter características da vida do produto a um nível de funcionamento normal, ilustrado na figura 4.3.

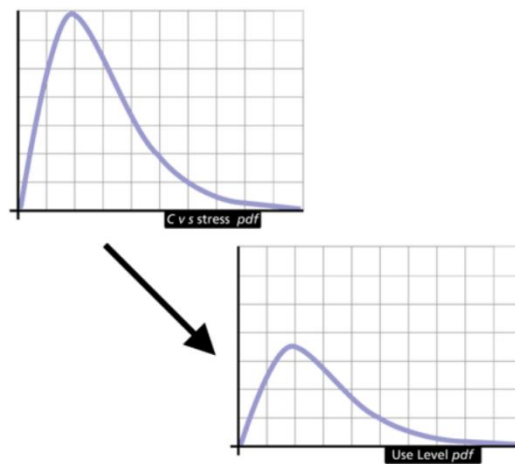


Figura 4.3 – Extrapolação da informação do nível de ensaio para nível de funcionamento normal (Reliasoft, 2024).

Para alcançar esse objetivo, é necessário conceber um método de extrapolação dos dados acelerados para uma distribuição de vida a um nível normal. A figura 4.4 ilustra o comportamento típico de uma *fdp* (função densidade de probabilidade) a um nível de ensaio e de uma respetiva *fdp* ao nível de utilização normal. De modo a simplificar ainda mais este cenário, assume-se que a função densidade de probabilidade do produto a um nível qualquer pode ser descrito por um único ponto. A figura 4.5 demonstra essa simplificação onde é necessário determinar como é que se vai projetar esse ponto de um nível para outro.

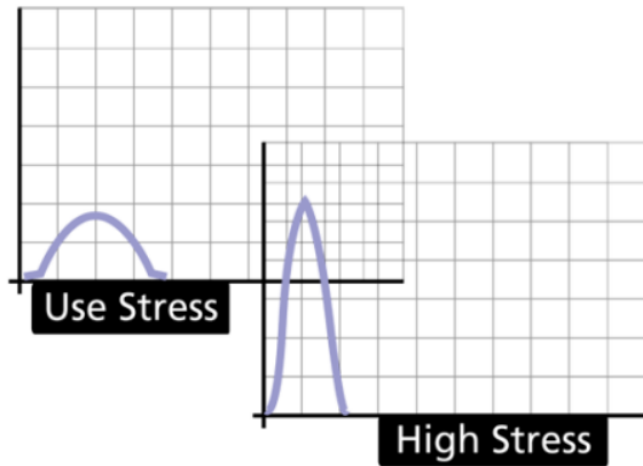


Figura 4.4 – Representação ilustrativa da fdp a um nível de ensaio e a um nível de uso normal (Reliasoft, 2024).

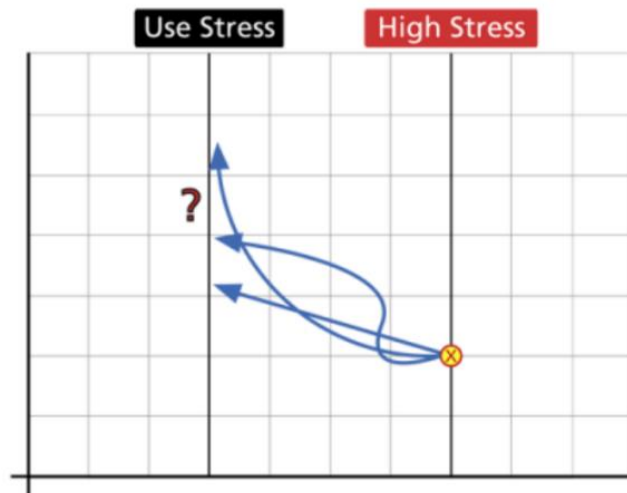


Figura 4.5 – Representação ilustrativa da extrapolação dos dados de um nível para o outro (Reliasoft, 2024).

Obviamente, existem infinitas maneiras de fazer essa projeção. Assumindo que neste caso particular existe algum modelo (ou função) que projeta este ponto de um nível para outro. Este modelo ou função pode ser descrito matematicamente e pode chegar a ser tão simples como a equação de uma linha. A figura 4.6 demonstra alguns modelos ou relações simples, como a linear e a exponencial:

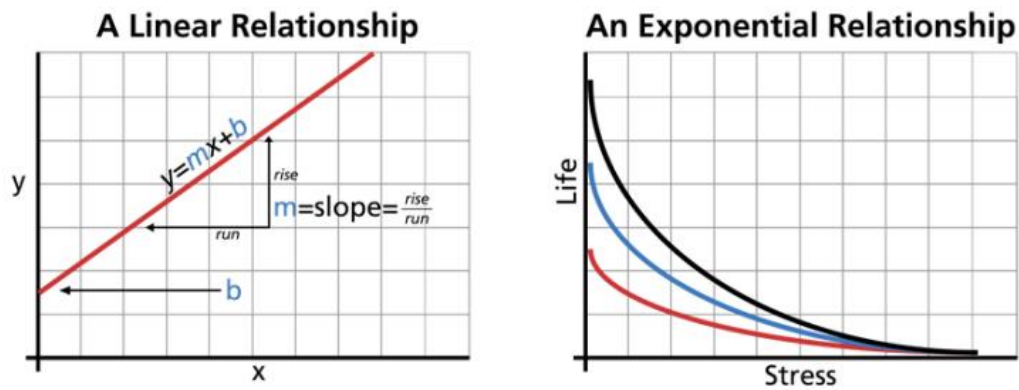


Figura 4.6 – Exemplo da relação linear e exponencial como modelos de extrapolação de dados (Reliasoft, 2024).

Mesmo quando um modelo é assumido (ex. linear, exponencial, etc.) as possibilidades de extrapolação são mesmo assim infinitas pois dependem dos parâmetros do modelo escolhido. Por exemplo, um modelo simples linear vai gerar inúmeras possibilidades pois para cada valor é possível traçar um número infinito de linhas por esse valor (ponto). Torna-se claro que, quantos mais pontos e valores estiverem à disposição, mais facilmente se torna o processo de extrapolação de resultados. É normalmente necessário um mínimo de dois níveis de carga superiores para extrapolar adequadamente a função para um nível de utilização normal.

A análise de resultados acelerados consiste numa distribuição de vida subjacente, que irá descrever o produto em diferentes níveis de carga, e uma relação (ou modelo) de Vida-Stress que quantifica de que maneira a distribuição de vida se altera ao longo dos vários níveis. A figura 4.7 ilustra um exemplo destes dois fatores que foram agora descritos.

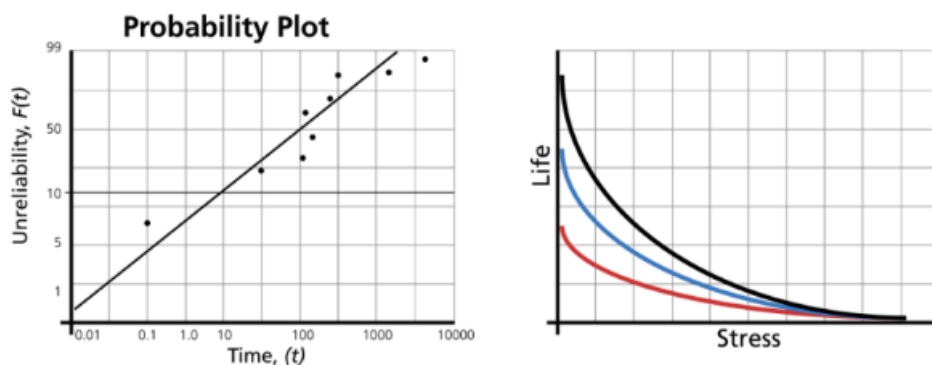


Figura 4.7 – Exemplo de uma distribuição de vida (esquerda) e Modelo Vida-Stress (direita) (Reliasoft, 2024).

A combinação da distribuição de vida e do modelo Vida-Carga pode ser conjugado, como se pode observar na figura 4.8, onde está descrita a função densidade de probabilidade em função do tempo e da carga.

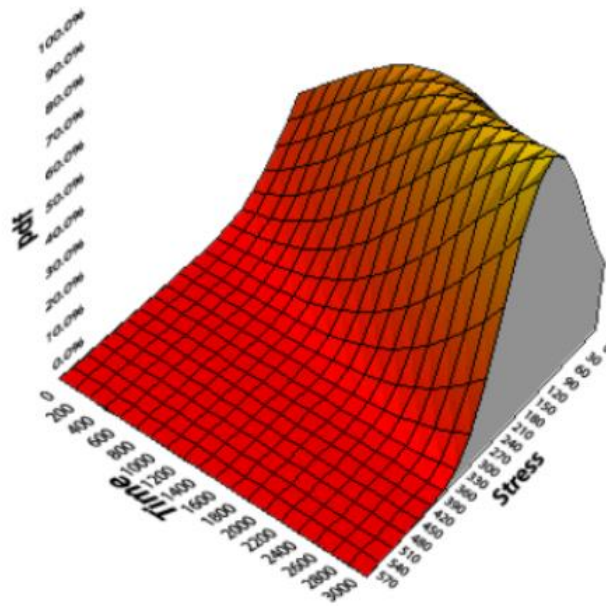


Figura 4.8 – Ilustração de uma fdp descrita em função do tempo e da carga (Reliasoft, 2024).

A distribuição assumida pode ser qualquer distribuição de vida. As mais comuns nestes casos são a de Weibull, a exponencial, a normal e a Lognormal. Relativamente às relações (modelos) Vida-Stress, estas são derivadas empiricamente e ajustadas aos dados, como ilustra a figura 4.9.

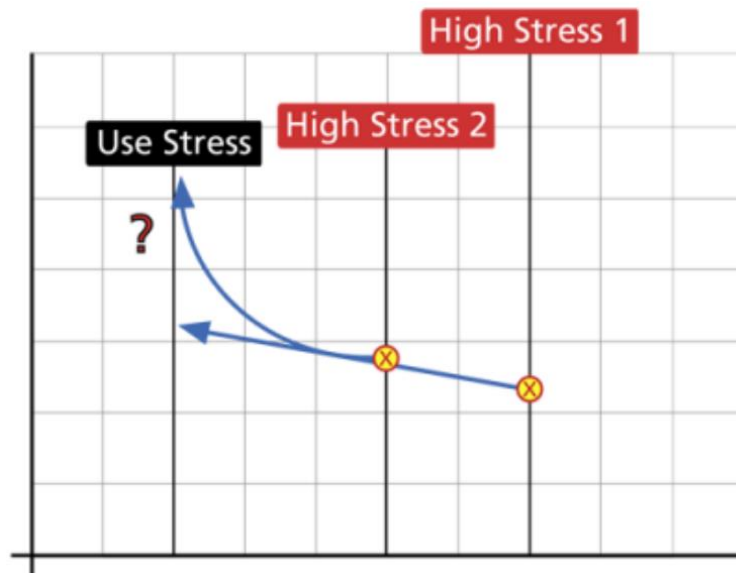


Figura 4.9 – Extrapolação incremental desde o nível de carga de ensaio e o nível pretendido (Reliasoft, 2024).

- **Procedimento do tratamento de dados**

Numa análise e estudo típico de ensaios acelerados de vida, existe um procedimento geral que é realizado metodicamente:

- **Seleção da distribuição de probabilidade** – O primeiro passo na realização de uma análise deste tipo é selecionar a distribuição de probabilidade correta. A exponencial foi no passado bastante utilizada devido à sua simplicidade e ainda o é fundamentalmente quando os bens se encontram em vida útil, com taxa de falhas constante. As distribuições de Weibull e LogNormal, que envolvem mais cálculo, são apropriadas para mais situações.
- **Seleção de um modelo/relação *Life-Stress*** – O segundo passo é selecionar (ou criar) um modelo que descreva um ponto característico (*characteristic point* ou *life characteristic*) da distribuição de um nível de carga para outro, como a figura 4.10 faz ilustrar.

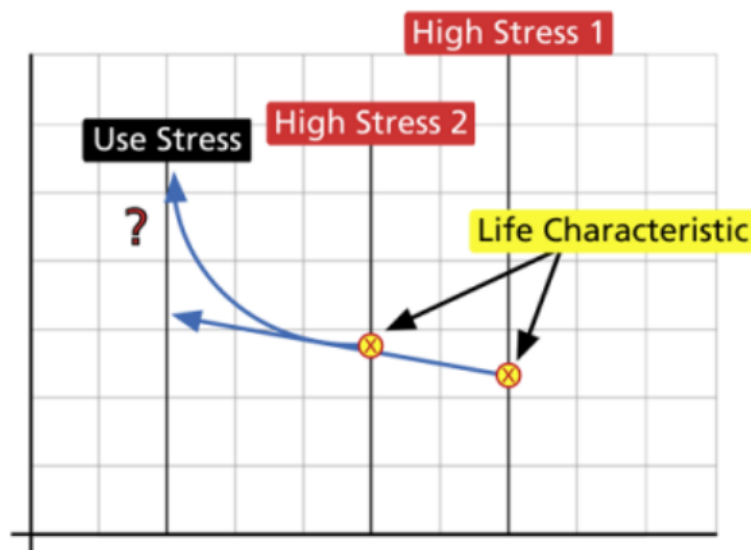


Figura 4.10 – Ilustração da extrapolação de valores através de uma característica de vida do modelo (Reliasoft, 2024).

Esta característica de vida pode ser qualquer como por exemplo a média, a mediana, fiabilidade ou a probabilidade de falha em que esta característica é uma função da carga (*stress*). Dependendo da distribuição selecionada, são consideradas características diferentes. A tabela 4.1 fornece exemplos de características de vida e de parâmetros de diferentes funções que podem descrever a vida.

Tabela 4.1 – Características de vida e parâmetros associadas a diferentes distribuições. Adaptado de: Reliasoft (2024).

Distribuição	Parâmetros	Característica de vida
Weibull (biparamétrica)	β, η	Parâmetro de escala η
Exponencial	λ	MTTF, $\frac{1}{\lambda}$
Lognormal	\check{T}	Mediana, \check{T}

Por exemplo, ao se considerar a distribuição de Weibull, o parâmetro de forma μ é a característica que depende da carga, enquanto β assume-se constante ao longo de todos os níveis de carga. Uma relação vida-stress é então atribuída a μ .

- **Estimação do(s) parâmetro(s)** – O próximo passo é selecionar um método para estimar os parâmetros da distribuição. De modo simples, a estimação do parâmetro envolve ajustar um modelo aos dados e resolver em função dos parâmetros que descrevem esse modelo. Neste caso, o modelo é uma combinação da distribuição de vida e do modelo Vida-Stress. A tarefa que envolve esta determinação pode variar desde uma solução muito trivial (com uma vasta gama de dados, uma carga única e constante, uma distribuição e um modelo simples) até não existir solução possível. Alguns dos métodos disponíveis para a estimação de parâmetros são o método gráfico, o método dos quadrados mínimos e o método da máxima verossimilhança.
- **Derivação da informação acerca da fiabilidade da unidade** – Após se terem estimado os parâmetros, é possível determinar uma variedade de resultados relacionados com a fiabilidade dos componentes ensaiados, tais como por exemplo, tempos de garantia, taxa de falha instantânea, a vida média ou o tempo necessário para uma certa percentagem de componentes falhar (Reliasoft, 2024).

4.3. Identificação da degradação de bens baseados em modelos estatísticos

Quando se realiza uma análise de vida (também referida como análise Weibull), o analista tenta fazer previsões acerca da vida de um produto ao ajustar uma distribuição estatística (modelo) a informações retiradas de uma dada população. A distribuição parametrizada pode então estimar propriedades da vida do produto importantes tais como a fiabilidade e a

probabilidade de falha num momento específico, a vida média e a taxa de falhas. Uma análise de vida requer ao praticante que:

- Recolha informações de tempos até à falha do produto.
- Selecione uma distribuição adequada aos dados e que modele o comportamento de vida do produto.
- Estime os parâmetros que irão ajustar os dados à distribuição.
- Gerar gráficos e resultados que estimem as características do produto, tais como a fiabilidade ou a vida média.

As distribuições estatísticas foram formuladas por estatísticos, matemáticos e engenheiros para modelar matematicamente um comportamento ao longo do tempo. A função densidade de probabilidade é uma função matemática que descreve a distribuição. A *fdp* pode ser representada matematicamente ou num gráfico onde o eixo X representa o tempo (Reliasoft, 2024).

4.3.1. Análise dos Modelos de Degradação

Uma vez que nos dias de hoje, os produtos são fabricados mais rapidamente e com uma maior fiabilidade, muitas das vezes não é possível testar novos designs até à falha sob condições normais de utilização. Em alguns casos é possível inferir a fiabilidade de amostras que não alcançaram a falha apenas com a informação adquirida ao longo do tempo e de testagem e com algumas suposições da distribuição em questão. No entanto, isto geralmente leva a um nível alto de incerteza nos resultados. Outra opção nesta situação é a utilização da análise de degradação, que envolve a medição de informação acerca da performance de um produto que está diretamente ligada à falha do mesmo. Muitos mecanismos de falha estão diretamente ligados ao fenómeno de degradação do produto e a análise de degradação permite extrapolar os resultados para uma situação mais realista com base nas medições de degradação ao longo do tempo.

- **Análise de degradação Não Destrutiva**

A análise não destrutiva aplica-se a casos onde várias medidas de degradação são possíveis de ser analisadas em cada amostra, num teste. Dado um nível definido de falha (ou o nível de degradação que constitui a falha), são usados modelos matemáticos simples de maneira a extrapolar os resultados da degradação ao longo do tempo até ao momento da falha. Após serem extrapolados, resta apenas analisar os dados da mesma maneira que com valores normais de tempos até à falha. Tal como em análises de vida convencionais, a escala de exatidão dos resultados está diretamente ligada ao número de amostras sujeitas a teste. A

figura 4.11 combina as etapas de uma análise ao mostrar a extrapolação das medições de degradação para um TTF e a consequente análise da distribuição desses TTF.

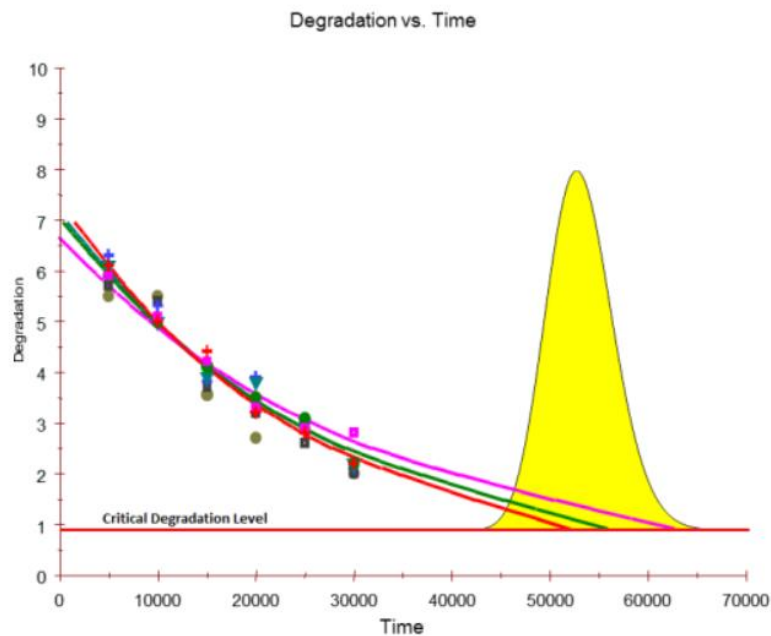


Figura 4.11 – Exemplo de uma extrapolação das medições de degradação para um TTF (Reliasoft, 2024).

- **Modelos de degradação Não – Destrutivos**

Após a informação acerca da degradação ter sido obtida, extrapola-se para o nível desejado de modo a estimar o TTF. Estes são os seguintes modelos:

Tabela 4.2 – Modelos de degradação Não – Destrutiva. Adaptado de: Reliasoft (2024).

Linear	$y = a \cdot x + b$
Exponencial	$y = b \cdot e^{a \cdot x}$
Potência	$y = b \cdot x^a$
Logarítmico	$y = a \cdot \ln(x) + b$
Gompertz	$y = a \cdot b^{c^x}$
Lloyd-Lipow	$y = a - \frac{b}{x}$

Onde y representa a performance, x representa o tempo, e as variáveis a, b e c são parâmetros a conhecer do modelo.

Assim que os parâmetros a_i, b_i e c_i forem estimados para cada amostra i , o tempo x_i pode ser extrapolado, correspondente ao nível definido y .

- **Análise de Degradação Destrutiva**

A análise de degradação destrutiva aplica-se a casos onde a amostra tem de ser destruída de maneira a se obterem resultados de degradação. Consequentemente, é necessário obterem-se estas medidas de degradação para várias amostras em vários instantes no tempo. A análise é feita de uma maneira muito semelhante à análise de vida acelerada. Neste último caso, a carga utilizada torna-se o tempo, enquanto a variável aleatória torna-se a medida de degradação em vez do TTF. Dado um nível de falha (nível de degradação que constituiria uma falha), obtém-se a probabilidade de que a medida de degradação ultrapasse esse nível num certo instante no tempo. O gráfico da figura 4.12 ilustra a relação entre a distribuição da medida de degradação e o tempo. A área representada a vermelho das últimas duas *fdp*'s representam a probabilidade de a medida de degradação ser menor que o nível crítico de degradação no instante de tempo correspondente.

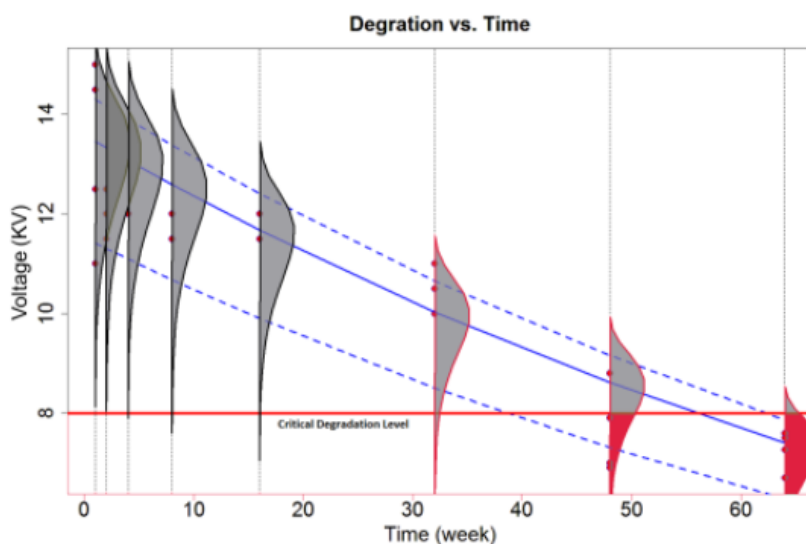


Figura 4.12 – Exemplo da relação entre o tempo e a distribuição da medida de degradação (Reliasoft, 2024).

- **Modelos de Degradação Destrutivos**

O primeiro passo no que toca à análise de degradação destrutiva envolve utilizar uma distribuição estatística que represente a variabilidade da medida de degradação. Podem ser utilizadas algumas distribuições como Weibull, Exponencial, Normal, LogNormal ou Gumbel. Assume-se que o parâmetro de posição da medida de degradação varia com o tempo enquanto o parâmetro de forma se manterá constante.

Para cada distribuição:

- Weibull: $\ln(\eta)$ é função do tempo enquanto β mantém-se constante.

- Exponencial: \ln (MTTF) define-se em função do tempo.
- Normal: μ define-se em função do tempo enquanto σ mantém-se constante.
- LogNormal: μ' define-se em função do tempo enquanto σ' mantém-se constante.
- Gumbel: μ define-se em função do tempo enquanto σ mantém-se constante.

Finalmente, dada a distribuição escolhida, é utilizado um modelo de degradação para representar a variação do parâmetro de posição com o tempo. Podem ser utilizados os que foram mostrados na tabela 4.2.

A distribuição e os respetivos parâmetros de degradação são depois calculados utilizando MLE (*Maximum Likelihood Estimation*) (Reliasoft, 2024).

4.3.2. Distribuição Normal

Também conhecida por distribuição Gaussiana, é a distribuição mais abrangente no que toca ao tipo de situação em causa. É devido a isso que é uma das distribuições mais utilizadas em estudos de fiabilidade e análise de vida. Existe o argumento de que a distribuição normal não é adequada para modelar a vida de componentes pois o lado esquerdo da distribuição estende-se até um infinito negativo. No entanto, considerando que a distribuição tem um valor médio muito alto e um desvio relativamente baixo, o impacto de se poderem obter TTF negativos não deverá ter impacto no resultado.

A função densidade de probabilidade da distribuição é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (4.1)$$

Onde

μ = valor médio dos tempos até à falha

σ = desvio padrão dos tempos até à falha

A distribuição é simétrica em relação ao seu valor médio, do tipo biparamétrica, com o valor médio como parâmetro de localização e o desvio padrão como parâmetro de escala.

Algumas das características desta distribuição são as seguintes:

- O valor médio \bar{T} da função densidade de probabilidade é igual à sua mediana \tilde{T} e também à sua moda \hat{T} . Isto é devido ao facto desta distribuição ser simétrica em relação à sua média.

$$\bar{T} = \tilde{T} = \hat{T} \quad (4.2)$$

A figura 4.13 exemplifica uma curva típica de uma distribuição normal.

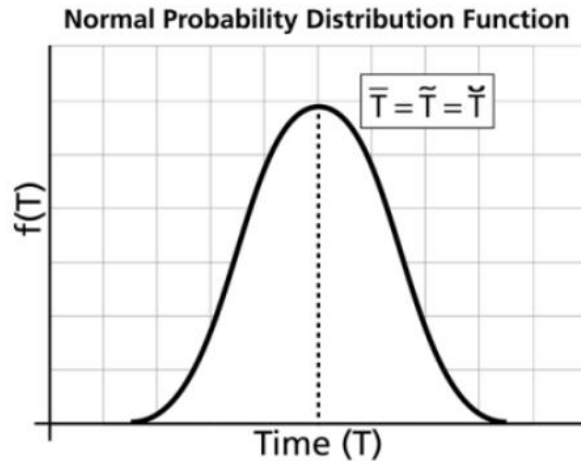


Figura 4.13 – Esquemática da distribuição normal (Reliasoft, 2024).

- A média μ , ou então a vida média MTTF, é também o parâmetro de localização da função. Pode assumir valores de $-\infty < \bar{T} < \infty$.
- A função não tem parâmetro de forma. Isto significa que a distribuição apenas tem uma única forma e não se altera.
- σ pode assumir valores de $0 < \sigma < \infty$.
- Quanto maior a variabilidade de valores, maior o valor de σ e vice-versa.
- σ é também a distância entre a média e o ponto de inflexão da distribuição, de cada lado da média. O ponto de inflexão é o ponto da curva onde o declive altera o seu valor de negativo para positivo, ou onde a segunda derivada tem um valor nulo.
- A função começa em $t = -\infty$ com $f(t) = 0$. Com o aumento de t , $f(t)$ também aumenta, passa pelo seu ponto de inflexão e alcança o seu máximo em $t = \bar{T}$. De seguida, $f(t)$ diminui e passa pelo seu ponto de inflexão.
- O desvio padrão σ é o parâmetro de escala da função. À medida que este diminui, a função é puxada para a média, ou seja, a curva fica mais estreita e alta. À medida que o desvio padrão aumenta, a curva fica mais larga e baixa, como ilustra a figura 4.14.

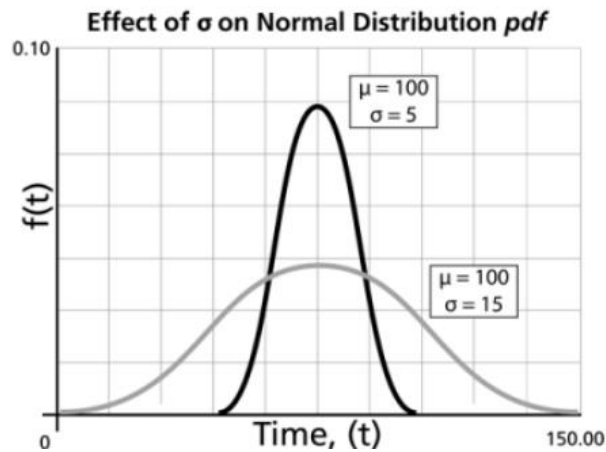


Figura 4.14 - Efeito do desvio padrão na distribuição (Reliasoft, 2024).

Visto que a distribuição é simétrica, a área debaixo da curva desde $-\infty$ até μ é 0.5, assim como a área adjacente. Consequentemente, o valor de μ situa-se onde $R(t)=Q(t)=50\%$.

A área debaixo da curva que se encontra entre um desvio padrão em cada direção representa 68.3% da área total como está representado na figura 4.15.

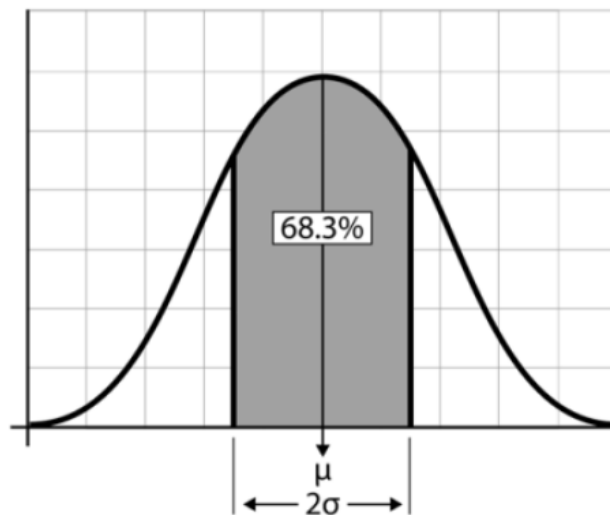


Figura 4.15 - Representação gráfica da ocupação relativa a dois desvios padrão (Reliasoft, 2024).

4.3.3. Distribuição LogNormal

A distribuição Lognormal é tipicamente usada para modelar a vida de unidades cujo modo de falha está relacionada com fadiga. Já que este modo de falha inclui muitos, senão todos os sistemas mecânicos, a distribuição Lognormal tem um campo de aplicação bastante abrangente. Consequentemente, a distribuição acompanha bem a distribuição de Weibull na modelação deste tipo de componentes. Tal como pode indiciar no nome, a distribuição Lognormal tem algumas semelhanças à distribuição normal. Uma variável aleatória varia de

uma maneira Lognormal se o logaritmo da variável variar de uma maneira normal. Devido a isto, existem muitas semelhanças matemáticas entre as duas distribuições.

A distribuição Lognormal é uma distribuição biparamétrica com os respectivos parâmetros de posição (μ') e de forma (σ') e é dada por:

$$f(t') = \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t' - \mu'}{\sigma'} \right)^2} \quad (4.3)$$

Onde:

$t' = \ln(t)$. Valores de t são tempos até à falha.

μ' = média do logaritmo natural dos tempos até à falha

σ' = desvio padrão do logaritmo natural dos tempos até à falha

A distribuição Lognormal é uma distribuição assimétrica e os seus parâmetros de escala são dados por:

$$\text{Média} = \bar{T} = e^{\mu' + \frac{1}{2}(\sigma')^2} \quad (4.4)$$

$$\text{Mediana} = \check{T} = e^{\mu'} \quad (4.5)$$

$$\text{Moda} = \tilde{T} = e^{\mu' - (\sigma')^2} \quad (4.6)$$

A distribuição Lognormal tem as seguintes características:

- A distribuição Lognormal é uma distribuição “descaída” para a direita.
- A função densidade de probabilidade começa no 0 e aumenta até ao valor da moda, diminuindo de seguida.
- O seu nível de assimetria aumenta à medida que σ' aumenta, para um dado μ' .
- Para o mesmo valor de σ' , a assimetria da curva aumenta à medida que μ' também aumenta.
- Para valores de σ' bastante superiores a 1, a função sobre muito acentuadamente no início, quase paralelamente ao eixo Y, e de seguida cai a pique como uma função exponencial ou de Weibull com $0 < \beta < 1$.

A figura 4.16 ilustra os efeitos dos valores de μ' e σ' no comportamento da curva.

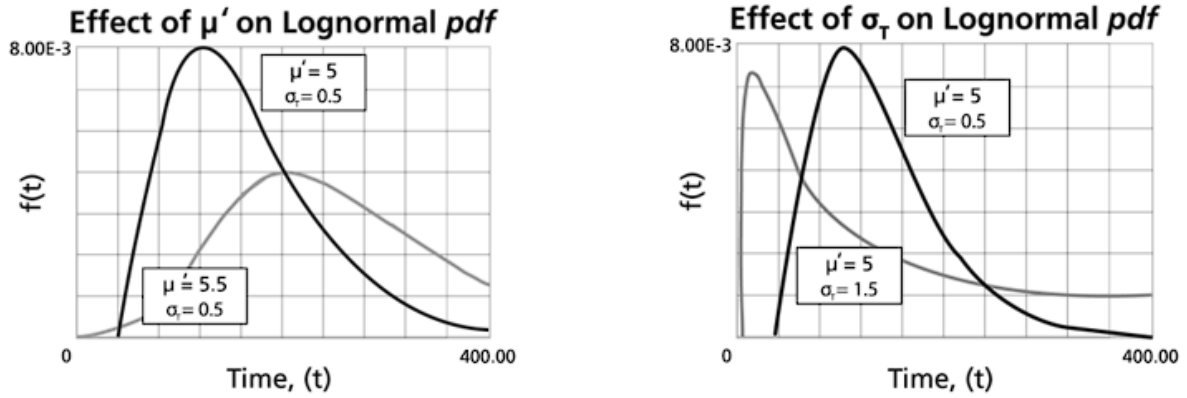


Figura 4.16 – Efeitos dos parâmetros na curva (Reliasoft, 2024).

Quando se trata de uma distribuição Lognormal, a fiabilidade é dada pela equação 4.7:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t') \cdot dt = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t' - \mu'}{\sigma'} \right)^2} dt \quad (4.7)$$

$$f(t) \geq 0, t > 0, \sigma' > 0$$

$$t' = \ln(t)$$

Para uma missão de tempo t , iniciada quando a idade é nula, para esta distribuição, a fiabilidade é dada por:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(x) dx \quad (4.8)$$

Ou

$$R(t) = \int_{\ln(t)}^{\infty} \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t' - \mu'}{\sigma'} \right)^2} dx \quad (4.9)$$

Dessa maneira, a taxa de avarias (ou de falha) é matematicamente dada por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t' - \mu'}{\sigma'} \right)^2}}{\int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t' - \mu'}{\sigma'} \right)^2} dt} \quad (4.10)$$

4.3.4. Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é uma das distribuições mais usadas no que toca a fiabilidade. É uma distribuição versátil que pode tomar características de outras distribuições, com base no seu parâmetro de forma.

Na sua forma triparmétrica, permite analisar casos onde o início de operação do produto não coincide com o início da análise:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^\beta} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} f(t) &\geq 0, t \geq \gamma \\ \beta, \eta &> 0 \\ -\infty &< \gamma < +\infty \end{aligned}$$

γ = vida inicial ou parâmetro de posição

β = parâmetro de forma

η = vida característica ou parâmetro de escala

t = variável (tempo, distância, ciclos, etc)

A sua forma biparmétrica também tem muita aplicação, devido à maior simplicidade e facilidade de entendimento. Nesta forma, define-se $\gamma = 0$.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left[\frac{t}{\eta}\right]^\beta} \quad (4.12)$$

Na sua forma monoparmétrica, define-se $\gamma = 0$ e assume-se que $\beta = C = 1$:

$$f(t) = \frac{C}{\eta} \cdot e^{-\left[\frac{t}{\eta}\right]^C} \quad (4.13)$$

Onde o único parâmetro desconhecido é η . Nesta forma, β já é conhecido à priori, sendo o seu valor igual a 1 (Reliasoft, 2024).

A figura 4.17 ilustra como a distribuição de Weibull se comporta com a variação do parâmetro β . A vida característica, pelo contrário, não afeta a forma da curva. Em geral, uma vida característica fixa, um aumento no declive da curva indica uma diminuição na variação da amostra ou população (Luko, S., 1999).

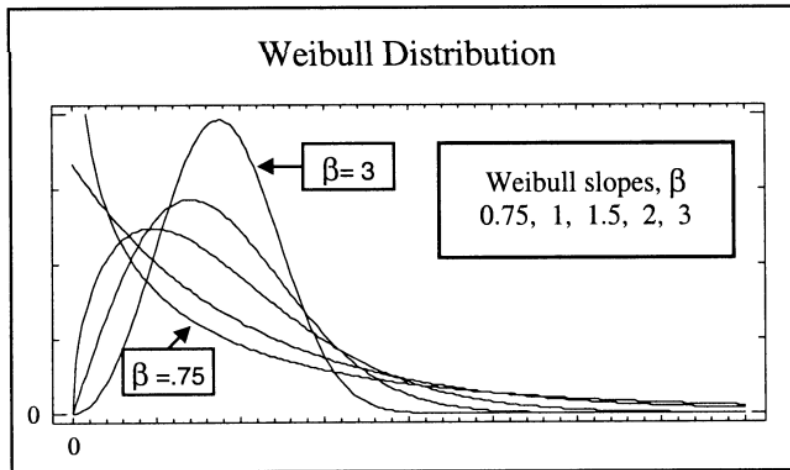


Figura 4.17 – Variação do parâmetro β na distribuição de Weibull (Luko, S., 1999).

Numa distribuição de Weibull, a expressão para o cálculo da fiabilidade é dada pela equação 4.14:

$$R(t) = e^{-\left[\frac{(t-\gamma)}{\eta}\right]^\beta} \quad (4.14)$$

Consequentemente, a determinação da probabilidade de falha é dada por:

$$F(t) = 1 - e^{-\left[\frac{(t-\gamma)}{\eta}\right]^\beta} \quad (4.15)$$

Devido à sua versatilidade, a distribuição de Weibull é amplamente usada na análise de fiabilidade. Dependendo dos valores dos seus parâmetros, a distribuição pode ser modelar vários tipos de comportamentos de vida. Vai-se agora analisar como é que os valores do parâmetro de forma e da vida característica afetam o aspeto da curva, a fiabilidade e a taxa de avarias.

O parâmetro de forma é também o declive da curva de Weibull. Diferentes valores traduzem alterações no comportamento da distribuição. Por exemplo, quando $\beta=1$, a função densidade de probabilidade da distribuição de Weibull triparamétrica reduz-se a uma distribuição exponencial:

$$f(t) = \frac{1}{\eta} \cdot e^{-\frac{t-\gamma}{\eta}} \quad (4.16)$$

O efeito de vários valores de β no aspeto da distribuição está demonstrado na figura 4.18.

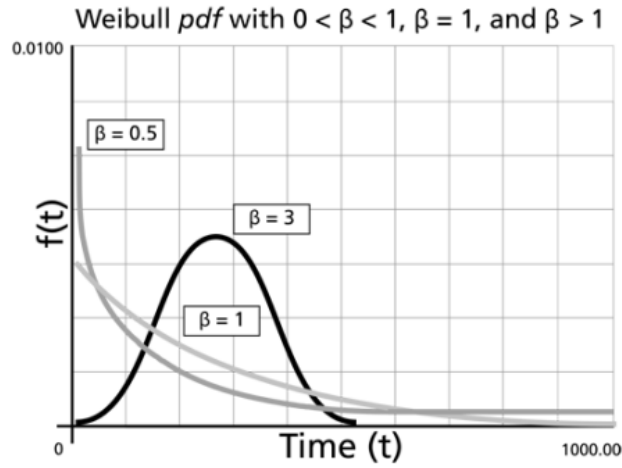


Figura 4.18 - Ilustração das formas da curva para diferentes valores de β (Reliasoft, 2024).

- Para $0 < \beta \leq 1$:

$$t \rightarrow 0, f(t) \rightarrow \infty$$

$$t \rightarrow \infty, f(t) \rightarrow 0$$

- Para $\beta > 1$:

$$f(t) = 0 \text{ em } t = 0$$

$$t \rightarrow \tilde{T} \Rightarrow f(t) \text{ aumenta e diminui após } \tilde{T}$$

A figura 4.19 ilustra o efeito do β no gráfico da função Fiabilidade.

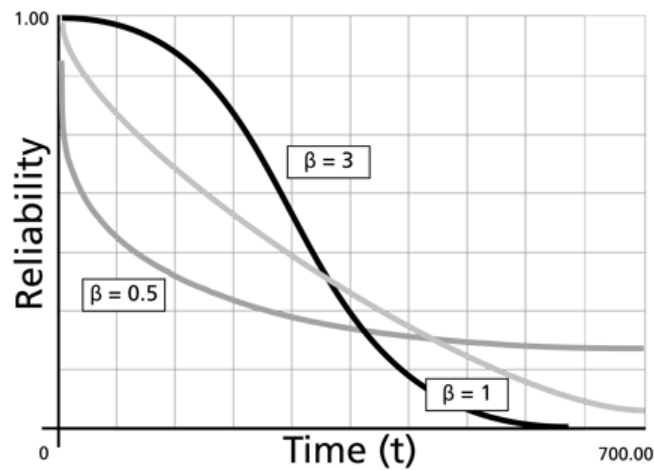


Figura 4.19 - Variação do parâmetro β na função Fiabilidade (Reliasoft, 2024).

A partir da figura pode-se retirar que:

- $R(t)$ decresce rapidamente quando $0 < \beta < 1$ e é convexa;
- Para $\beta = 1$, $R(t)$ decresce de forma monótona, mas menos abruptamente que para quando $0 < \beta < 1$, e é convexa;
- Para $\beta = 1$, $R(t)$ diminui à medida que β aumenta. À medida que a fase de envelhecimento se instala, a curva alcança um ponto de inflexão e depois decresce rapidamente.

Como se verifica na figura 4.20, o valor de β tem influência na taxa de falha da distribuição de Weibull e podem-se obter conclusões acerca das características de uma população apenas ao considerar se o seu valor é menor, igual ou superior a 1.

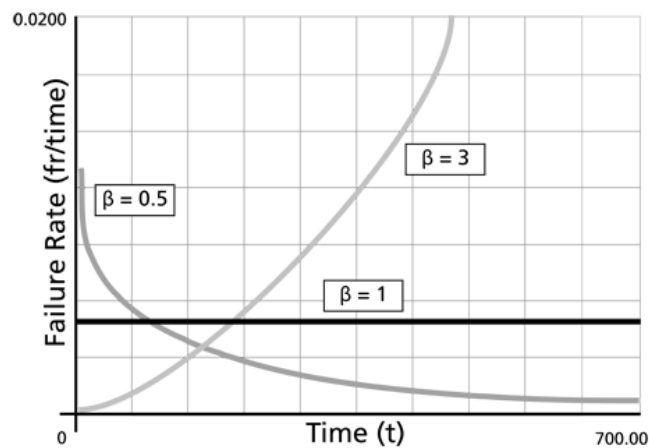


Figura 4.20 – Exemplo do efeito de β na taxa de falha (Reliasoft, 2024).

Como indicado na figura acima, populações com $\beta < 1$ exibem uma taxa de falha que diminui com o tempo, populações com $\beta = 1$ têm uma taxa de falha constante e populações com $\beta > 1$ têm uma taxa de falha que cresce com o passar do tempo. As três fases da vida da curva da banheira permitem ser modeladas com a distribuição de Weibull e com valores variáveis de β .

A taxa de falha para $0 < \beta < 1$ é indefinida para $t=0$. A taxa de falha, $\lambda(t)$, decresce depois de forma monótona e é conexa, aproximando-se de 0 à medida que $t \rightarrow \infty$ ou $\lambda(\infty) = 0$. Este comportamento é adequado para representar a taxa de falha de unidades que apresentem falhas precoces, para as quais a taxa de falha diminua com o tempo. Quando se encontram componentes com este tipo de problemas, pode ser indicativo de problemas no processo de produção.

Para $\beta = 1$, $\lambda(t)$ é um valor constante, ou seja:

$$\lambda(t) = \lambda = \frac{1}{\eta} \quad (4.17)$$

Este comportamento é adequado para representar a taxa de falha de falhas imprevisíveis e a taxa de falha do período de vida útil de unidades.

Para $\beta > 1$, $\lambda(t)$ cresce à medida que t aumenta e torna-se útil para representar a taxa de falha de unidades que revelam falhas relacionadas com desgaste. Para $1 < \beta < 2$, a curva $\lambda(t)$ é concava, logo, conseqüentemente, a taxa de falha aumenta a um ritmo decrescente à medida que t aumenta. Quando $\beta > 2$, a curva $\lambda(t)$ é convexa, com o seu declive aumentando à medida que t aumenta, indicando o alcance do fim de vida.

A alteração do parâmetro de escala tem o mesmo efeito na distribuição que uma alteração no eixo das abcissas. Aumentar o seu valor enquanto β mantém constante, “estica” a curva fdp. Sabendo que a área abaixo de uma curva fdp é um valor sempre constante e igual a 1, o pico da curva também irá ser menor com um aumento de η , como ilustra a figura 4.21.

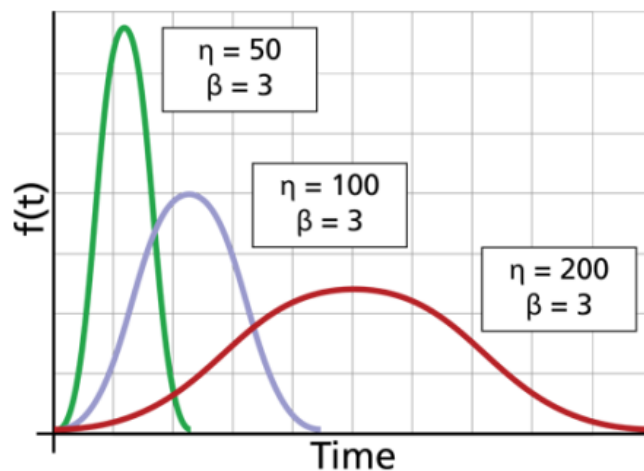


Figura 4.21 - Exemplo do efeito de η na taxa de falha (Reliasoft, 2024).

A partir da figura pode-se retirar que:

- Se η aumenta enquanto β e γ são mantidos constantes, a distribuição é esticada para a direita e a sua altura diminui, mantendo a sua forma e localização.
- Se η diminui enquanto β e γ são mantidos constantes, a distribuição é “puxada” para a esquerda e a sua altura aumenta.
- O parâmetro η tem a mesma unidade de t , como por exemplo horas, milhas, ciclos, etc.

O parâmetro de localização, como o nome indica, localiza a distribuição ao longo do eixo das abcissas. Alterar o seu valor faz a distribuição deslocar-se e a função associada, tanto para a direita, se $\gamma > 0$ ou para a esquerda, se $\gamma < 0$, como se observa na figura 4.22.

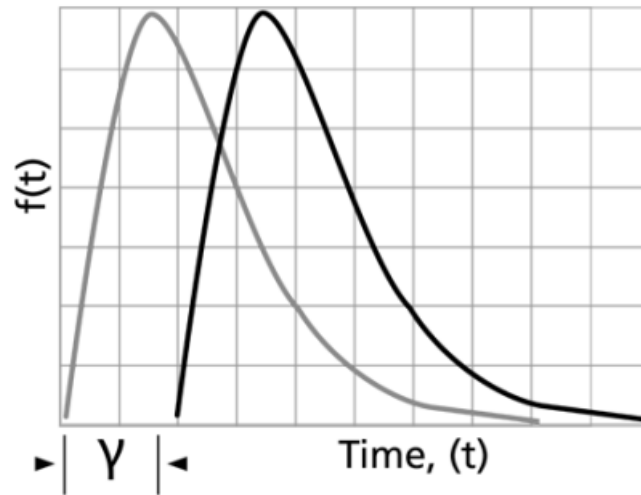


Figura 4.22 - Exemplo do efeito de γ na taxa de falha (Reliasoft, 2024).

- Quando $\gamma = 0$, a distribuição começa em $t = 0$, ou na origem.
- Se $\gamma > 0$, a distribuição começa numa localização γ à direita da origem.
- Se $\gamma < 0$, a distribuição começa numa localização γ à esquerda da origem.

O parâmetro γ dá uma estimativa dos tempos até à falha mais precoces de unidades. Pode assumir qualquer valor e fornece uma estimativa do tempo até à falha mais cedo que pode ser observada. Um valor negativo indica que a falha ocorreu antes do início do teste, como na produção, armazenamento ou transporte. Tem a mesma unidade de t , como por exemplo horas, milhas, ciclos, etc.

A média, também designada por (MTTF) da distribuição de Weibull é dada por:

$$\bar{T} = \gamma + \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (4.18)$$

Onde $\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$ é o valor da função em $\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$.

A função *gamma* é definida como:

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{n-1} dx \quad (4.19)$$

A mediana \tilde{T} da distribuição de Weibull é dada por:

$$\tilde{T} = \gamma + \eta(\ln 2)^{\frac{1}{\beta}} \quad (4.20)$$

A moda \tilde{T} da distribuição de Weibull é dada por (Reliasoft, 2024):

$$\tilde{T} = \gamma + \eta \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (4.21)$$

4.3.5. Distribuição Exponencial

A distribuição exponencial é regularmente usada em engenharia da fiabilidade. Matematicamente, é uma distribuição relativamente simples, que em alguns casos pode ser usada em erro em situações inapropriadas. Esta distribuição é um caso específico da distribuição de Weibull quando $\beta = 1.$, possuindo deste modo a variante biparamétrica e monoparamétrica. A distribuição exponencial é utilizada para modelar o comportamento de unidades que possuam uma taxa de avarias constante ou de unidades que não se degradam com o tempo ou com o desgaste.

A distribuição biparamétrica é dada por:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot (t-\gamma)} \quad (4.22)$$

Onde

$$f(t) \geq 0, \lambda > 0, t \geq \gamma$$

γ – parâmetro de localização

λ – taxa de avarias constante

A figura 4.23 ilustra o comportamento geral da equação da função densidade de probabilidade com o tempo até à falha.

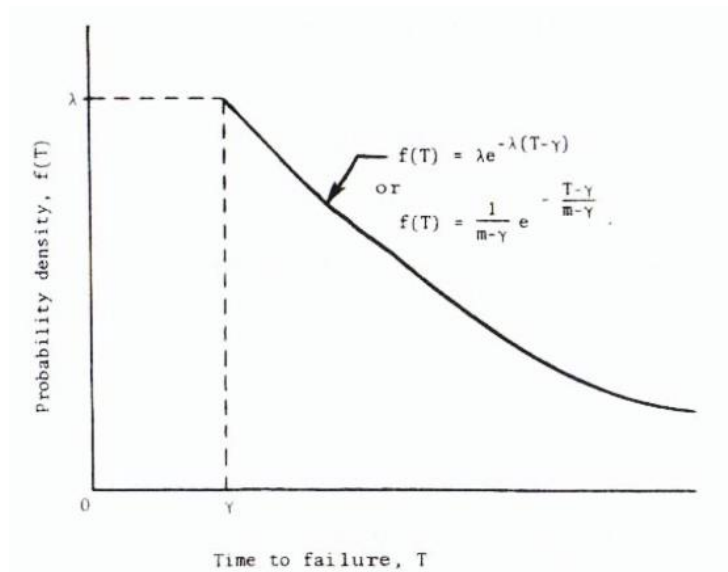


Figura 4.23 – Representação típica da função exponencial biparamétrica (Kececioglu, B. D., 2002)

Em vida útil, a fiabilidade é dada por:

$$R(t) = e^{-\lambda(t-\gamma)} = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{MTBF-\gamma}\right)} \quad (4.23)$$

A média, mediana e moda da distribuição exponencial biparamétrica são dadas pelas seguintes equações, respetivamente (Reliasoft, 2024):

$$\bar{T} = \gamma + \frac{1}{\lambda} = m \quad (4.24)$$

$$\tilde{T} = \gamma + \frac{1}{\lambda} 0.693 \quad (4.25)$$

$$\tilde{\tilde{T}} = \gamma \quad (4.26)$$

Algumas das características desta distribuição em específico são detalhadas por Kececioglu (2002):

- O parâmetro de localização, se for positivo, desloca o início da distribuição uma certa distância de γ à direita da origem. Isto significa que a probabilidade de ocorrerem avarias apenas é maior que 0 depois de γ horas de operação, e não podem ocorrer avarias antes.
- O parâmetro de escala é $\frac{1}{\lambda} = \bar{t} - \gamma = m - \gamma$.
- A distribuição não tem parâmetro de forma, ou seja, apenas tem uma forma.
- A distribuição inicia-se em $t = \gamma$ e diminui posteriormente exponencialmente à medida que t evolui para além de γ .
- À medida que $t \rightarrow \infty$, $f(t) \rightarrow 0$.

Quando $\beta=1$, a distribuição de Weibull torna-se uma distribuição exponencial. Neste caso a função taxa de avarias é constante, isto significa que numa população grande, a frequência com que um produto avaria com o passar do tempo é constante. A figura 4.24 ilustra um caso de uma função densidade de probabilidade de distribuição exponencial é um histograma sobreposto (Luko,1999).

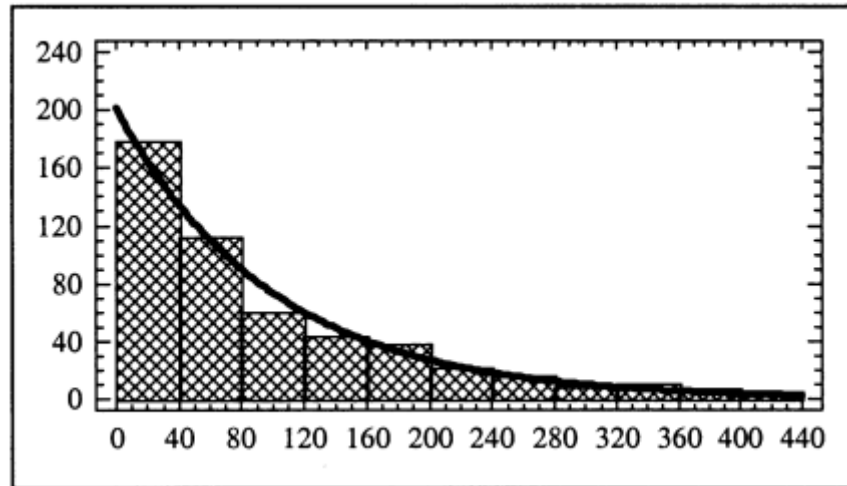


Figura 4.24 – Exemplo de uma função densidade de probabilidade com histograma sobreposto (Luko, S., 1999).

A distribuição monoparamétrica é dada por:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (4.27)$$

Em vida útil, a fiabilidade é dada por:

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\left(\frac{t}{MTBF}\right)} \quad (4.28)$$

A taxa de avarias em vida útil é inversamente proporcional ao tempo médio entre avarias (MTBF) e é dada pela equação 4.29 (Reliasoft, 2024):

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (4.29)$$

Esta distribuição necessita do conhecimento de apenas um parâmetro, λ , para a sua aplicação. Algumas das suas características foram discutidas por Kececioglu (2022).

- O parâmetro de localização, γ , é zero.
- O parâmetro de escala é $\frac{1}{\lambda} = m$.
- À medida que λ diminui, a distribuição é esticada para a direita, e quando diminui, a distribuição é deslocada em direção à origem.

- A distribuição não tem parâmetro de forma, ou seja, apenas tem uma forma.
- A distribuição inicia-se em $t = \gamma$ e diminui posteriormente exponencialmente à medida que t evolui para além de γ .
- À medida que $t \rightarrow \infty$, $f(t) \rightarrow 0$.

A figura 4.25 ilustra o comportamento geral da equação da função densidade de probabilidade com o tempo até à falha.

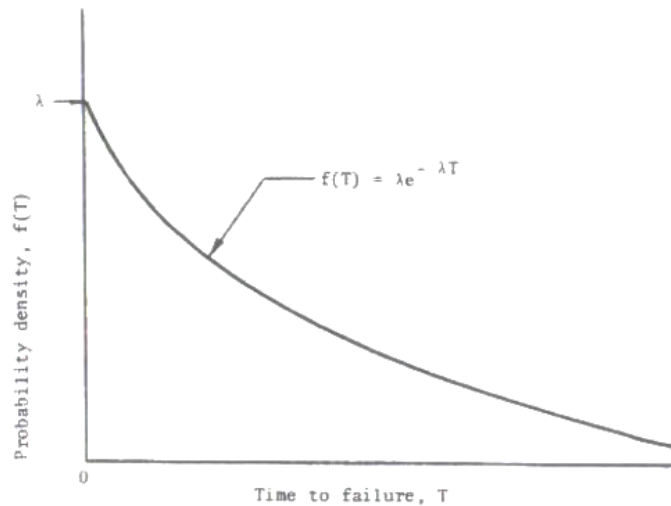


Figura 4.25 - Representação típica da função exponencial monoparamétrica (Kececioglu, B. D., 2002).

A média, mediana e moda da distribuição exponencial monoparamétrica são dadas pelas seguintes equações, respetivamente (Reliasoft, 2024):

$$\bar{T} = \frac{1}{\lambda} = m \quad (4.30)$$

$$\check{T} = \frac{1}{\lambda} 0.693 = 0.693\bar{T} = 0.693m \quad (4.31)$$

$$\tilde{T} = 0 \quad (4.32)$$

4.4. Identificação de metodologias para previsão da vida de bens

Este último tópico no que toca à área da fiabilidade e ensaios acelerados de vida faz a identificação, descrição e aplicabilidade dos vários modelos de carga (equações matemáticas e respetivos parâmetros) passíveis de aplicar nos ensaios acelerados de vida como os modelos para uma única carga, para vários níveis de carga e modelos de riscos e danos acumulados. Por fim, aborda-se a tipologia de amostras que se obtém ao realizar este tipo de ensaios.

Relações para uma ou duas variáveis

- **Modelo de Arrhenius**

A relação ou modelo de Vida-Stress de Arrhenius é provavelmente a relação Stress-Vida mais utilizada quando o tema é ensaios acelerados de vida. Tem sido amplamente usada quando o estímulo ou a variável de aceleração é térmico, ou seja, a temperatura. Este modelo é derivado da equação da taxa de reação proposta pelo físico e químico sueco Svandte Arrhenius, em 1887.

A equação de Arrhenius é dada pela seguinte expressão matemática da equação 4.33:

$$R(T) = A \cdot e^{-\frac{E_a}{k \cdot T}} \quad (4.33)$$

Onde:

- R é a velocidade da reação
- A é uma constante não-térmica desconhecida
- E_a é a energia de ativação (eV)
- k é a constante de Boltzman ($8.6173303 \times 10^{-5} eVK^{-1}$)
- T é a temperatura absoluta (K)

A energia de ativação mede o efeito que a temperatura tem na reação.

O modelo de Arrhenius formula-se assumindo que a vida é proporcional ao inverso da taxa de reação do processo, por isso, a relação é dada por:

$$L(V) = C \cdot e^{\frac{B}{V}} \quad (4.34)$$

Onde:

- L representa uma medida de vida quantificável (ex. vida média, vida característica, mediana, etc.), que faz variar o comportamento da relação, como ilustra a figura 4.26.
- V representa o nível de carga (formulado para temperatura e valores de temperatura em unidades absolutas, graus Kelvin ou graus Rankine).
- C é um dos parâmetros do modelo a ser determinado, ($C > 0$).
- B é outro parâmetro do modelo a ser determinado.

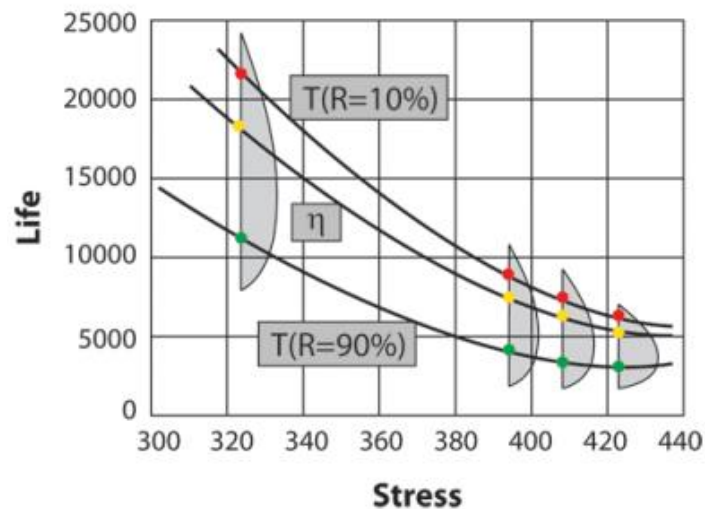


Figura 4.26 - Relação de Arrhenius para características de vida diferentes, assumindo uma distribuição de Weibull (Reliasoft, 2024).

Dependendo da aplicação, o parâmetro B pode ser substituído por:

$$B = \frac{E_a}{k} = \frac{\text{energia de ativação}}{\text{constante de Boltzmann}} = \frac{\text{energia de ativação}}{8.617385 \times 10^{-5} \text{eVK}^{-1}} \quad (4.35)$$

De referir que nesta formulação, E_a é conhecida *à priori*. Se esta for conhecida, resta apenas o parâmetro C.

De modo geral, o fator de aceleração é dado por:

$$A_F = \frac{L_{USE}}{L_{Accelerated}} \quad (4.36)$$

Para o modelo de Arrhenius, este fator é dado por:

$$A_F = \frac{L_{USE}}{L_{Accelerated}} = \frac{C e^{\frac{B}{V_u}}}{C e^{\frac{B}{V_A}}} = \frac{e^{\frac{B}{V_u}}}{e^{\frac{B}{V_A}}} = e^{\left(\frac{B}{V_u} - \frac{B}{V_A}\right)} \quad (4.37)$$

Se B for conhecido *à priori*, a energia de ativação por si só define este fator de aceleração.

- **Relação de Eyring**

A relação de Eyring foi formulada a partir de princípios de mecânica quântica e é mais usualmente utilizada quando a carga térmica é o fator de aceleração. No entanto, esta relação é utilizada quando se trabalha com outras cargas como por exemplo a humidade. A relação é dada por:

$$L(V) = \frac{1}{V} e^{-(A-\frac{B}{V})} \quad (4.38)$$

Onde:

- L representa a medida quantificável de vida, como por exemplo a vida média, a vida característica, a mediana, $B(x)$, etc.
- V representa o nível de carga (os valores da temperatura em unidades absolutas: graus Kelvin ou Rankine).
- A é um dos parâmetros do modelo a ser determinado.
- B é outro parâmetro do modelo a ser determinado.

A relação de Eyring tem semelhanças com a relação de Arrhenius. As suas semelhanças são bastante aparentes se se reescrever da seguinte maneira:

$$L(V) = \frac{1}{V} e^{-(A-\frac{B}{V})} = \frac{e^{-A}}{V} e^{\frac{B}{V}} \text{ ou } \frac{1}{V} \cdot \text{Const.} \cdot e^{\frac{B}{V}} \quad (4.39)$$

E a equação de Arrhenius é dada por:

$$L(V) = C \cdot e^{\frac{B}{V}} \quad (4.40)$$

Comparando a equação reescrita com a equação de Arrhenius, conclui-se que a única diferença entre as duas equações é o termo $\frac{1}{V}$. Em geral, as duas relações fornecem resultados muito semelhantes.

Para o modelo de Eyring, o fator de aceleração é dado por:

$$A_F = \frac{L_{USE}}{L_{Accelerated}} = \frac{\frac{1}{V_u} e^{-(A-\frac{B}{V_u})}}{\frac{1}{V_A} e^{-(A-\frac{B}{V_A})}} = \frac{e^{\frac{B}{V_u}}}{e^{\frac{B}{V_A}}} = \frac{V_A}{V_u} e^{B(\frac{1}{V_u} - \frac{1}{V_A})} \quad (4.41)$$

- **Relação da Potência Inversa**

O modelo da lei da potência inversa é normalmente utilizado para ensaios acelerados que não envolvam a variável térmica (temperatura). É expressa através da seguinte fórmula matemática:

$$L(V) = \frac{1}{KV^n} \quad (4.42)$$

Onde:

- L representa a medida quantificável de vida, como por exemplo a vida média, a vida característica, a mediana, $B(x)$, etc.;
- V representa o nível de carga;
- K é um dos parâmetros do modelo a ser determinado, $K > 0$;
- n é outro parâmetro do modelo a ser determinado.

A lei da potência inversa é representada como uma linha direita quando traçada num gráfico log-log. A equação dessa linha é a seguinte:

$$\ln(L) = -\ln(K) - n \ln(V) \quad (4.43)$$

Nesta lei em específico, o método de traçar as linhas em gráficos é regularmente usado pois obter os parâmetros K e n retiram-se ao determinar a interseção com a origem e o declive, respetivamente.

O parâmetro n nesta lei é uma medida do efeito da carga na vida de um componente. À medida que o seu valor absoluto aumenta, maior é o seu efeito na vida. Valores negativos de n indicam um aumento da vida com o aumento da carga. Um valor absoluto de n próximo ou que se aproxima de 0 indica que a carga em causa tem pouco efeito na vida do componente, como indica a figura 4.27.

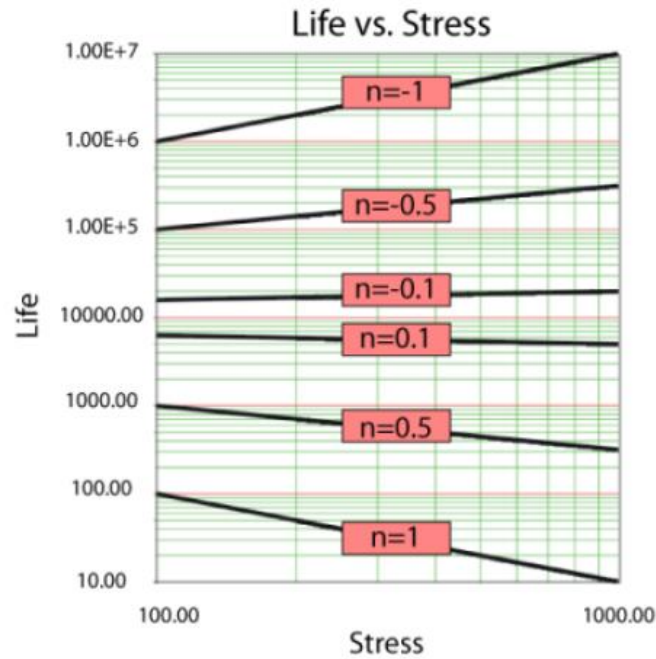


Figura 4.27 - Efeito do parâmetro n na vida de um componente (Reliasoft, 2024).

Para o modelo da potência inversa, o fator de aceleração é dado por:

$$A_F = \frac{L_{USE}}{L_{Accelerated}} = \frac{\frac{1}{KV_u^n}}{\frac{1}{KV_A^n}} = \left(\frac{V_A}{V_u}\right)^n \quad (4.44)$$

Onde:

- L_{USE} é a vida em condições de funcionamento normais
- $L_{Accelerated}$ é a vida a um nível de aceleração definido
- V_u é o nível de carga em condições de funcionamento normais
- V_A é o nível de carga definido

- **Relação Temperatura – Humidade**

A relação Temperatura-Humidade é uma variação da relação de Eyring e foi proposta para prever a vida em condições de funcionamento quando a temperatura e a humidade são as cargas de aceleração num ensaio. Este modelo combinado é dado por:

$$L(V, U) = Ae^{\frac{\phi}{V} + \frac{b}{U}} \quad (4.45)$$

Onde:

- ϕ é um de três parâmetros a ser determinado
- b é o segundo de três parâmetros a ser determinado (também designado de energia de ativação para a humidade)
- A é uma constante e o terceiro dos três parâmetros a ser determinado
- U é a humidade relativa (decimal ou percentagem)
- V é a temperatura (em unidades absolutas)

A relação Temperatura-Humidade pode ser linearizada e traçada num gráfico Vida-Stress. A relação é linearizada retirando o logaritmo natural dos dois lados da relação T-H, ou:

$$\ln(L(V, U)) = \ln(A) + \frac{\phi}{V} + \frac{b}{U} \quad (4.46)$$

Como a vida é agora uma função de duas cargas, um gráfico Vida-Stress apenas pode ser obtido ao se manter constante uma das cargas e variando a outra, tal como o exemplo da figura 4.28 revela. Ao se fazer isso, vai resultar uma linha direita onde o termo do valor carga torna-se outra constante (adicionalmente a $\ln(A)$).

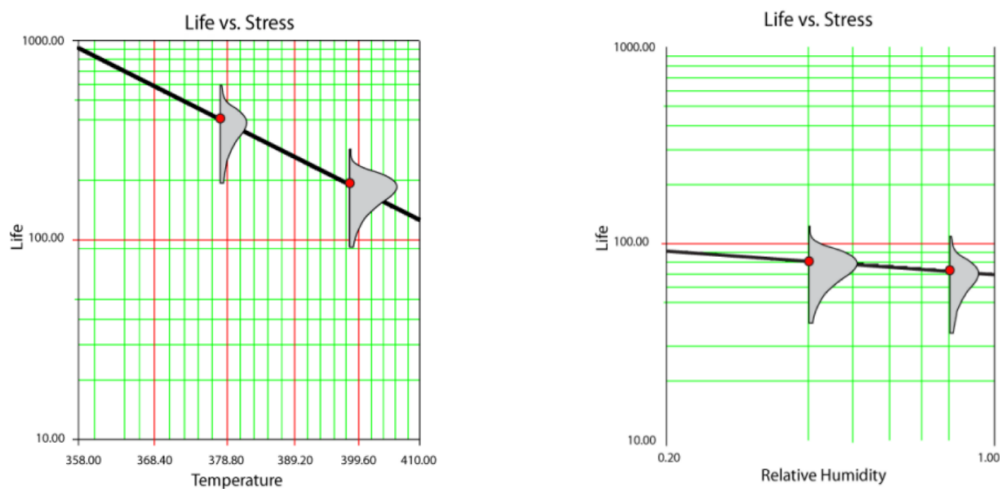


Figura 4.28 - (a) Vida esboçada para temperatura relativa constante. (b) Vida esboçada para temperatura constante (Reliasoft, 2024).

Dependendo de que tipo de carga é mantido constante, é possível concluir da relação linearizada que tanto o parâmetro ϕ como o parâmetro b são o declive da linha resultante. Se, por exemplo a humidade é mantida constante, então ϕ é o declive da linha. Quanto mais acentuado o declive, maior a dependência da vida do componente à temperatura. Noutras

palavras, ϕ é uma medida que o efeito da temperatura tem na vida e b é uma medida que o efeito da humidade relativa tem na vida.

Quando se utiliza a relação T-H, é procurado o efeito tanto da temperatura como da humidade na vida. Por esta razão o ensaio deve ser realizado de numa maneira combinada entre os diferentes níveis de carga dos dois tipos (temperatura e humidade). Por exemplo, assuma-se que um teste acelerado é realizado a dois valores de temperatura e humidade. Os dois valores de temperatura são 300K e 242K e os dois níveis de humidade são 0.6 e 0.8. Seria errado realizar o ensaio a (300K, 0.6) e (343K, 0.8). Fazendo isso não retiraria resultados sobre o efeito da temperatura-humidade na vida de um componente. Uma combinação possível seria (300K, 0.6), (300K, 0.8) e (343K, 0.8). Torna-se claro que ensaiar a (300K, 0.6) e (300K, 0.8), pode ser determinado o efeito da humidade pois a temperatura mantém-se constante. À semelhança, os efeitos da temperatura na vida podem ser determinados ao testar a (300K, 0.8) e a (343K, 0.8) pois a humidade manteve-se constante.

O fator de aceleração desta relação é dado por:

$$A_F = \frac{L_{USE}}{L_{Accelerated}} = \frac{Ae^{\frac{\phi}{V_u} + \frac{b}{U_u}}}{Ae^{\frac{\phi}{V_A} + \frac{b}{U_A}}} \quad (4.47)$$

Onde:

- L_{USE} é a vida em condições de funcionamento normais
- $L_{Accelerated}$ é a vida a um nível de aceleração definido
- V_u é o nível de temperatura em condições de funcionamento normais
- V_A é o nível de temperatura em condições aceleradas
- U_A é o nível de humidade em condições aceleradas
- U_u é o nível de humidade em condições de funcionamento normais

O fator de aceleração é esboço num gráfico relativamente à carga da mesma maneira para os gráficos Vida-Stress, isto é, um tipo de carga é mantido constante e o outro é variado, como ilustra a figura 4.29.

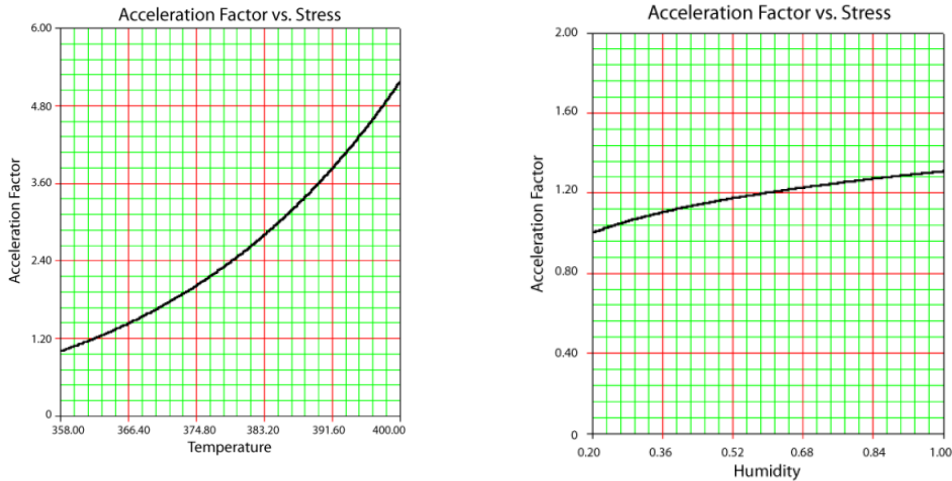


Figura 4.29 – Variação do fator de aceleração com a temperatura e a humidade, respetivamente (Reliasoft, 2024).

- **Relação Temperatura - Não Térmico**

Quando as cargas num ensaio acelerado são a temperatura e uma outra variável não térmica (ex. Tensão), as relações de Arrhenius e Potência Inversa podem ser combinadas de maneira a obter-se a relação (T-NT). Esta relação é dada por:

$$L(U, V) = \frac{C}{U^n e^{-\frac{B}{V}}} \quad (4.48)$$

Onde:

- U é a carga não térmica (ex. tensão, vibração, etc.).
- V é a temperatura (em unidades absolutas).
- B, C, n são parâmetros a serem determinados.

Esta relação pode ser linearizada e traçada num gráfico Vida-Stress. A relação é linearizada retirando o logaritmo natural dos dois lados da relação T-NT:

$$\ln(L(U, V)) = \ln(C) - n \ln(U) + \frac{B}{V} \quad (4.49)$$

Como a vida é agora uma função de duas cargas, a curva Vida-Stress apenas pode ser obtida tornando uma das cargas constantes e variando a outra. Quando a carga não-térmica é mantida constante, a relação T-NT linearizada torna-se:

$$\ln(L(V)) = const. + \frac{B}{V} \quad (4.50)$$

Esta é a equação de Arrhenius e é esboçada num gráfico log-inverso. Quando a carga térmica é mantida constante, a relação torna-se:

$$\ln(L(U)) = \text{const.} - n \ln(U) \quad (4.51)$$

Esta é a equação da Potência Inversa e é esboçada num gráfico log-log. Nas duas figuras seguintes, foi analisada e esboçada num gráfico log-recíproco. No gráfico da esquerda da figura 4.30, a vida é traçada em relação à temperatura, com a tensão mantida constante. Na segunda imagem, a vida é traçada em relação à tensão, mantendo a temperatura constante.

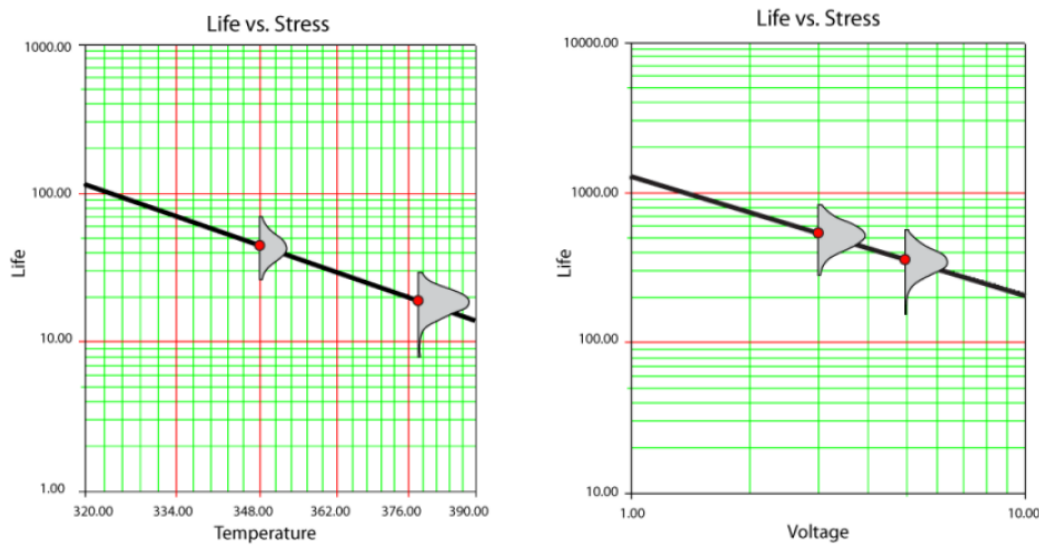


Figura 4.30 – (a) Vida esboçada para tensão constante. (b) Vida esboçada para temperatura constante (Reliasoft, 2024).

Dependendo de qual carga é mantida constante, é possível observar a partir das figuras que o declive das retas são os parâmetros B, que é a medida do efeito que a temperatura tem na vida, e o parâmetro n que é a medida do efeito que a carga não térmica tem na vida. Quanto maior o valor desses parâmetros, maior a dependência da vida por esses parâmetros.

O fator de aceleração para a relação T-NT é dado por:

$$A_F = \frac{L_{USE}}{L_{Accelerated}} = \frac{\frac{C}{U_u^n} e^{\frac{B}{V_u}}}{\frac{C}{U_A^n} e^{\frac{B}{V_A}}} = \left(\frac{U_A}{U_u}\right)^n e^{B\left(\frac{1}{V_u} - \frac{1}{V_A}\right)} \quad (4.52)$$

Onde:

- L_{USE} é a vida em condições normais de funcionamento
- V_u é o nível de temperatura em condições de funcionamento normais

- V_A é o nível de temperatura em condições aceleradas
- U_A é o nível de carga não-térmica em condições aceleradas
- U_u é o nível de carga não-térmica em condições de funcionamento normais

O fator de aceleração é esboçado relativamente à carga mantendo uma das cargas constantes e variando a outra (figura 4.31), como se viu anteriormente para situações idênticas.

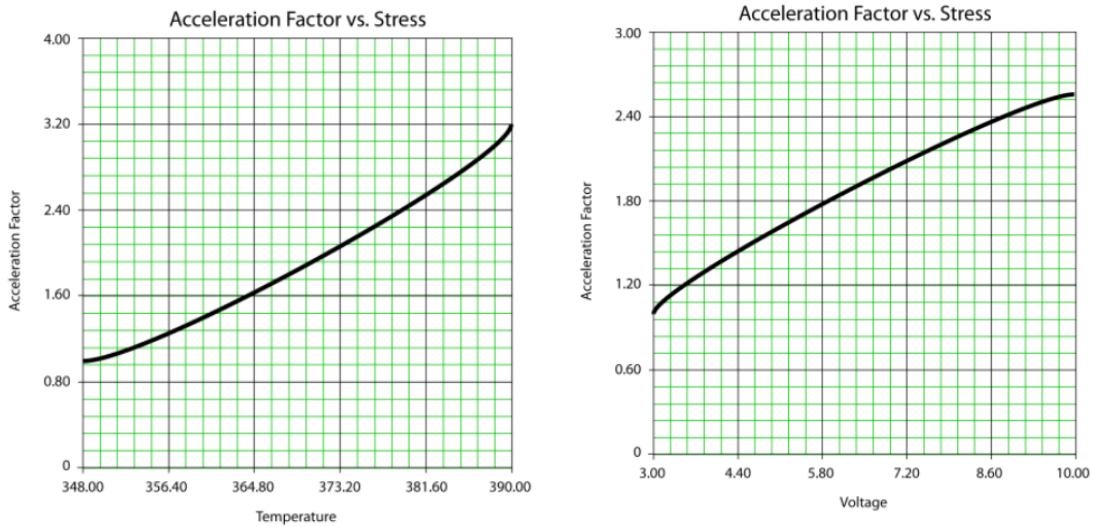


Figura 4.31 - Variação do fator de aceleração com a temperatura e a tensão, respetivamente (Reliasoft, 2024).

Relações para múltiplas variáveis

Na maior parte dos casos práticos, a vida de um componente é função de mais que uma ou duas variáveis (tipos de carga). Adicionalmente, existem muitas aplicações onde a vida não é função de uma carga e é procurada outro tipo de variável de engenharia.

- **Relação geral Log – Linear**

Quando um ensaio envolve múltiplas cargas ou requiere o envolvimento de uma variável de engenharia, é necessária uma relação multivariável geral. Essa relação é a relação geral Log-Linear, que descreve uma característica da vida como função de um vetor de n cargas, $\bar{X} = (X_1, X_2 \dots X_n)$. Matematicamente, a relação é dada por:

$$L(\bar{X}) = e^{\alpha_0 + \sum_{j=1}^n \alpha_j X_j} \quad (4.53)$$

Onde:

- α_0 e α_j são parâmetros do modelo
- X é um vetor de n cargas

A relação pode ser posteriormente modificada através de transformações e reduz-se a relações apresentadas anteriormente. Por exemplo, considerando uma aplicação de apenas uma carga e uma transformação Inversa em X , tal que $V = \frac{1}{X}$:

$$L(V) = e^{\alpha_0 + \frac{\alpha_1}{V}} = e^{\alpha_0} e^{\frac{\alpha_1}{V}} \quad (4.54)$$

É de fácil entendimento que a relação para apenas uma carga e uma transformação inversa pode ser reduzida à relação de Arrhenius, onde:

- $C = e^{\alpha_0}$
- $B = \alpha_1$

Ou:

$$L(V) = C e^{\frac{B}{V}} \quad (4.55)$$

À semelhança, quando se aplica uma transformação logarítmica em X tal que $X = \ln(V)$, a relação reduz-se à relação da Lei da Potência Inversa. Adicionalmente, se estiver presente mais que uma carga, é possível aplicar uma transformação diferente para cada carga de maneira a criar uma combinação de relações semelhante às relações T-H e T-NT.

- **Modelo Riscos Proporcionais**

Este modelo foi desenvolvido para estimar os efeitos de diferentes variáveis que influenciam os tempos até à falha de um sistema. O modelo tem sido recentemente utilizado no campo da biomédica e ultimamente tem havido um aumento de interesse na área da engenharia de fiabilidade. Na sua forma original, o modelo é não-paramétrico, ou seja, não se assume sobre a natureza ou aspeto da distribuição de falha. Neste caso, a formulação original não-paramétrica e a fórmula paramétrica do modelo serão consideradas usando a distribuição de vida de Weibull.

Na formulação não-paramétrica, a taxa de falha de um sistema é afetada não só pelo seu tempo de operação mas também pelas variáveis sob as quais o sistema opera. Por exemplo, uma unidade que tem sido testada sob uma combinação de várias cargas tais como humidade, temperatura, tensão, etc. Tais fatores afetam a taxa de falha de uma unidade.

A taxa de falha instantânea de uma unidade é dada por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (4.56)$$

Onde:

- $f(t)$ é a função densidade de probabilidade
- $R(t)$ é a função fiabilidade

Para o caso de uma taxa de falha de uma unidade depender não só do tempo como de outras co variáveis, a equação 4.56 deve ser modificada de modo a ser função do tempo e das co variáveis. O modelo dos riscos proporcionais assume que a taxa de falha é produto de:

- Uma taxa de falha base arbitrada ou não especificada, $\lambda_0(t)$, que é função apenas do tempo
- Uma função positiva $g(x, \bar{A})$, independente do tempo, que incorpora os efeitos de um número de co variáveis tais como a humidade, a temperatura, a pressão, a tensão, etc.

A taxa de falha é assim dada por:

$$\lambda(t, \bar{X}) = \lambda_0(t) \cdot g(\bar{X}, \bar{A}) \quad (4.57)$$

Onde:

- \bar{X} é um vetor de linha que consiste das co variáveis:

$$\bar{X} = (x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (4.58)$$

- \bar{A} é um vetor de coluna que consiste em parâmetros desconhecidos (também designados de parâmetros de regressão) do modelo:

$$\bar{A} = (a_1, a_2, \dots, a_m)^T \quad (4.59)$$

m = número de variáveis relativas a cargas (independentes do tempo)

Pode ser assumido que se conhece a forma de $g(x, \bar{A})$ e $\lambda_0(t)$ não é especificada. Podem ser utilizadas várias formas de $g(x, \bar{A})$, no entanto a forma exponencial é a mais utilizada devido à sua simplicidade, e é dada por:

$$g(\bar{X}, \bar{A}) = e^{\bar{A}^T \bar{X}} = e^{\sum_{j=1}^m a_j x_j} \quad (4.60)$$

A taxa de falha pode então ser escrita da seguinte maneira:

$$\lambda(t, \bar{X}) = \lambda_0(t) \cdot e^{\sum_{j=1}^m a_j x_j} \quad (4.61)$$

Na formulação paramétrica assume-se uma distribuição subjacente que neste caso em específico, será a de Weibull. Neste caso, a taxa de falha base é dada por:

$$\lambda_0 = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (4.62)$$

A taxa de falha do modelo de riscos proporcionais torna-se:

$$\lambda(t, \bar{X}) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{\sum_{j=0}^m a_j x_j} \quad (4.63)$$

Torna-se mais conveniente definir um co variável adicional, $x_0 = 1$, de modo a permitir ao parâmetro de forma β ser incluído no vetor dos coeficientes de regressão. A taxa de falha TH fica então com a seguinte forma:

$$\lambda(t, \bar{X}) = \beta \cdot t^{\beta-1} \cdot e^{\sum_{j=0}^m a_j x_j} \quad (4.64)$$

- **Modelo de Riscos/Danos Acumulados**

Nesta secção apresentam-se formulações generalizadas do modelo de dano acumulado onde a carga pode ser qualquer função do tempo e a relação Vida-Stress é baseada relação da Potência. Dado uma carga variante no tempo $x(t)$ e considerando a relação da Lei da Potência, a relação Vida-Stress é dada por:

$$L(x(t)) = \left(\frac{a}{x(t)}\right)^n \quad (4.65)$$

1. Formulação Exponencial

Dado uma carga variante no tempo, $x(t)$ e assumindo a relação da lei da potência, a vida média é dada por:

$$\frac{1}{m(t, x)} = s(t, x) = \left(\frac{x(t)}{a}\right)^n \quad (4.66)$$

A função fiabilidade de uma unidade sujeita a uma única carga é dada por:

$$R(t, x(t)) = e^{-I(t,x)} \quad (4.67)$$

Onde:

$$I(t, x) = \int_0^t \left(\frac{x(u)}{a} \right)^n du \quad (4.68)$$

Consequentemente, a função densidade de probabilidade é:

$$f(t, x) = s(t, x)e^{-I(t,x)} \quad (4.69)$$

2. Formulação Weibull

Dado uma carga variante no tempo, $x(t)$ e assumindo a relação da lei da potência, a vida média é dada por:

$$\frac{1}{\eta(t, x)} = s(t, x) = \left(\frac{x(t)}{a} \right)^n \quad (4.70)$$

A função fiabilidade de uma unidade sujeita a uma única carga é dada por:

$$R(t, x(t)) = e^{-(I(t,x))^\beta} \quad (4.71)$$

Onde:

$$I(t, x) = \int_0^t \left(\frac{x(u)}{a} \right)^n du \quad (4.72)$$

Consequentemente, a função densidade de probabilidade é:

$$f(t, x) = \beta s(t, x)(I(t, x))^{\beta-1} e^{-(I(t,x))^\beta} \quad (4.73)$$

3. Formulação LogNormal

Dado uma carga variante no tempo, $x(t)$ e assumindo a relação da lei da potência, a vida média é dada por:

$$\frac{1}{\bar{T}(t, x)} = s(t, x) = \left(\frac{x(t)}{a} \right)^n \quad (4.74)$$

A função fiabilidade de uma unidade sujeita a uma única carga é dada por:

$$R(t, x(t)) = 1 - \Phi(z) \quad (4.75)$$

Onde:

$$z(t, x) = \frac{\ln I(t, x)}{\sigma_T'} \quad (4.76)$$

$$I(t, x) = \int_0^t \left(\frac{x(u)}{a} \right)^n du \quad (4.77)$$

Consequentemente, a função densidade de probabilidade é:

$$f(t, x) = \frac{s(t, x)\varphi(z(t, x))}{\sigma_T' I(t, x)} \quad (4.78)$$

A estimação dos parâmetros para todas as metodologias apresentadas pode ser obtida através de métodos de estimação de semelhança (*maximum likelihood estimation methods*), e os intervalos de confiança podem ser aproximados utilizando a matriz de Fisher. Assim que os parâmetros estejam determinados, todas as outras características de vida de interesse (vida média, taxa de falha, etc.) podem ser obtidas utilizando definições de propriedades estatísticas anteriormente abordadas.

4.5. Tipologia de Amostras

No que toca a dados de tempos até à falha de uma unidade, existem os dados completos, dados intervalados e dados censurados à esquerda e à direita.

- **Dados completos até à falha** - O conjunto de tempos até à falha, ou seja, os dados completos, são obtidos ao registarem-se os instantes exatos onde os componentes falham. Por exemplo, se se testarem 5 unidades e todas falharem, e se registarem os instantes a que falha, obter-se-ia informações completas acerca do tempo até à falha de todo o conjunto de amostras.
- **Tempos até à falha com suspensões (Censurados à direita)** - O termo suspensão descreve as unidades que não falharam durante o período de observação. Tais unidades são designadas como informação censurada à direita. Por exemplo, se se testarem 5 unidades e apenas 3 falharem no fim do teste, o tempo de operação das 2 unidades que não falharam é designado como dados censurados à direita. O termo

censurado à direita significa que o evento de interesse está à direita do ponto de análise na escala do tempo.

- **Tempos até à falha intervalados e dados censurados à esquerda** - O termo “dados com intervalos censurados” descreve a incerteza quanto ao instante exato em que a unidade irá falhar dentro de um intervalo. Este tipo de dados origina frequentemente de ensaios ou situações onde as unidades não são monitorizadas continuamente. Por exemplo, se se testarem 5 unidades e se forem inspecionadas de 100 em 100 horas, apenas se sabe se as unidades falharam ou não entre inspeções. Mais especificamente, se se inspecionar uma certa unidade e se se encontrar a funcionar, e posteriormente, às 200h se verificar novamente e se a mesma unidade já tenha falhado, a única informação que se obtém é que a unidade falhou entre as 100 e 200h. Os dados censurados à esquerda são uma variante dos tempos com intervalos, uma vez que o intervalo começa no instante 0 e acaba num instante qualquer seguinte (Reliasoft, 2024).

A ilustração da figura 4.32 simplifica visualmente os tipos de dados que foram explicados acima.

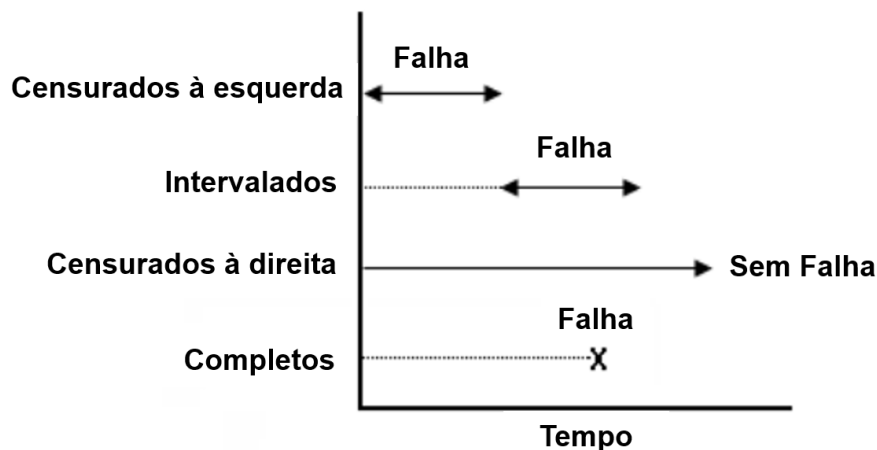


Figura 4.32 – Tipologia de amostras. Adaptado de: Reliasoft (2024)

Capítulo 5 – Caso de Estudo

O trabalho desenvolvido nesta dissertação enquadra-se no projeto de investigação: “*HealCap – Self healing electrodes for Hybrid Supercapacitors: A new path to enable electrochemical energy storage*”, financiado pela FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia). O principal objetivo do projeto é o desenvolvimento de uma nova geração de elétrodos de óxidos de manganês (MnO_x), capazes de se auto repararem, para supercondensadores híbridos de alto desempenho. Neste contexto, a avaliação da durabilidade destes novos materiais é um fator chave para o sucesso dos dispositivos.

Esta dissertação corresponde a uma tarefa desse projeto, e tem como objetivo propor um modelo de degradação para prever o tempo de vida dos supercondensadores desenvolvidos recorrendo a ensaios acelerados.

Para esse fim foram utilizados protótipos à escala laboratorial destes dispositivos, cuja composição se encontra detalhada na figura 5.1. Estes são constituídos por um elétrodo do material desenvolvido (MnO_2) e por outro elétrodo de carbono comercial, imersos num eletrólito aquoso (sulfato de sódio). A célula foi selada no topo para evitar evaporação e a distância entre os elétrodos foi de aproximadamente 1 centímetro.

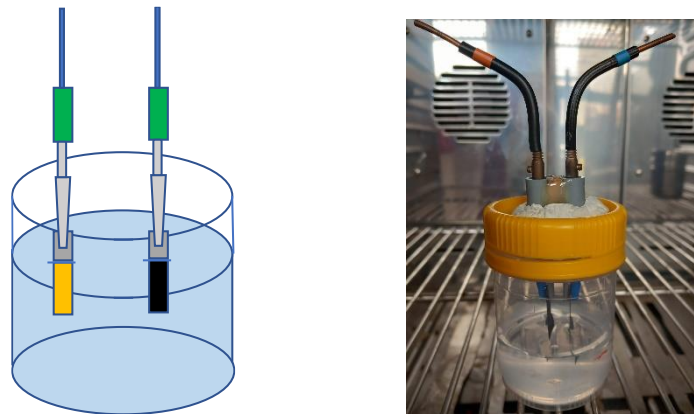


Figura 5.1 – (a) Vista esquemática do dispositivo assimétrico. (b) Imagem do protótipo à escala laboratorial

Nesta abordagem, a estabilidade a longo prazo dos novos supercondensadores foi avaliada através da aplicação de um envelhecimento artificial, comumente designado por “*floating test*”. Como representado na figura 5.2, este tipo de testes envolve a imposição de uma tensão constante à célula, durante um período t (tempo de pulso), após o que são realizados ciclos de carga/descarga para determinar a capacidade do dispositivo. O processo é repetido até à degradação do dispositivo.

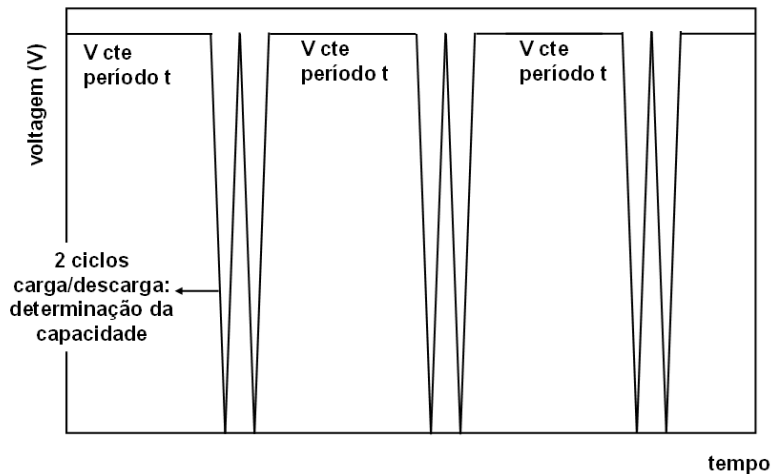


Figura 5.2 – Representação esquemática do “floating test”

A medição periódica da capacidade permite monitorizar a degradação do protótipo ao longo do tempo. Efetivamente, a análise da variação que este parâmetro sofre ao longo do tempo fornece indicações sobre a eficiência do dispositivo continuar a armazenar energia à medida que envelhece. Definiu-se a “falha do supercondensador” como o tempo ao fim do qual a capacidade foi reduzida para 80% do seu valor inicial, valor proposto pelos fabricantes, que recomendam a substituição dos supercondensadores quando se verificar uma perda no valor de capacidade superior a 20%.

No presente estudo, para a realização dos *floating tests*, o protótipo foi submetido a diferentes potenciais de 1.2, 1.15, 1.10, 1.05, 1.00, 0.95 e 0.90 V (com tempo de pulso de 1h) tendo-se determinado o tempo até à falha para cada um destes valores. Foi também realizado um outro grupo de ensaios, onde o protótipo foi submetido a tensões francamente superiores à tensão normal de operação dos dispositivos, com potenciais de 1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.75 e 3 V, tempo de pulso 20s. Este procedimento permitiu reduzir significativamente o tempo de obtenção dos dados experimentais e, assim, garantir a sua reprodutibilidade.

As imagens da figura 5.3 mostram o *setup* de ensaio que foi utilizado para a realização destes ensaios.

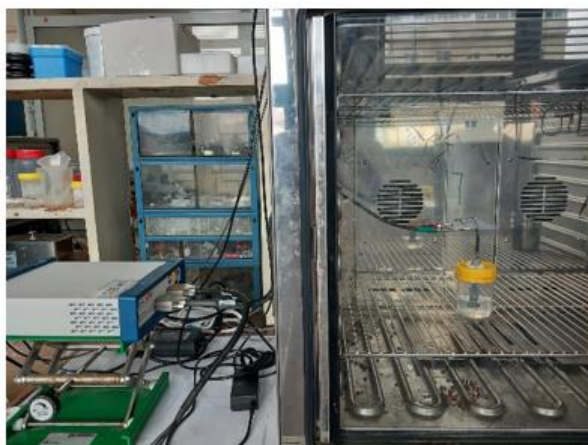


Figura 5.3 – Montagem eletroquímica para obtenção dos dados experimentais

- **Floating tests (Efeito da tensão)**

Na figura 5.4 apresenta-se o primeiro grupo de dados experimentais (realizados pela equipa do projeto do IST) obtidos a partir dos *floating tests* nos quais foram aplicadas as tensões mais baixa. Na referida figura pode observar-se a variação da capacidade do protótipo com o tempo para os diferentes valores de tensão utilizados nos ensaios.

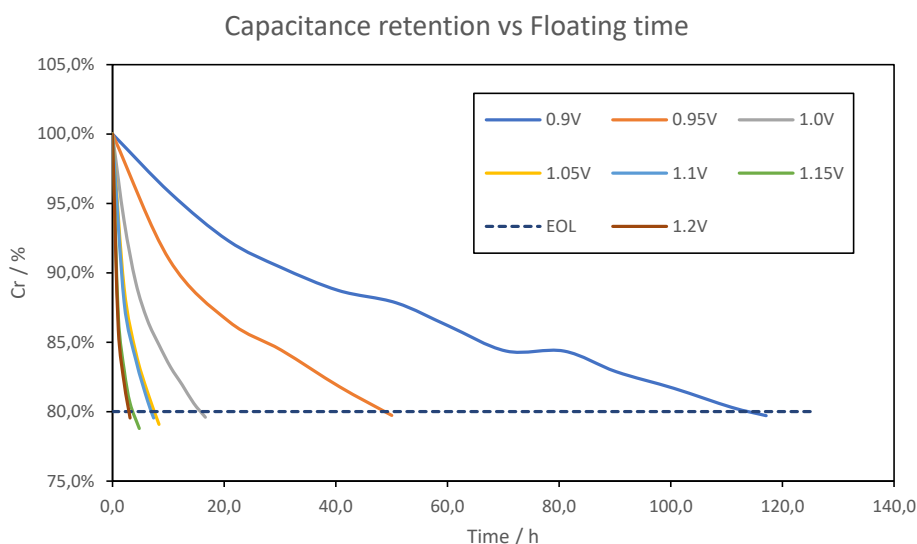


Figura 5.4 – Variação da capacidade para diferentes tensões utilizadas nos ensaios

Tendo em consideração os resultados dos “*floating tests*” realizados ao protótipo, foram registados os tempos até à falha para as diferentes tensões aplicadas.

Considerando o tempo até à falha como o período ao fim do qual a capacidade é reduzida para 80% do seu valor inicial (linha a tracejado no gráfico), na Tabela 5.1 apresentam-se os

valores dos tempos até à falha obtidos para as diferentes tensões usados nos *floating tests*. Note-se que no que toca a dados de tempos até à falha não se utilizaram dados em intervalos nem dados censurados, mas sim dados completos, sendo estes resultantes dos vários ensaios de degradação realizados.

Tabela 5.1 – Valores de ensaio de TTF para diferentes tensões

ID	Tensão [V]	TTF [min]
1	0.90	7023,383
2	0.95	3002,183
3	1.00	998,833
4	1.05	499,200
5	1.10	441,900
6	1.15	287,183
7	1.2	188,700

Através de uma observação rápida aos resultados obtidos verifica-se, tal como era expectável, que a tensão aplicada tem influência direta na degradação, e conseqüente tempo de vida verificando-se que quanto maior for a tensão aplicada, menor é a durabilidade do dispositivo (figura 5.5).

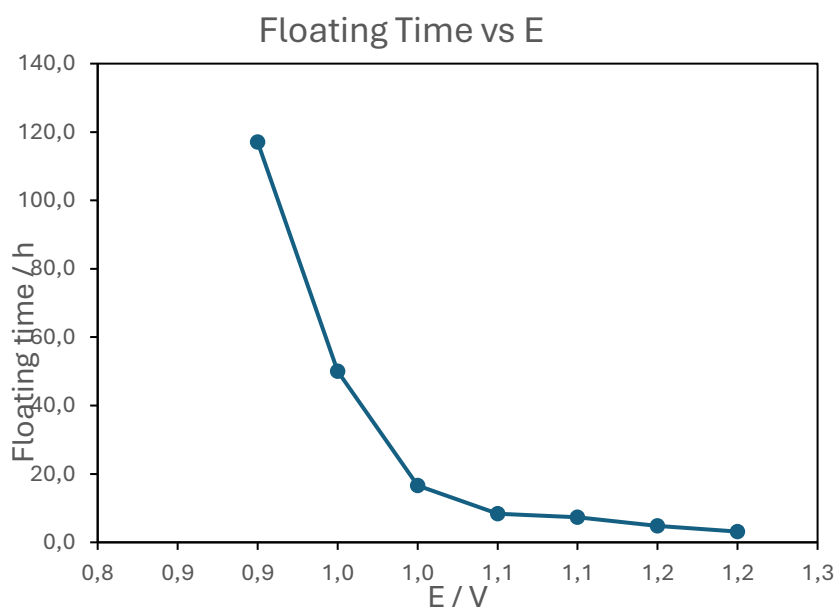


Figura 5.5 – Representação gráfica da diminuição do tempo de vida com a variação da tensão

Tal como referido, por forma a aferir os ensaios realizados e ter mais informação, foram realizados novos ensaios, desta vez com um tempo de pulso de 20s usando para os *floating*

tests tensões mais elevadas, superiores às voltagens normais de funcionamento dos supercondensadores. A tabela 5.4 mostra os resultados alcançados.

Tabela 5.2 - Valores de ensaio de TTF para a gama de voltagens superior

ID	Tensão [V]	TTF [min]
1	1.50	38,7
2	1.75	21,7
3	2.00	12,0
4	2.25	9,0
5	2.75	6,7
6	3.00	3,3

Também neste conjunto de dados, através de uma primeira observação dos resultados se verifica a dependência da tensão aplicada na degradação, e conseqüentemente tempo de vida (figura 5.11) dos dispositivos, sendo essa influência, tal como esperado, semelhante à encontrada nos ensaios anteriores – quanto maior é a tensão, menor é a durabilidade do protótipo.

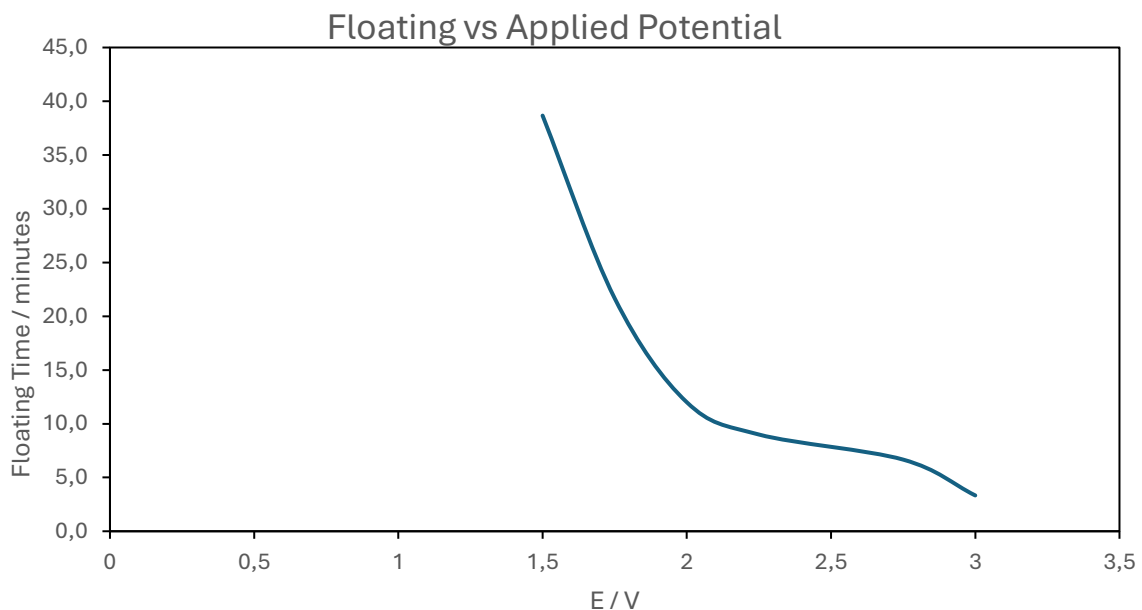


Figura 5.6 – Representação gráfica da diminuição do tempo de vida com a variação da tensão

Recorreu-se à ferramenta Weibull++ do software Reliasoft, da HBK, para introduzir os dados e analisar as informações acerca da vida destes protótipos sujeitos a vários níveis de tensões. Para isso, e como os intervalos entre os dois conjuntos de tensões são muito próximos, fez-se uma agregação de todos os tempos até à falha, e respetivas tensões aplicadas. Considerou-se uma tensão de funcionamento normal (em condições de uso) de

0.75V, a Lei da Potência Inversa como modelo de degradação e Weibull como a distribuição de vida subjacente.

Tabela 5.3 – Parâmetros do modelo de degradação e da distribuição de vida

Parâmetros	
Modelo	Lei da Potência Inversa (IPL)
Distribuição	Weibull
Análises	MLE
Beta	1,466303
K	0,000673
n	5,910868
Eta (min)	8132,455048

Os resultados apresentados correspondem aos coeficientes da Lei da Potência Inversa e aos parâmetros da distribuição assumida. O β é o parâmetro de forma, K e n são parâmetros do modelo, e η é o parâmetro de escala, ou vida característica.

Um valor de fator de forma superior a 1 (como é neste caso) significa que os tempos até à falha apresentam um comportamento típico de bens na fase de desgaste ou envelhecimento, ou seja, apresentam uma taxa de falha crescente. Relativamente ao valor de “n”, uma vez que é positivo, isso representa que o aumento de carga em causa levará a uma diminuição da vida do bem (conforme descrito no Capítulo 4), tal como era expectável.

Do software retira-se também o fator de aceleração da degradação para um nível de tensão de interesse. Por exemplo, para um uso acelerado com 1.2 V, o fator de aceleração é de cerca de 16.

Evidentemente que com o aumento da tensão aplicada, o fator de aceleração também aumenta, no entanto, como se pode observar no gráfico da figura 5.7, o seu valor vai aumentando exponencialmente a partir da tensão de 1.5 V. O salto vai desde um fator de aceleração de 16.1 a 1.2 V para um fator de aceleração de 60.2 a 1.5 V.

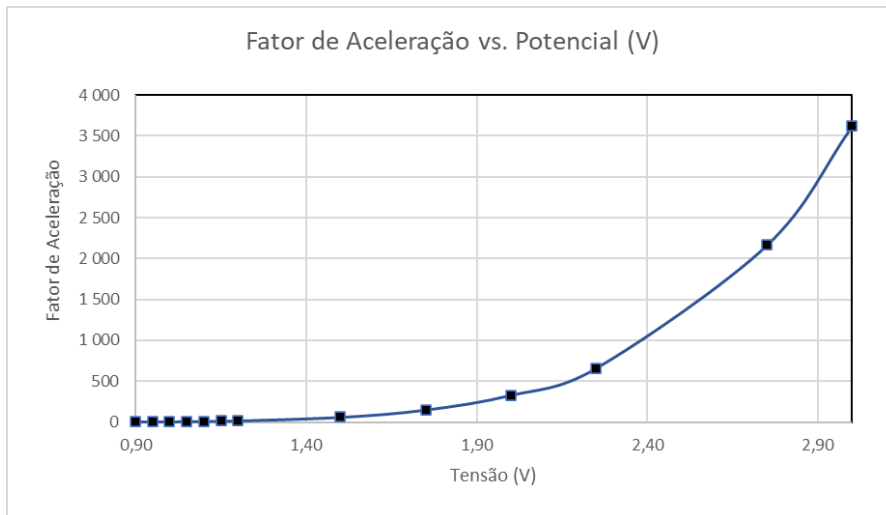


Figura 5.7 – Evolução do fator de aceleração com a tensão



Figura 5.8 – Valor do fator de aceleração para um uso acelerado de 1.2V

Podemos validar este resultado utilizando a equação teórica (4.44) apresentada no Capítulo anterior, que é:

$$A_F = \left(\frac{V_A}{V_u}\right)^n = \left(\frac{1,2}{0,75}\right)^{5,91} = 16,082$$

Como o objetivo deste estudo é obter informação sobre a vida dos supercondensadores a um nível de uso normal (0,75 V), para esse valor, obteve-se um tempo médio de vida de 7362,7 min (figura 5.9).

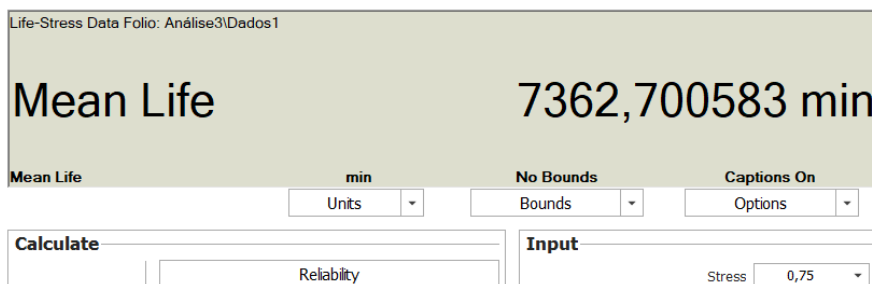


Figura 5.9 – Vida média

Este valor representa o tempo até ao qual cerca de 63,2% dos bens em estudo e a funcionar em idênticas condições, irão falhar (neste caso atingir uma perda de capacidade de 20% relativamente à sua capacidade inicial). De uma forma muito simples, em cada 100 supercondensadores, é expectável que só cerca de 36 ou 37 ainda apresentem uma capacidade acima de 80% ao fim de 7362,7 min.

Com esta informação, é possível retirar outros valores como a fiabilidade, probabilidade de falha e a taxa de falha, ao se assumir um tempo de missão desejado. A título de exemplo, se for do interesse saber o comportamento para uma missão de 10000 min, obtêm-se os seguintes valores:

Tabela 5.4 – Valores de vida para uma missão de 10000 minutos

Entrada do Utilizador	
Tensão	0,75
Tempo Final da Missão (min)	10000
Saída do ALTA	
R (t=10000 min)	0,258186
Q (t=10000 min)	0,741814
FR	0,000199/min
Vida B50%	6333,8 min

A fiabilidade aos 10000 minutos é cerca de 25,8% e a sua probabilidade de falha é o complementar, 74,2%. A taxa de falha é neste caso, de 0,000199 falhas/min (2×10^{-4} falhas/min). Para além disso, a vida para a qual a fiabilidade é, por exemplo 50%, é de 6333,83 min.



Figura 5.10 – Valores de vida para uma missão de 10000 min

Assim como foi feito para este exemplo onde se definiu uma missão de 10000 min, a mesma análise pode ser feita para qualquer outro tipo de missão onde se pretenda determinar a fiabilidade, a probabilidade de falha acumulada e instantânea, a taxa de falhas ou qualquer outra informação da fiabilidade

Para além disso, retiram-se gráficos relativos à vida destes componentes, como a curva da Função Densidade de Probabilidade (figura 5.11), a fiabilidade (figura 5.12) e a probabilidade de falha para o valor de utilização normal (figura 5.13) tal como a probabilidade de falha com base na distribuição de Weibull, para cada nível de tensão e para a tensão de uso normal (figura 5.14).

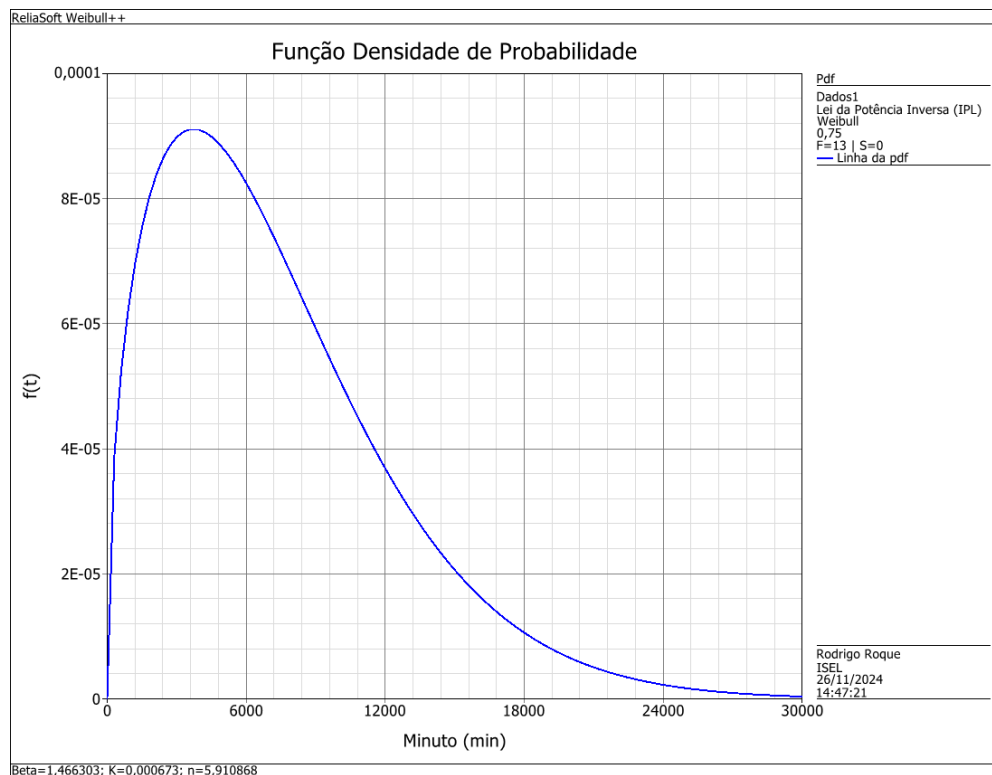


Figura 5.11 – Gráfico Função Densidade de Probabilidade

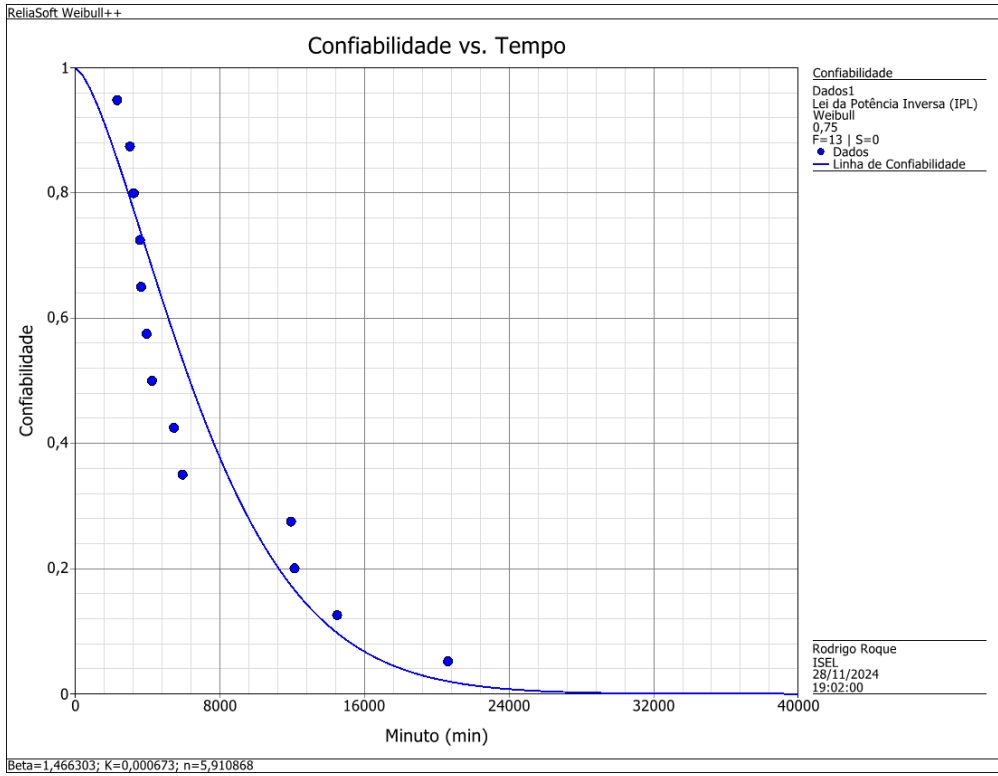


Figura 5.12 – Fiabilidade ao longo do tempo (0.75V)

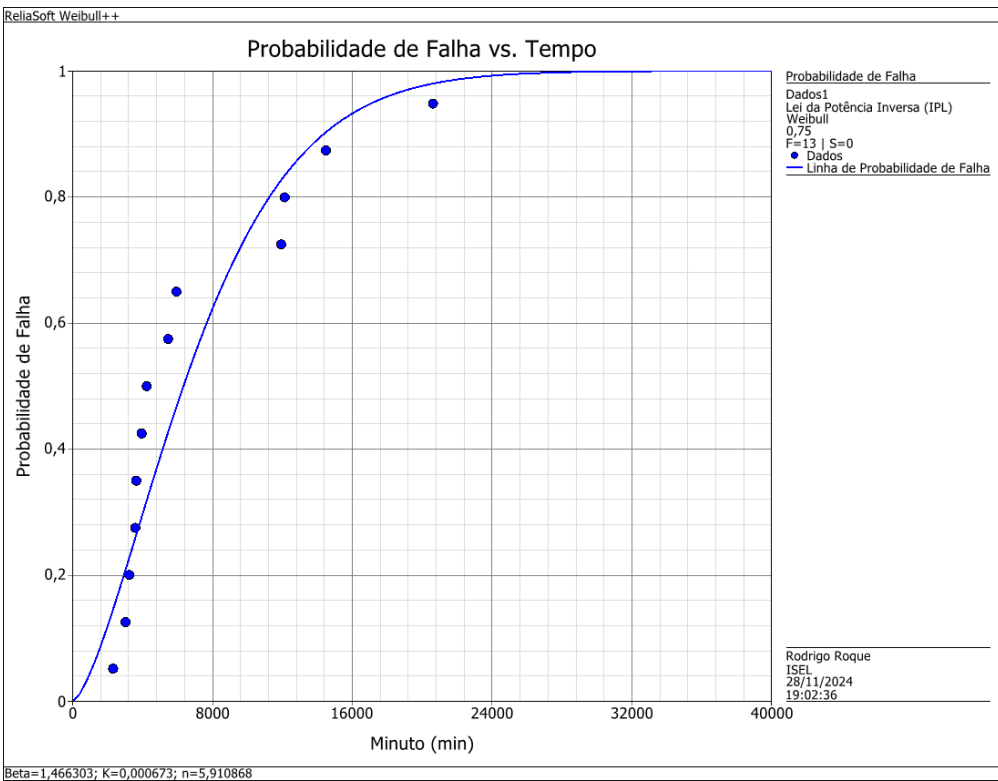


Figura 5.13 – Probabilidade de Falha ao longo do tempo (0.75V)

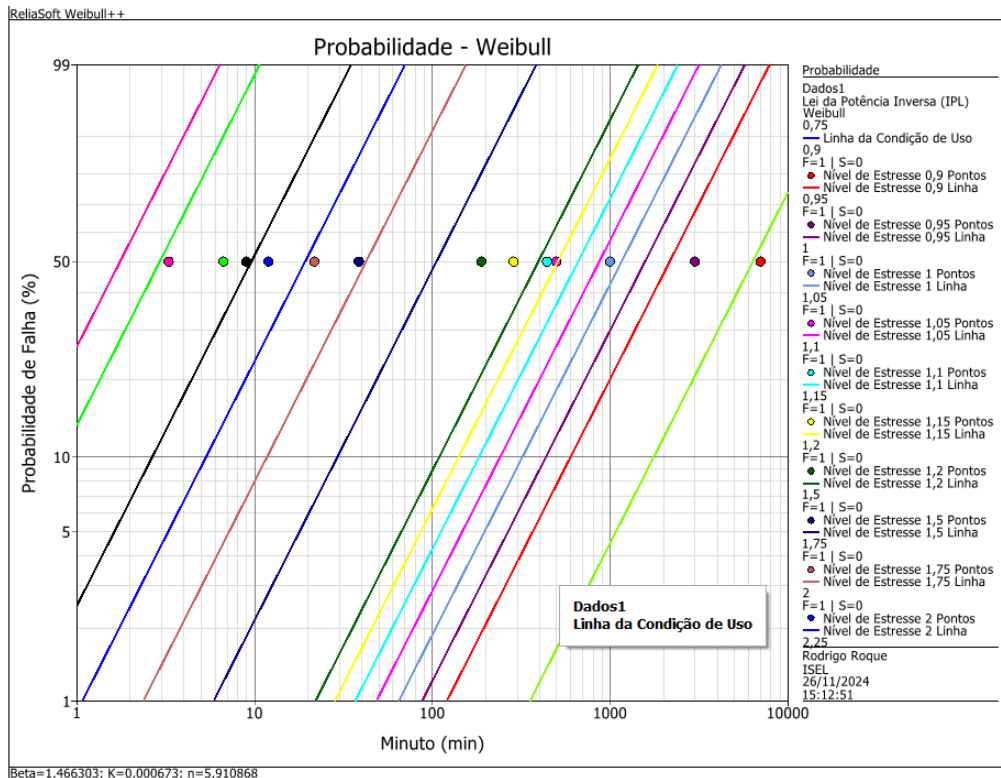


Figura 5.14 – Evolução da probabilidade de falha para cada nível de tensão e para a tensão de uso normal

Os intervalos de confiança, sendo medidas estatísticas que indicam o grau de certeza que os resultados obtidos numa análise são representativos da realidade, podem ser integrados na análise no software, utilizando a matriz de Fisher.

Se for considerado *à priori* um intervalo de confiança bilateral a 90%, significa que há 90% de probabilidade que o intervalo de confiança contenha o verdadeiro valor.

Assumindo este valor como exemplo, obtém-se os resultados apresentados na figura 5.15.

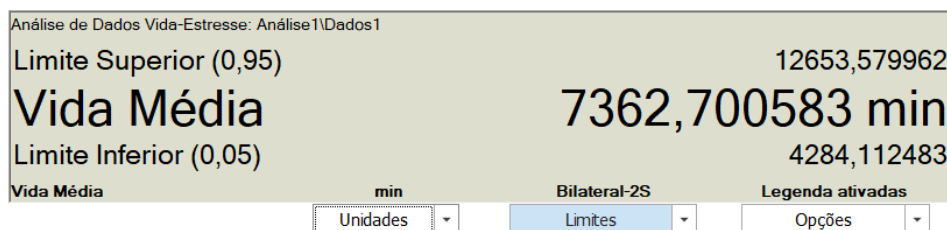


Figura 5.15 – Valores para o limite de confiança a 90%

O limite inferior a 5% dá um valor de 4284,11 min, enquanto que o limite superior a 95% dá um valor de 12653,56 min, ou seja, estima-se que o valor real da vida média esteja entre esses dois valores. Isto significa ainda que existe uma probabilidade de 10% de que o valor real esteja fora deste intervalo de confiança que se estabeleceu.

As figuras 5.16 e 5.17 ilustram graficamente o intervalo de confiança na vida média e na fiabilidade.

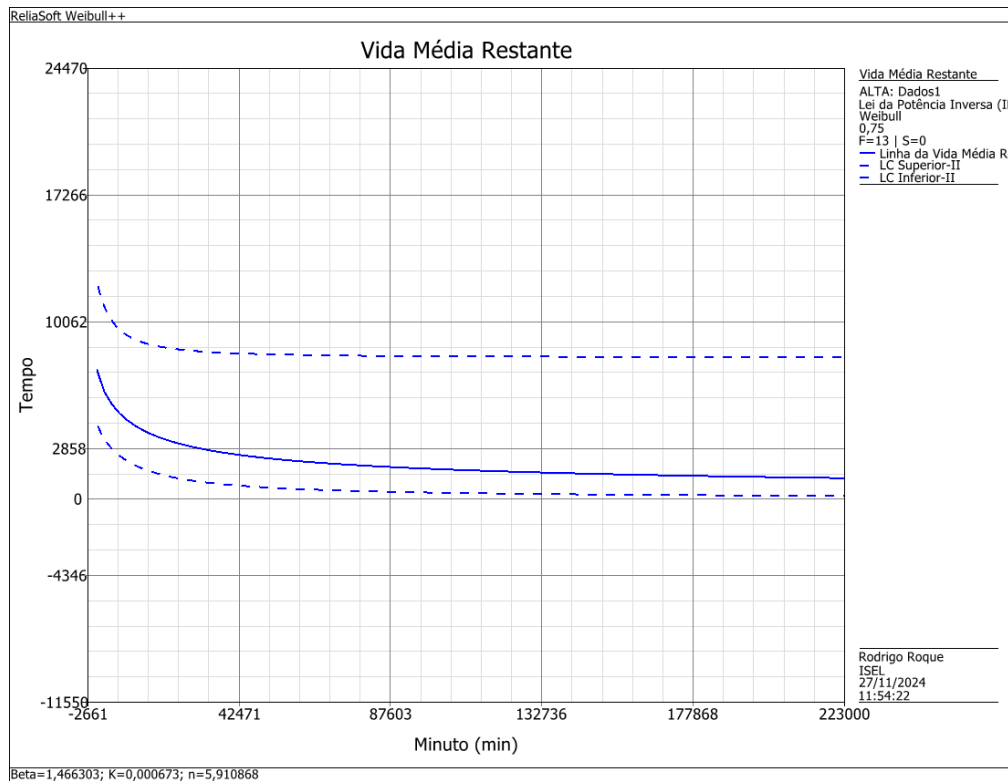


Figura 5.16 – Limite de confiança 90% na vida média

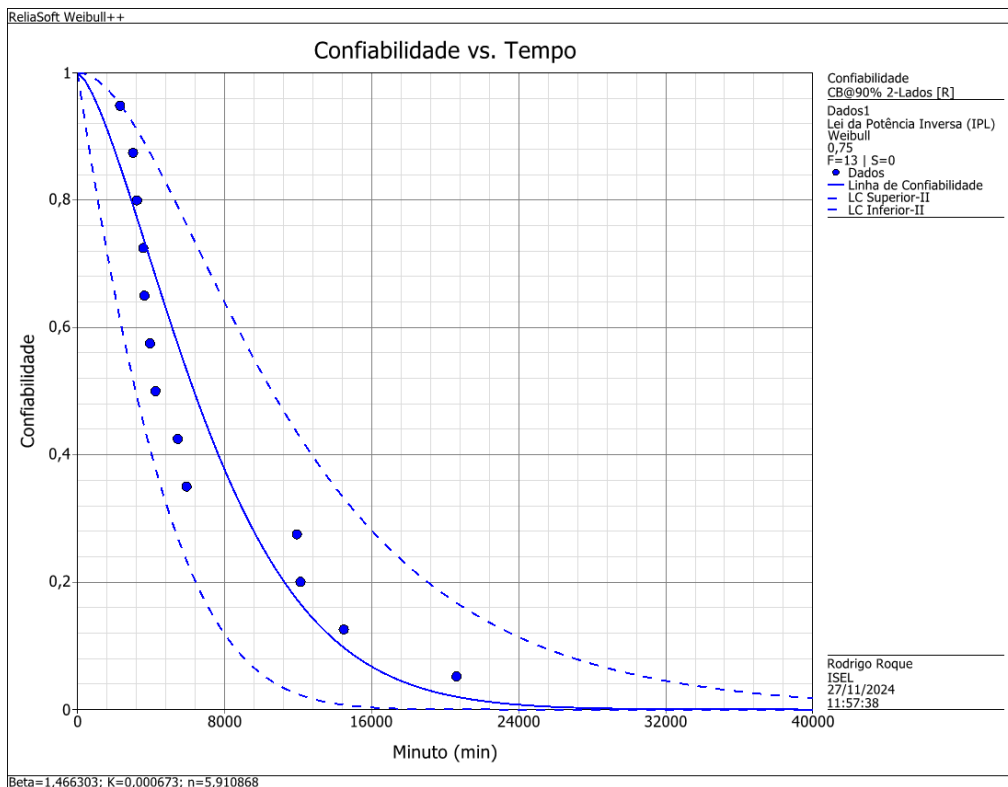


Figura 5.17 – Limite de confiança 90% na fiabilidade

Neste capítulo foi apresentado um caso de estudo que, por um lado mostra como foram realizados ensaios acelerados a um bem em sede de um projeto real, e por outro lado vem demonstrar a teoria subjacente aos ensaios acelerados de vida na ótica da fiabilidade. Desta forma, mostram-se as mais valias deste tipo de práticas, reforçando a importância dos ensaios acelerados para um conhecimento mais profundo e antecipado do comportamento dos bens em condições reais de uso, que se torna bastante útil para, por exemplo, fabricantes de componentes que queiram conhecer um tempo médio de vida dos seus equipamentos para fins de garantias, antes de disponibilizá-los no mercado.

Capítulo 6 – Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros

6.1. Conclusões

A transição energética representa um desafio crucial, mas ao mesmo tempo, uma oportunidade significativa para o desenvolvimento sustentável. Governos e organizações procuram eletrificar o mundo e para isso, a produção e posterior armazenamento de energia renovável são pilares essenciais nesse processo, onde os supercondensadores emergem como uma solução promissora para garantir a eficiência desse armazenamento, especialmente em cenários em que as baterias convencionais não são capazes de fornecer energia de uma forma mais imediata, ou em sistemas onde se possam conjugar os benefícios tanto das baterias como dos supercondensadores.

Os ensaios e as investigações nesta área demonstram que, ao combinar tecnologias inovadoras em projetos sustentáveis, é possível não só otimizar o armazenamento de energia sustentável, mas também responder a uma sociedade que cada vez mais procura alternativas energéticas. Para isso, é necessário investir-se cada vez mais no estudo desta tecnologia emergente que são os supercondensadores, nomeadamente na compreensão e análise do seu envelhecimento, uma vez que ainda não existem modelos claros ou procedimentos definidos e totalmente aceites pela comunidade científica. Seguindo este caminho promissor, asseguramos que a transição energética não apenas ocorra, mas seja feita de forma eficaz e fiável, pavimentando o caminho para um futuro mais sustentável e resiliente.

O caso de estudo executado para a realização deste trabalho teve como principal objetivo obter informações relativamente ao tempo de vida de protótipos de supercondensadores. Esta previsão foi conseguida através da realização de ensaios (*floating tests*) a estes dispositivos, onde foi acelerada a sua degradação através da imposição de tensões de operação mais elevadas do que a tensão de funcionamento normal. Com dois grupos de dados, agruparam-se todos os dados até à falha e exportaram-se para o software Weibull++ Reliasoft e após definição do modelo de degradação mais adequado (neste caso a Lei da Potência Inversa, adequada para casos onde a temperatura não é o fator de degradação), foi assim possível extrapolar os dados a um uso acelerado para um uso normal e caracterizar a vida destes dispositivos numa situação real de funcionamento.

Uma vez que se definiu “a falha” como o instante em que o supercondensador alcançasse 80% da sua capacidade inicial, chegou-se à conclusão que é previsível que este dispositivo falhe em circunstâncias normais 7362,7 min, ou seja, depois de decorrerem 122 horas, se se assumir uma tensão de trabalho de 0,75 V.

Uma vez que a fiabilidade é uma área que depende muito do fator tempo e do fator carga, não existe um valor de fiabilidade, probabilidade de falha ou de tempo até à falha universal. Esses valores são previsões do que poderá acontecer ou do que se poderá esperar ao se estabelecer metas (tempo útil de vida) e variáveis (fatores de desgaste com a tensão). Neste caso de estudo definiu-se um tempo de vida de 10000 min e uma tensão de 0.75 V. Com estes parâmetros definidos, e com a definição de um modelo de degradação e uma distribuição de vida adequados a este caso específico, foi possível caracterizar o modelo de degradação, obtendo valores para os seus parâmetros, e também foi possível retirar valores quanto à fiabilidade destes supercondensadores como por exemplo uma fiabilidade de 25,8%, probabilidade de falha de 74,2%, fatores de aceleração, taxa de falha de $1,9 \times 10^{-5}$ falhas/min ou o valor da fiabilidade para uma missão de 5000 min, sabendo que já decorreram outros 5000 min desde o seu início de vida. Pode-se ainda ir mais longe, introduzindo intervalos de confiança bilaterais ou unilaterais que diminuem a margem de erro na aquisição dos dados de vida.

Para além disso, outra conclusão que se retirou da análise dos resultados foi de que houve um salto muito grande no valor das tensões, de um lote de dados para o outro (1.2 V para 1.5 V), pois o fator de aceleração subiu exponencialmente de um valor para outro. Esta informação leva a acreditar que existe um valor de tensão nesse intervalo no qual o dispositivo inicia um processo de degradação mais intensivo.

6.2. Propostas de Trabalhos Futuros

Algum trabalho futuro que complemente o estudo feito passa pela realização de mais ensaios onde, para além de se fazer variar a tensão com incrementos menores, se possa adicionar vários cenários de temperatura, uma vez que é conhecido que, com o aumento da temperatura, a capacidade específica dos dispositivos diminui, levando a crer que a temperatura também é uma variável importante no que toca à degradação dos supercondensadores. A realização destes ensaios vai ter implicações na definição do modelo de degradação. Nesse caso os modelo de Eyring ou de Arrhenius poderão ser mais adequados, uma vez que neles, o principal fator de degradação é a temperatura. O modelo Temperatura – Não Térmico também poderá ser bastante adequado uma vez que trabalha com dois fatores de aceleração, sendo um a temperatura e outro fator não – térmico, como a tensão, neste caso.

Referências

- ADENE. (2021). *Armazenamento de Energia em Portugal*. Observatório da Energia. Consultado a 8 de maio de 2024. <https://www.observatoriodaenergia.pt/pt/comunicar-energia/post/8931/armazenamento-de-energia-em-portugal/>
- Afif, A., Rahman, S. M., Azad, A. T., Zaini, J., Islan, M. A., & Azad, A. K. (2019). Advanced materials and technologies for hybrid supercapacitors for energy storage—A review. *Journal of Energy Storage*, 25, 100852. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100852>
- Agência Internacional de Energia. (2023). *World Energy Investment*. IEA. Consultado a 9 de maio de 2024. <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023>
- Agência Lusa. (2023, 29 de novembro). *Produção de eletricidade nas barragens com bombagem atinge recorde a 15 de novembro*. Observador. Consultado a 9 de maio de 2024. <https://observador.pt/2023/11/29/producao-de-eletricidade-nas-barragens-com-bombagem-atinge-recorde-a-15-de-novembro/>
- Agência Portuguesa do Ambiente (APA). (2023). *Relatório do Estado do Ambiente 2022/2023*. <https://rea.apambiente.pt/content/ultimaedicao>
- Agência Portuguesa do Ambiente. (30 de outubro de 2021). *Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC)*. <https://apambiente.pt/clima/plano-nacional-de-energia-e-clima-pnec>
- Andersen, M. S. (2007). An introductory note on the environmental economics of the circular economy. *Sustainability science*, 2(1), 133-140. <https://doi.org/10.1007/s11625-006-0013-6>
- Andy Colthorpe. (2017, 30 de março). *Canadian firms NRStor and Hydrostor partner up on utility-scale adiabatic compressed air storage*. Energy Storage News. Consultado a 15 de julho de 2024. <https://www.energy-storage.news/canadian-firms-nrstor-and-hydrostor-partner-up-on-utility-scale-adiabatic-compressed-air-storage/>
- APLANET. (2022, 18 de outubro). *O que é o Net Zero e como alcançá-lo: estratégias para alcançar zero emissões*. Consultado a 10 de maio de 2024. <https://aplanet.org/pt/recursos/o-que-e-o-net-zero-e-como-alcanca-lo-estrategias-para-alcançar-zero-emissoes/>
- Azarpour, A., Mohammadzadeh, O., Rezaei, N., & Zendejboudi, S. (2022). Current status and future prospects of renewable and sustainable energy in North America: Progress and challenges. *Energy Conversion and Management*, 269, 115945. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115945>
- Beceiro, J. (15 de dezembro de 2022). *Thermochemical Energy Storage: The next generation thermal batteries*. SINTEFblog. Consultado a 15 de maio de 2024.

<https://blog.sintef.com/sintefenergy/thermochemical-energy-storage-the-next-generation-thermal-batteries>

- C. Abbey & G. Joos. (2005). Presented in Part at the Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference Kowloon, Hong Kong, China.
- Cao, J., Li, Y., Sun, W., Zhang, L., & Yang, Y. (2022). Instability risk analysis of distributed renewable energy caused by energy storage balance zone. *Energy Reports*, 8, 12958-12969. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.081>
- CAS Science Team. (2023, 7 de julho). *Supercapacitor technologies: Is graphene finally living up to its full potencial?* CAS – A division of the American Chemical Society. Consultado a 13 de maio de 2024. <https://www.cas.org/resources/cas-insights/supercapacitor-technologies-graphene-finally-living-its-full>
- Chen T., Zhang XP, Wang J, Li J, Wu C, Hu M & Bian H. (2020). A review on electric vehicle charging infrastructure development in the UK. *J Mod Power Syst Clean Energy* 8:193–205. [10.35833/MPCE.2018.000374](https://doi.org/10.35833/MPCE.2018.000374)
- Chia, Y. Y., Lee, L. H., Shafiabady, N., & Isa, D. (2015). A load predictive energy management system for supercapacitor-battery hybrid energy storage system in solar application using the Support Vector Machine. *Applied Energy*, 137, 588-602. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.026>
- Collins, D. H., Freels, J. K., Huzurbazar, A. V., Warr, R. L., & Weaver, B. P. (2013). Accelerated test methods for reliability prediction. *Journal of Quality Technology*, 45(3), 244-259. [10.1080/00224065.2013.11917936](https://doi.org/10.1080/00224065.2013.11917936)
- Comissão Europeia. (2021). *Causas das alterações climáticas*. European Comission. Consultado a 2 de maio de 2024. https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_pt
- Comissão Europeia. (2021). *EU renewable energy financing mechanism*. European Comission. Consultado a 2 de maio de 2024. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/financing/eu-renewable-energy-financing-mechanism_en?prefLang=pt
- de Carvalho, W. C., Bataglioli, R. P., Fernandes, R. A., & Coury, D. V. (2020). Fuzzy-based approach for power smoothing of a full-converter wind turbine generator using a supercapacitor energy storage. *Electric Power Systems Research*, 184, 106287. [10.1016/j.epsr.2020.106287](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106287)
- Directiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho (2009). *Promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis*.
- Enel X. (2024). *What is BESS and how does it work?*. Enel X. Consultado a 15 de julho de 2024. <https://corporate.enelx.com/en/question-and-answers/what-is-battery-energy-storage>

- European Investment Bank. (2018, 8 de março). *Redução das emissões de carbono: objetivos e políticas da União Europeia*. Parlamento Europeu. Consultado a 8 de junho de 2024. <https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20180305STO99003/reducao-das-emissoes-de-carbono-metas-e-politicas-da-ue>
- FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia):
- Fernandes, A. C. G. M. (2022). *Revisão sobre supercondensadores: desde as técnicas de modelação matemática até à sua integração como dispositivos de armazenamento de energia elétrica* (Master's thesis, Universidade da Beira Interior (Portugal)).
- Foiadelli, F., Longo, M., & Miraftebzadeh, S. (2018, June). Energy consumption prediction of electric vehicles based on big data approach. In *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)* (pp. 1-6). IEEE. [10.1109/EEEIC.2018.8494573](https://doi.org/10.1109/EEEIC.2018.8494573)
- Geeks for Geeks. (2023, 19 de dezembro). *Difference Between Primary Cell and Secondary Cell*. Geeks for Geeks. Consultado a 17 de maio de 2024. <https://www.geeksforgeeks.org/>
- Girard, H. L., Wang, H., d'Entremont, A., & Pilon, L. (2015). Physical interpretation of cyclic voltammetry for hybrid pseudocapacitors. *The Journal of Physical Chemistry C*, 119(21), 11349-11361. [10.1021/acs.jpcc.5b00641](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b00641)
- Governo de Portugal. (6 de junho de 2019). *Roteiro Nacional para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050)*. Ministério do Ambiente e da Ação Climática. Consultado a 4 de abril de 2024. <https://descarbonizar2050.apambiente.pt/>
- Governo de Portugal. (7 de maio de 2019). *Plano Nacional de Energia e Clima 2030 (PNEC 2030)*. Ministério do Ambiente e da Ação Climática. Consultado a 4 de abril de 2024. <https://www.portugalenergia.pt/setor-energetico/bloco-3/>
- Grupo Iberdrola (2024). *Transição Energética – Impulsionando uma transição sustentável*. Iberdrola. Consultado a 23 de maio de 2024. <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/transicao-energetica>
- Ha, S., Gallagher, K. (2015). *Estimating the system price of redox flow batteries for grid storage*. *Journal of Power Sources*. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.07.004>
- Helbig, C., Bradshaw, A. M., Wietschel, L., Thorenz, A., & Tuma, A. (2018). Supply risks associated with lithium-ion battery materials. *Journal of Cleaner Production*, 172, 274-286. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.122>
- Hobbs, G. K. (2002). The History of HALT and HASS. *Sound and Vibration*, 36(10), 5-15.

- Hu, C. C., Chen, J. C., & Chang, K. H. (2013). Cathodic deposition of Ni (OH) 2 and Co (OH) 2 for asymmetric supercapacitors: importance of the electrochemical reversibility of redox couples. *Journal of Power Sources*, 221, 128-133. [10.1016/j.jpowsour.2012.07.111](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.07.111)
- IEA. (maio de 2021). *The role of critical minerals in clean energy transitions*. International Energy Agency. Consultado a 23 de maio de 2024. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- João Bernardo, DGEG. (2024). *Challenges of the Energetic Transition*. Portugal Energy Conference, Lisboa, Portugal.
- Kececioglu, D. (2002). *Reliability Engineering Handbook* (Vol. 1). DEStech Publications, Inc.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, conservation and recycling*, 127, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Leilivan Pimental. (2023). *Baterias: A sua importância para a transição energética*. Meuguru. Consultado a 25 de maio de 2024. <https://www.meuguru.com/blog/baterias-sua-importancia-para-a-transicao-energetica/>
- Li, W., Lee, S., & Manthiram, A. (2020). High-nickel NMA: a cobalt-free alternative to NMC and NCA cathodes for lithium-ion batteries. *Advanced materials*, 32(33), 2002718. <https://doi.org/10.1002/adma.202002718>
- Liu, H., Liu, X., Wang, S., Liu, H. K., & Li, L. (2020). Transition metal-based battery-type electrodes in hybrid supercapacitors: A review. *Energy Storage Materials*, 28, 122-145. [10.1016/j.ensm.2020.03.003](https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.03.003)
- Liu, J., Luo, X., Liu, X., Li, N., Xing, M., Gao, Y., & Liu, Y. (2022). Rural residents' acceptance of clean heating: An extended technology acceptance model considering rural residents' livelihood capital and perception of clean heating. *Energy and Buildings*, 267, 112154. [10.1016/j.enbuild.2022.112154](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112154)
- Liu, W., Lund, H., & Mathiesen, B. V. (2013). Modelling the transport system in China and evaluating the current strategies towards the sustainable transport development. *Energy Policy*, 58, 347-357. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.03.032>
- Luko, S. (1999). A review of the Weibull Distribution and Selected Engineering Applications. [10.4271/1999-01-2859](https://doi.org/10.4271/1999-01-2859)
- Luta, D. N., & Raji, A. K. (2019). Optimal sizing of hybrid fuel cell-supercapacitor storage system for off-grid renewable applications. *Energy*, 166. [10.1016/j.energy.2018.10.070](https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.070)
- Muzaffar, A., Ahamed, M. B., Deshmukh, K., & Thirumalai, J. (2019). A review on recent advances in hybrid supercapacitors: Design, fabrication and applications. *Renewable*

and sustainable energy reviews, 101, 123-145.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.070>

- N. Kularatna, K. Milani & W.H. Round. (2018). Presented in part at the 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) Buzios.
- N. Mendis, K.M. Muttaqi & S. Perera. (2012). Presented in Part at the 2012 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting Las Vegas, NV.
- Naoi, K., Ishimoto, S., Isobe, Y., & Aoyagi, S. (2010). High-rate nano-crystalline Li₄Ti₅O₁₂ attached on carbon nanofibers for hybrid supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 195(18), 6250-6254. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.12.104>
- Niu, J., Shao, R., Liu, M., Liang, J., Zhang, Z., Dou, M., ... & Wang, F. (2018). Porous carbon electrodes with battery-capacitive storage features for high performance Li-ion capacitors. *Energy Storage Materials*, 12, 145-152. [10.1016/j.ensm.2017.12.012](https://doi.org/10.1016/j.ensm.2017.12.012)
- Observatório da Energia, DGEG, ADENE. (29 de maio de 2024). *Energia em Números 2024 – Edição 2024*. Observatório da Energia. Consultado a 2 de julho de 2024. <https://www.observatoriodaenergia.pt/pt/energia-em-numeros/>
- Paiva, S., Ahad, M. A., Tripathi, G., Feroz, N., & Casalino, G. (2021). Enabling technologies for urban smart mobility: Recent trends, opportunities and challenges. *Sensors*, 21(6), 2143. <https://doi.org/10.3390/s21062143>
- Park, G. L., Schäfer, A. I., & Richards, B. S. (2013). Renewable energy-powered membrane technology: Supercapacitors for buffering resource fluctuations in a wind-powered membrane system for brackish water desalination. *Renewable energy*, 50, 126-135. [10.1016/j.renene.2012.05.026](https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.05.026)
- Pascual, F., Meeker, W. Q., & Escobar, L. A. (2006). Accelerated life test models and data analysis. *Handbook of Engineering Statistics (H. Pham, ed.) Chapter, 22*. [10.1007/978-1-84628-288-1_22](https://doi.org/10.1007/978-1-84628-288-1_22)
- Peters, J., Mohr, M., Baumann, M., & Weil, M. (2020). Toward a cell-chemistry specific life cycle assessment of lithium-ion battery recycling processes. [10.1111/jiec.13021](https://doi.org/10.1111/jiec.13021)
- Pham, H. (Ed.). (2006). *Handbook of reliability engineering*. Springer Science & Business Media. Pilot, C. (2022). The rechargeable battery market and main trends 2011–2020
- Portugal Energia. (2024). *Setor Energético. Setor Elétrico*. Portugal Energia. Consultado a 15 de maio de 2024. <https://www.portugalenergia.pt/setor-energetico/>
- R. Nigam, K.D. Verma, T. Pal & K.K. Kar. (2020). *Handbook of Nanocomposite Supercapacitor Materials II*, Springer, Cham

- Reliasoft (2024). *Life Data Analysis*. HBK. Consultado a 3 de outubro de 2024. https://help.reliasoft.com/reference/life_data_analysis/lda/introduction_to_life_data_analysis.html.
- Reliasoft. (2024). *Accelerated Life testing data analysis*. HBK. Consultado a 3 de outubro de 2024. https://help.reliasoft.com/reference/accelerated_life_testing_data_analysis/alt/introduction_to_accelerated_life_testing.html
- Ren, F., Wei, Z., & Zhai, X. (2022). A review on the integration and optimization of distributed energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112440. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112440>
- Ritchie, H. & Rosado, P. (julho de 2020). *Electricity Mix*. Our World in Data. Consultado a 3 de maio de 2024. <https://ourworldindata.org/electricity-mix>
- Rodrigo Mozelli. (2023, 11 de agosto). *Pesquisadores tentam tornar células de combustível de hidrogênio mais eficientes e acessíveis*. Olhar Digital. Consultado a 24 de maio de 2024. <https://olhardigital.com.br/2023/08/11/carros-e-tecnologia/pesquisadores-tentam-tornar-celulas-de-combustivel-de-hidrogenio-mais-eficientes-e-acessiveis/>
- Sarjeant, W. J., Clelland, I. W., & Price, R. A. (2001). Capacitive components for power electronics. *Proceedings of the IEEE*, 89(6), 846-855. [10.1109/5.931475](https://doi.org/10.1109/5.931475)
- Shen, L., Yu, L., Wu, H. B., Yu, X. Y., Zhang, X., & Lou, X. W. (2015). Formation of nickel cobalt sulfide ball-in-ball hollow spheres with enhanced electrochemical pseudocapacitive properties. *Nature communications*, 6(1), 6694. <https://doi.org/10.1038/ncomms7694>
- Silva, A. & Fernandes, J. (2020). Acordo de Paris 2015-2020
- Simon, P., & Gogotsi, Y. (2008). Materials for electrochemical capacitors. *Nature materials*, 7(11), 845-854. [10.1038/nmat2297](https://doi.org/10.1038/nmat2297)
- Tang, H., & Sodano, H. A. (2013). Ultra-high energy density nanocomposite capacitors with fast discharge using Ba0. 2Sr0. 8TiO3 nanowires. *Nano letters*, 13(4), 1373-1379. <https://doi.org/10.1021/nl3037273>
- Thyssenkrupp. (2024). *Baterias de fluxo redox: sistemas de armazenamento de energia renovável*. Thyssenkrupp. Consultado a 16 de maio de 2024. <https://www.thyssenkrupp-brazil.com/empresa/inovacao/tecnologias-de-transicao-para-renovaveis/redox-flow-batterien-energiespeicher-fuer-erneuerbare-5.html>
- Tie, S. F., & Tan, C. W. (2013). A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and sustainable energy reviews*, 20, 82-102. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.077>

- TYCORUM. (23 de maio de 2023). *Analysis of the principle and application of the primary battery*. TYCORUM. Consultado a 16 de maio de 2024. <https://www.tycorun.com/blogs/news/primary-battery>
- Wang, Y., Zhang, L., Hou, H., Xu, W., Duan, G., He, S., ... & Jiang, S. (2021). Recent progress in carbon-based materials for supercapacitor electrodes: a review. *Journal of Materials Science*, 56, 173-200. [10.1007/s10853-020-05157-6](https://doi.org/10.1007/s10853-020-05157-6)
- Wen, Q., Liu, G., Rao, Z., & Liao, S. (2020). Applications, evaluations and supportive strategies of distributed energy systems: A review. *Energy and Buildings*, 225, 110314. [10.1016/j.enbuild.2020.110314](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110314)
- Winter, M., & Brodd, R. J. (2004). What are batteries, fuel cells, and supercapacitors? *Chemical reviews*, 104(10), 4245-4270. <https://doi.org/10.1021/cr020730k>
- Xu, C., Dai, Q., Gaines, L., Hu, M., Tukker, A., & Steubing, B. (2020). Future material demand for automotive lithium-based batteries. *Communications Materials*, 1(1), 99. <https://doi.org/10.1038/s43246-020-00095-x>
- Xu, H., Fan, X., Lu, Y., Zhong, L., Kong, X., & Wang, J. (2010). Preparation of an electrochemically modified graphite electrode and its electrochemical performance for pseudo-capacitors in a sulfuric acid electrolyte. *Carbon*, 48(11), 3300-3303. [10.1016/j.carbon.2010.04.051](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.04.051)
- Yang, X., Cheng, C., Wang, Y., Qiu, L., & Li, D. (2013). Liquid-mediated dense integration of graphene materials for compact capacitive energy storage. *science*, 341(6145), 534-537. [10.1126/science.1239089](https://doi.org/10.1126/science.1239089)
- Yun, J., Song, C., Lee, H., Park, H., Jeong, Y. R., Kim, J. W., ... & Ha, J. S. (2018). Stretchable array of high-performance micro-supercapacitors charged with solar cells for wireless powering of an integrated strain sensor. *Nano Energy*, 49, 644-654. [10.1016/j.nanoen.2018.05.017](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.05.017)
- Zhang, J., Gu, M., & Chen, X. (2023). Supercapacitors for renewable energy applications: A review. *Micro and Nano Engineering*, 100229. <https://doi.org/10.1016/j.mne.2023.100229>
- Zhang, Z., Zhang, X., Chen, W., Rasim, Y., Salman, W., Pan, H., ... & Wang, C. (2016). A high-efficiency energy regenerative shock absorber using supercapacitors for renewable energy applications in range extended electric vehicle. *Applied Energy*, 178, 177-188. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.054>
- Zhao, X., Mao, L., Cheng, Q., Li, J., Liao, F., Yang, G., ... & Chen, L. (2020). Two-dimensional spinel structured co-based materials for high performance supercapacitors: a critical review. *Chemical Engineering Journal*, 387, 124081. [10.1016/j.cej.2020.124081](https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124081)
- Zhu, Y., Wu, S., Li, J., Jia, Q., Zhang, T., Zhang, X., ... & Tan, Y. (2024). Towards a carbon-neutral community: Integrated renewable energy systems (IRES)—sources,

storage, optimization, challenges, strategies and opportunities. *Journal of Energy Storage*, 83, 110663. [10.1016/j.est.2024.110663](https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110663)