



Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELETROTÉCNICA

Estudo do envelhecimento de baterias de lítio em autocarros elétricos urbanos baseado na representação energética macroscópica

Trabalho de Projeto para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica

Especialização em Automação e Comunicações em Sistemas de
Energia

Autor

Marco André Monteiro Ferreira

Orientadores

Prof. Dr. Paulo Gameiro Pereirinha

Prof. Dr. João Pedro Fernandes Trovão



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, dezembro de 2025

RESUMO

O presente trabalho de projeto tem como principal finalidade apresentar um estudo detalhado assente na modelização de autocarros elétricos urbanos baseado na Representação Energética Macroscópica (REM). O modelo desenvolvido foi especificamente concebido com base no miniautocarro elétrico da Karsan, modelo e-Jest, versão com bateria de 88 kWh. Este trabalho visa estabelecer uma caracterização pormenorizada das células de lítio em ambiente de simulação, orientado para estudos urbanos dentro da temática da mobilidade urbana, permitindo a simulação da dinâmica do autocarro e mais especificamente da degradação do conjunto de baterias do veículo.

Com o modelo implementado, analisou-se o envelhecimento e a fadiga cíclica das células de lítio, considerando as rotas diárias do autocarro em contexto urbano. Para esta análise, diferentes ciclos de descarga foram testados de forma a obter os vários dados da evolução do estado de carga da bateria ao longo dos perfis cíclicos, e posteriormente tratados através do algoritmo RainFlow e da lei de Miner de modo a avaliar o impacto da degradação das células associada à rota específica e o efeito da travagem regenerativa na fadiga cíclica.

Este estudo oferece uma base sólida para a compreensão das baterias de lítio em autocarros elétricos, com o principal propósito do modelo em estudo, de uma forma holística, ser uma ferramenta simples e fiável que permita a otimização de estratégias operacionais em ambiente urbano.

Palavras-chave: Autocarro Elétrico Urbano, Células de Iões de Lítio, Representação Energética Macroscópica (REM), Modelação de Baterias, RainFlow, Lei de Miner.

ABSTRACT

The present project report aims to provide a detailed study based on the modelling of urban electric buses using the Energetic Macroscopic Representation (EMR) formalism. The developed model was specifically conceived for the Karsan electric minibus, model e-Jest with an 88 kWh battery pack. This work seeks to establish a comprehensive characterisation of lithium cells within a simulation environment, oriented towards urban mobility studies, enabling the simulation of vehicle dynamics and, more specifically, the degradation behaviour of the battery pack.

With the implemented model, the ageing and cyclic fatigue of the lithium cells were analysed, considering the daily operation routes of the bus in an urban context. For this purpose, different discharge cycles were tested to obtain data on the evolution of the battery state of charge over the cyclic profiles. These data were subsequently processed using the RainFlow algorithm and Miner's law, to assess the degradation impact associated with specific routes and the effect of regenerative braking on the cyclic fatigue of the cells.

This study provides a solid foundation for understanding the behaviour of lithium batteries in electric buses. The main purpose of the proposed model is, in a holistic way, to serve as a simple and reliable tool that supports the optimisation of operational strategies in urban environments.

Keywords: Urban electric bus, Lithium-ion cells, Energetic Macroscopic Representation (EMR), Battery modelling, RainFlow, Miner's law.

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação constituiu um percurso desafiante e de grande aprendizagem, possível apenas graças ao apoio e incentivo de diversas pessoas e instituições, a quem quero deixar o meu reconhecimento mais sincero.

Agradeço ao Instituto Superior de Engenharia de Coimbra e a todos os docentes pelo contributo essencial na minha formação académica, que forneceu os fundamentos científicos necessários para a concretização deste trabalho. Um reconhecimento especial dirige-se também ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica e a todos os seus colaboradores, cujo ensino e orientação ao longo do curso permitiram que eu conduzisse esta investigação de forma autónoma.

O acompanhamento académico revelou-se determinante, pelo que manifesto a minha mais profunda gratidão aos meus orientadores, Prof. Dr. Paulo Pereirinha e Prof. Dr. João Trovão. Agradeço-lhes pela orientação científica rigorosa, pelos conselhos metodológicos, pela supervisão atenta de todas as etapas do projeto e pela motivação constante transmitida ao longo do desenvolvimento deste trabalho. A disponibilidade, paciência e experiência de ambos foram fulcrais, não apenas para a concretização desta dissertação, mas também para o meu crescimento pessoal, académico e profissional.

Quero ainda agradecer aos colegas e amigos, que, de diversas formas, contribuíram com ideias, motivação e incentivo, em particular ao José Antunes, Miguel Oliveira, Renato Fernandes e Gustavo Reggio, pelo espírito de camaradagem e cumplicidade que tornaram o percurso mais estimulante e suportável, especialmente nos momentos mais exigentes. Uma nota especial ao Robson Martins, cuja influência foi determinante ao longo do percurso académico e pessoal. Pelo incentivo constante e orientação, bem como pela sua mentoria e referência enquanto pessoa, com quem mantenho uma forte relação de amizade, pela qual lhe estou profundamente grato.

Por fim, uma palavra muito especial à minha família e à minha namorada, Rita, pelo apoio constante, compreensão nos períodos de maior exigência e confiança incondicional, que me permitiram dedicar-me plenamente a este trabalho. Este projeto é também reflexo do esforço, dedicação e incentivo que me transmitiram ao longo de todo o meu percurso.

A todos que, de alguma forma, me apoiaram ao longo deste percurso, deixo o meu sincero agradecimento.

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) de Portugal, através do projeto de Financiamento Plurianual da FCT UID/308: Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra - INESC Coimbra; e parcialmente desenvolvido no âmbito do projeto INOV4Industry - Transferir conhecimento científico e tecnologia para a Indústria, operação n.º 17800, com o código COMPETE2030-FEDER-01458200, no âmbito do COMPETE 2030.

ÍNDICE

Resumo	i
Abstract.....	ii
Agradecimentos	iii
Índice	iv
Índice de figuras.....	vii
Lista de siglas e acrónimos	xi
Lista de símbolos	xii
1 Introdução	1
1.1 Panorama Mundial da Mobilidade Elétrica Urbana	1
1.1.1 Desafios e Oportunidades na Eletrificação dos Autocarros Urbanos.....	2
1.2 Objetivo do Projeto de Estudo	6
1.2.1 Objetivos Gerais	6
1.2.2 Objetivos Específicos.....	6
1.2.3 Objetivos futuros	7
1.3 Estrutura do relatório.....	8
2 Revisão da Literatura.....	9
2.1 Mobilidade Elétrica Urbana	9
2.1.1 O papel dos Autocarros no Planeamento Urbano	9
2.1.2 Tendências e Perspetivas	9
2.2 Tecnologias de Baterias para Propulsão Elétrica	10
2.2.1 Evolução Histórica e funcionamento das baterias.....	10
2.2.2 Degradação e Fadiga em Baterias de Lítio	12
2.3 Métodos de Análise	15
3 Representação Energética Macroscópica.....	20
3.1 Enquadramento.....	20
3.2 Fundamentos do formalismo REM.....	21
3.2.1 Generalidades	21
3.2.2 Regras de Associação	25
3.2.3 Inversão da REM.....	27
4 Estudo de caso do Miniautocarro Karsan eJest.....	28
4.1 Generalidades e Características.....	28

Estudo do envelhecimento de baterias de lítio em autocarros elétricos urbanos baseado na representação energética macroscópica

4.2	Modelação REM do miniautocarro e-Jest.....	30
4.2.1	Modelação do Sistema de propulsão.....	30
4.2.2	Inversão do Sistema de propulsão.....	36
4.2.3	Modelação do Sistema da Bateria.....	42
4.2.4	Implementação em ambiente Simulink	47
4.2.5	Testes e Ensaios	49
4.2.6	Validação do modelo.....	55
5	Rainflow, Algoritmo para contagem de ciclos	57
5.1	Introdução.....	57
5.2	Metodologia.....	57
5.2.1	Contagem de ciclos com o RainFlow	58
5.2.2	Lei de Miner - Fadiga acumulada	60
5.2.3	Implementação do RainFlow e Lei de Miner	62
5.2.4	Cenários de teste	64
6	Resultados e Discussão.....	67
6.1	Influência da Travagem Regenerativa na Recuperação da Vida da Bateria 67	
6.2	Influência da Travagem Regenerativa na Autonomia	71
6.3	Análise da Distância Total ao Longo da Vida Útil	74
7	Conclusão e Trabalhos Futuros.....	78
	Referências bibliográficas	80

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Características típicas associadas às respectivas químicas de células de íons de lítio [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33].....	11
Tabela 2 – Principais trabalhos analisados, tipo de modelação e âmbito do trabalho.	16
Tabela 3 – Principais contribuições e descobertas, e respectivas lacunas dos trabalhos.	17
Tabela 4 – Características e variáveis físicas para a modelação do autocarro	29
Tabela 5 - Valores dos parâmetros da função transferência do controlador implementado da velocidade.	38
Tabela 6 – Características das células da bateria em estudo.	43
Tabela 7 - Configuração série-paralelo das células para a construção da bateria. ...	43
Tabela 8 - Resumo dos resultados da travagem regenerativa aplicada aos ciclos de condução.....	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Registos de vendas de autocarros elétricos, por região, referente ao período entre 2016-2024 [4].....	2
Figura 2 - Linha temporal da evolução histórica das células [21], [22].....	10
Figura 3 – Representação do funcionamento de uma célula de lítio [23].....	11
Figura 4 – Principais causas e efeitos dos mecanismos de degradação e os respetivos modos de degradação. [36], [37].....	14
Figura 5 - Principais mecanismos de degradação em células de iões de lítio. Baseado e adaptado de [36], [37].....	14
Figura 6 –Exemplo de representação estrutural à esquerda e funcional à direita. ..	20
Figura 7 – Pictogramas do formalismo baseado em REM.	21
Figura 8 – Representação do elemento fonte de energia, com x a representar a variável que causa a ação, y a variável reação, e x_{ref} a variável de referência da ação.	22
Figura 9 – Representação do elemento que caracteriza um conversor. À esquerda, um conversor monofísico, à direita um multifísico e abaixo o pictograma de inversão para ambos os elementos.	23
Figura 10 – Representação do elemento que caracteriza o acoplamento. À esquerda um acoplamento monofísico, à direita multifísico e em baixo a inversão para ambos os casos.	24
Figura 11 – Representação do elemento de acumulação e a respetiva inversão.....	25
Figura 12 – Exemplificação da aplicação da regra de combinação, a) para o caso de capacitâncias em paralelo, b) para o caso de indutâncias em série.	26
Figura 13 – Exemplificação da aplicação da regra de permutação.	26
Figura 14 – Aplicação da regra de permutação através da analogia com um caso pratico de um transformador.....	27
Figura 15 – Miniautocarro Urbano Karsan e-Jest [70].	28
Figura 16 – Abordagem REM do Sistema de propulsão.	30
Figura 17 – Pictograma de representação do motor.....	31
Figura 18 - Mapa de rendimento do motor [72].....	31
Figura 19 – Pictograma de representação da transmissão.....	32
Figura 20 - Pictograma de representação do acoplamento de forças.....	33
Figura 21 – Pictograma de representação da carroçaria.	34
Figura 22 – Pictograma de representação dos fatores externos.....	35

Figura 23 – Estrutura base para a inversão do Sistema de tração.....	36
Figura 24 - Inversão do pictograma representativo da carroçaria.	37
Figura 25 - Diagrama de blocos representativo do controlador Integral-Proporcional (IP) para a velocidade.....	38
Figura 26 - Função de transferência genérica para um sistema de 2ª ordem.	38
Figura 27 – Pictogramas que caracterizam o acoplamento e estratégia de travagem.	39
Figura 28 - Fluxograma de funcionamento da estratégia de travagem.	40
Figura 29 - Inversão do bloco de transmissão.	41
Figura 30 – Representação REM de todo sistema de tração e a respetiva inversão.	41
Figura 31 – Representação REM da célula convertida para módulos (a), para a bateria (b), e com a integração da bateria no sistema de tração(c).....	42
Figura 32 – Representação elétrica do modelo equivalente da célula	43
Figura 33 – 'Técnica GITT' para obtenção dos parâmetros elétricos da célula. (a) pulsos de corrente; (b) resposta de tensão da célula	45
Figura 34 – (a) Variação da tensão de circuito aberto em função do SoC; (b) Variação da resistência interna em função do SoC; (c) Variação da resistência do ramo paralelo em função do Soc; (d) Variação da capacitância do ramo paralelo em função do SoC.	46
Figura 35 – Modelo REM do Sistema de propulsão construído no Simulink.	47
Figura 36 – Modelo REM do Sistema implementado da célula à bateria.....	48
Figura 37 - 'Tabelas dinâmicas dos parâmetros da célula.....	48
Figura 38 - Perfil de velocidade do ciclo NEDC.....	49
Figura 39 – Distância percorrida pelo ciclo de condução NEDC.....	49
Figura 40 – Perfil da potência desenvolvida pelo motor no ciclo NEDC.	49
Figura 41 - Perfil da potência desenvolvida pela bateria no ciclo NEDC.....	49
Figura 42 – Perfil de tensão na célula no ciclo NEDC.	50
Figura 43 – Perfil de Corrente da célula no ciclo NEDC.	50
Figura 44 – Estado de carga da bateria no ciclo NEDC.....	50
Figura 45 – Consumo de energia total do ciclo NEDC.	50
Figura 46 – Perfil do estado de carga da repetição cíclica do NEDC.....	51
Figura 47 – Distância total percorrida pelo veículo.	51
Figura 48 - Perfil de tensão da célula para a repetição cíclica do NEDC.....	51

Figura 49 – Perfil da Corrente na célula para a repetição cíclica do NEDC.....	51
Figura 50 - Perfil de velocidade do ciclo WLTP.	52
Figura 51 - Distância percorrida pelo ciclo de condução WLTP.....	52
Figura 52 - Perfil da potência desenvolvida pelo motor no ciclo WLTP.....	52
Figura 53 - Perfil da potência desenvolvida pela bateria no ciclo WLTP.....	52
Figura 54 - Perfil de tensão na célula no ciclo WLTP.	52
Figura 55 - Perfil de corrente da célula no ciclo NEDC.	52
Figura 56 - Estado de carga da bateria no ciclo WLTP.....	53
Figura 57 - Consumo de energia total do ciclo WLTP.....	53
Figura 58 - Perfil do estado de carga da repetição cíclica do WLTP.....	53
Figura 59 - Distância total percorrida pelo veículo.	53
Figura 60 - Perfil de tensão da célula para a repetição cíclica do WLTP.....	53
Figura 61 - Perfil de corrente da célula para a repetição cíclica do WLTP.....	53
Figura 62 - Corrente do ciclo WLTP para uma travagem híbrida de 50%.....	54
Figura 63 - Potência da bateria do ciclo WLTP para uma travagem híbrida de 50%.	54
Figura 64 - Perfil de corrente do ciclo WLTP para uma travagem regenerativa de 100%.	54
Figura 65 - Perfil de potência da bateria do ciclo WLTP para uma travagem regenerativa de 100%.	54
Figura 66 - Perfil de velocidade e binário do modelo com base em dados reais e simulados.	56
Figura 67 - Metodologia aplicada para análise dos ciclos de vida e estimação da vida útil.	58
Figura 68 – (a)Fluxograma de funcionamento do algoritmo RainFlow, (b) Exemplo de análise do RainFlow.	59
Figura 69 – Curva de degradação da célula LFP em estudo.....	61
Figura 70 – Curva de degradação da célula LFP no domínio logarítmico, com o número máximo de ciclos que a célula suporta até atingir a fadiga total, em função da profundidade de descarga.	63
Figura 71 – Perfis de carga e descarga (SoC) dos diferentes cenários definidos em estudo, para um mês de operação.....	65
Figura 72 – Exemplo do efeito dos vários níveis de travagem regenerativa no perfil de condução com um DoD diário de 70%.	66

Figura 73 – Evolução da vida útil da bateria em função dos níveis de travagem regenerativa, k_{br}	68
Figura 74 – Recuperação absoluta de vida útil em função dos níveis de travagem regenerativa, k_{br}	69
Figura 75 – Evolução relativa da vida útil recuperada em função da travagem regenerativa, k_{br}	71
Figura 76 – Recuperação total diária de autonomia em função da taxa de travagem regenerativa, k_{br}	72
Figura 77 –Recuperação absoluta diária de quilómetros em função da taxa de travagem elétrica, k_{br}	73
Figura 78 -Recuperação relativa de autonomia em função da taxa de travagem regenerativa, k_{br}	74
Figura 79 – Distância total percorrida em função da taxa de travagem regenerativa.	75
Figura 80 – Vida total estimada de operação do veículo em função do total de quilómetros percorridos.	76

LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

Sigla / Acrónimo	Nome/Descrição
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
BoL	<i>Beginning of Life</i>
COG	<i>Causal Ordering Graph</i>
DoD	<i>Depth of Discharge</i>
ECM	<i>Equivalent Circuit Model</i>
EMR / REM	<i>Energetic Macroscopic Representation</i> / Representação Energética Macroscópica
EoL	<i>End of Life</i>
FCEV	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i>
GITT	<i>Galvanostatic Intermittent Titration Technique</i>
IP	<i>Integral-Proportional</i>
<i>k_{br}</i>	Taxa ou intensidade de travagem regenerativa
LAM	<i>Loss of Active Material</i>
LCO	<i>Lithium Cobalt Oxide</i>
LFP	<i>Lithium Iron Phosphate</i>
LLI	<i>Loss of Lithium Inventory</i>
LMO	<i>Lithium Manganese Oxide</i>
LTO	<i>Lithium Titanate Oxide</i>
NEDC	<i>Normalized European Driving Cycle</i>
NMC	<i>Nickel Manganese Cobalt</i>
NCA	<i>Nickel Cobalt Aluminium Oxide</i>
RUL	<i>Remaining Useful Life</i>
RfCM	<i>RainFlow Counting Method</i>
SEI	<i>Solid Electrolyte Interphase</i>
SoC	<i>State of Charge</i>
SOH	<i>State of Health</i>
SVR	<i>Support Vector Regression</i>
VE	Veículos elétricos
WLTP	<i>Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Nome / Descrição	Unidade	Abreviatura
A	Área frontal do veículo	Metro quadrado	m^2
C	Capacitância	Farad	F
C_{cell}	Capacidade da célula	miliampère hora	mAh
$C_s(t)$	Controlador de velocidade	Adimensional	-
C_x	Coefficiente de resistência aerodinâmica	Adimensional	-
$\varepsilon(t)$	Erro do controlador	Metro/segundo	m/s
F_{brk}	Força de travagem	Newton	N
$F_{brk_{ref}}$	Referência de força de travagem	Newton	N
F_{tra}	Força de tração aplicada ao solo	Newton	N
$F_{tra_{ref}}$	Força de tração de referência	Newton	N
$F_{tot_{res}}$	Força resistente total	Newton	N
$F_{tot_{res_{mes}}}$	Força resistente total medida	Newton	N
$F_{tot_{ref}}$	Valor de referência da força total	Newton	N
F_{wh}	Força nas rodas	Newton	N
$F_{wh_{ref}}$	Força de referência nas rodas	Newton	N
g	Aceleração da gravidade	Metro/segundo ao quadrado	m/s^2
h	Tempo	Hora	h
i_L	Corrente na indutância	Ampère	A
i_R	Corrente na carga resistiva	Ampère	A
i_{Batt}	Corrente da bateria	Ampère	A
i_{cell}	Corrente da célula	Ampère	A
k_{br}	Parâmetro de ajuste da travagem	Adimensional	-
K_{gear}	Relação de transmissão	Adimensional	-
k_i	Ganho integral do controlador	Adimensional	-
k_p	Ganho proporcional do controlador	Adimensional	-
M_{tot}	Massa total do veículo	Quilograma	kg
M_{veh}	Massa do veículo	Quilograma	kg

Estudo do envelhecimento de baterias de lítio em autocarros elétricos urbanos baseado na representação energética macroscópica

N_{cycl}	Número equivalente de ciclos	Adimensional	-
n_i	Dano provocado pelo ciclo i	Adimensional	-
N_i	Número total de ciclos suportados	Adimensional	-
$N.m$	Binário	Newton metro	$N.m$
Ω_{em}	Velocidade angular do motor	Radiano/segundo	rad/s
R_0	Resistência interna da célula	Ohm	Ω
R_{wheel}, r	Raio da roda do veículo	Metro	m
SoC	Estado de carga da célula	Adimensional	-
T_{em}	Binário do motor	Newton metro	$N.m$
$T_{em,ref}$	Binário de referência do motor	Newton metro	$N.m$
u_L	Tensão na indutância	Volt	V
u_R	Tensão na resistência	Volt	V
u_{Batt}	Tensão da bateria	Volt	V
u_{Cell}	Tensão da célula	Volt	V
$u_{Cell,max,min}$	Tensão máxima/mínima da célula	Volt	V
u_{RC}	Tensão no ramo paralelo RC	Volt	V
V	Tensão	Volt	V
v_{veh}	Velocidade do veículo	Metro/segundo	m/s
$v_{veh,mes}$	Velocidade do veículo medida	Metro/segundo	m/s
$v_{veh,ref}$	Velocidade de referência do veículo	Metro/segundo	m/s
v_{wh}	Velocidade linear das rodas	Metro/segundo	m/s
Wh	Energia	Watt-hora	Wh
θ	Ângulo de inclinação da via	Graus	$^\circ$
ζ	Coefficiente de amortecimento	Adimensional	-
η_{em}	Rendimento do motor	Adimensional	-
η_{gear}	Rendimento da transmissão	Adimensional	-
ρ	Massa volúmica do ar	Quilograma/metro cúbico	kg/m^3
$^\circ C$	Temperatura	Graus Celsius	$^\circ C$
mAh	Capacidade (célula)	miliampère hora	mAh
$m\Omega$	Resistência	miliohm	$m\Omega$

1 INTRODUÇÃO

1.1 Panorama Mundial da Mobilidade Elétrica Urbana

A crescente preocupação com questões ambientais e a corrida urgente para a redução das emissões, nos últimos anos, impulsionaram significativamente o setor dos transportes no desenvolvimento de novas tecnologias de mobilização mais sustentáveis e eficientes, nomeadamente de propulsão híbrida e puramente elétrica. Em 2024, todo o setor dos transportes representou cerca de 23,3 % das emissões de CO₂ nos dez países mais poluidores a nível mundial¹, com os autocarros e carros de motorização convencional a contribuir de forma significativa. Quanto aos dez países da OCDE com maiores emissões no setor², excluindo os Estados Unidos, este contributo foi em aproximadamente 15,7 % das emissões globais de CO₂. [1]. Neste contexto, os autocarros elétricos urbanos surgem como uma das principais soluções para este paradigma, principalmente por serem veículos ecológicos, de baixo impacto ambiental e social, naquilo que se refere à redução das emissões de poluentes atmosféricos e sonoros, contribuindo para um ambiente urbano mais saudável, sustentável, acessível e económico. Em 2025, na União Europeia, os autocarros elétricos a baterias representaram 43% das vendas de autocarros urbanos [2], evidenciando o alinhamento com o objetivo de atingir a meta de 100% de autocarros urbanos isentos de emissões até 2035.

O avanço tecnológico no setor dos veículos elétricos (VE) tem sido exponencial nos últimos anos, com um crescimento significativo do número de veículos em circulação, desde veículos ligeiros até ao transporte público [3], [4]. Este desenvolvimento traz uma maior exigência nas tecnologias de baterias, que devem ser não só eficientes, mas também duráveis e economicamente sustentáveis. Contudo, um dos principais desafios que se mantém é a degradação das baterias ao longo do tempo, causada por diversos fatores como ciclos de carga e descarga, variações de temperatura e condições operacionais, que resultam na perda gradual da capacidade e eficiência das células [5].

De acordo com a Agência Internacional de Energia, Figura 1, em 2023, o número de autocarros elétricos vendidos a nível mundial atingiu cerca de 50 mil unidades, representando 3% das vendas totais de autocarros. Em 2024, as vendas globais de autocarros elétricos atingiram cerca de 70 mil unidades, representando um aumento de 30% relativamente ao seu anterior período homólogo, o que mostra uma aceleração significativa do setor [4]. Apesar de os números serem dominados pela China, a principal potência mundial neste setor e cumulativamente a que iniciou a

¹ Canada, China, Germany, India, Iran, Japan, Russia, Saudi Arabia, South Korea, United States

² Australia, Canada, France, Germany, Italy, Japan, Mexico, South Korea, Spain, United Kingdom

eletrificação mais cedo, a Europa tem demonstrado um aumento significativo nesta tendência. No ano de 2023, o mercado europeu em conjunto com a Noruega, Islândia e Suíça, assinalou um crescimento de cerca de 53% de autocarros elétricos, dos quais 42% zero emissões, isto é, veículos a baterias (BEV) e a hidrogénio (FCEV) [6].

Electric bus sales and sales shares by region, 2016-2024

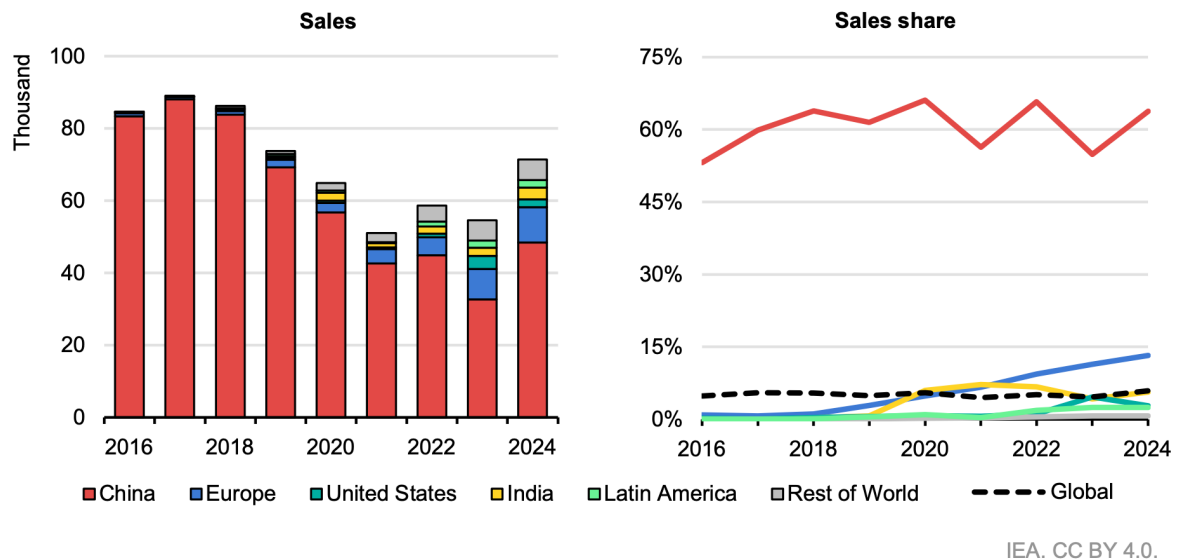


Figura 1 - Registos de vendas de autocarros elétricos, por região, referente ao período entre 2016-2024 [4].

Esta transição não só responde a problemas ambientais imediatos, como a poluição atmosférica e sonora, mas também promete otimizar as redes de transporte urbano e oferecer à população melhores alternativas de mobilidade [7].

1.1.1 Desafios e Oportunidades na Eletrificação dos Autocarros Urbanos

A implementação de autocarros elétricos em ambiente urbano, apesar de desencadear um conjunto de desafios críticos, por outro lado apresenta também várias oportunidades que permitem não só reconfigurar os sistemas de transporte com vista à progressão social, como também potenciar o desenvolvimento urbano de forma inovadora e sustentável. Abaixo, em pormenor, é apresentado um breve conjunto de desafios e oportunidades que se mostram atualmente relevantes dentro da temática da mobilidade urbana.

Desafios

- **Infraestrutura de carregamento**

A implementação de redes de carregamento exige grandes investimentos, sobretudo devido ao enquadramento urbano, particularmente em áreas densamente povoadas, onde a limitação de espaço representa uma grande dificuldade, e por outro lado, também pela necessidade de adaptação a infraestruturas já existentes, incluindo,

normalmente, o aumento da potência contratada e do posto de transformação dos depósitos dos autocarros. A localização estratégica dos postos de carregamento assume, neste contexto, um papel absolutamente crucial, sendo determinante para evitar interrupções no serviço e assegurar a disponibilidade contínua da frota [8], [9].

- **Autonomia e tempo de carregamento**

Apesar dos avanços tecnológicos nas baterias, a autonomia dos autocarros elétricos continua limitada e altamente dependente de um vasto conjunto de fatores que, direta ou indiretamente, influenciam as operações contínuas. Adicionalmente, o tempo necessário para o carregamento dos sistemas de armazenamento pode comprometer a disponibilidade dos veículos e a continuidade dos serviços, o que reforça a necessidade de desenvolver novas estratégias e otimizações de carregamento, de forma a promover o aumento da eficiência operacional do sistema [8].

- **Gestão operacional e manutenção**

A operação dos autocarros elétricos exige um planeamento altamente estratégico e detalhado, o qual, imperativamente, deverá considerar um vasto leque de condicionantes. Entre estes incluem-se o perfil orográfico da rota, a densidade e o padrão de utilização dos passageiros que recorrem aos serviços, a distância percorrida pelos veículos, o estilo e comportamento de condução do motorista, bem como a influência das temperaturas médias locais e as respetivas variações sazonais, que afetam diretamente a gestão operacional do sistema [10]. Todas estas variáveis devem ser estruturalmente integradas numa lógica de otimização contínua do serviço, com o objetivo de garantir a eficiência energética e a regularidade de operações [11]. A complexidade associada a esta gestão implica exigências técnicas sólidas e consistentes, não apenas ao nível da operação, mas também da estrutura de apoio técnico. Perante este paradigma, as concessionárias das redes de transportes devem dispor de técnicos especializados, devidamente preparados para assegurar a manutenção das frotas e das infraestruturas de carregamento, contribuindo assim para a fiabilidade de todo o sistema e a continuidade dos serviços prestados.

- **Capacidade da rede elétrica e integração com *Smart Grids***

O aumento significativo das frotas de autocarros elétricos implica uma maior exigência sobre as redes elétricas de distribuição, o que se traduz em aumentos de potência locais que indiretamente, ao sobrecarregar as infraestruturas de distribuição, poderão afetar toda a cadeia energética, desde a produção à entrega da energia ao consumidor final. Esta realidade impõe a necessidade de reforçar e ampliar as redes existentes que, em larga escala, poderão necessariamente exigir potenciais investimentos em novas unidades de produção para assegurar o fornecimento de eletricidade [12]. Para responder a este desafio, as redes inteligentes (*smart grids*) mostram-se, parcialmente, como uma das soluções que podem vir a permitir uma gestão mais eficiente e flexível do carregamento dos veículos, regulando a procura energética de acordo com a capacidade disponível da rede e dos vários períodos de

consumo. Embora esta gestão inteligente de cargas não substitua a necessidade de reforço estrutural, as *smart grids* constituem-se como uma alternativa complementar que cumulativamente permite mitigar os impactos no sistema elétrico e promover as operações mais sustentáveis e equilibradas [13].

Oportunidades

- **Sustentabilidade ambiental**

Em termos de sustentabilidade ambiental, a substituição dos autocarros com motor de combustão interna alimentados a combustíveis fósseis, em particular, diesel, por tecnologias de propulsão elétrica permite reduzir de forma significativa as emissões de partículas que contribuem para o efeito de estufa. Esta redução de poluentes atmosféricos possibilita não só a melhoria da qualidade do ar, como também permite a mitigação das alterações climáticas, promovendo a preservação dos diferentes ecossistemas. Para além da diminuição das emissões diretas de gases e partículas nocivas, estas tecnologias reduzem significativamente a exposição da população a poluentes que afetam diretamente a saúde pública, concretamente, em zonas urbanas devido à tendência de maior densidade populacional. Aliado a esta transformação, a descarbonização do setor dos transportes é notavelmente favorecida, o que, em conjunto com o abastecimento de energia proveniente de fontes renováveis, contribui não apenas para uma pegada de carbono praticamente nula como também se alinha com as metas climáticas globais. Numa visão mais futurista, a implementação de frotas desta natureza ao ser articulada com estratégias urbanas bem definidas, permitirá consideravelmente a redução de tráfego dentro de grandes cidades e, desta forma, impulsionar a mobilidade sustentável.

- **Redução de ruído**

Os autocarros elétricos, em matéria de poluição sonora, destacam-se por apresentarem um nível de emissão de ruído bastante inferior ao dos modelos a combustão. Esta substituição contribui diretamente para a redução do ruído urbano, o que se mostra como uma característica particularmente relevante em zonas residenciais, escolares e hospitalares, onde o silêncio melhora o bem-estar e a qualidade de vida dos cidadãos. Adicionalmente, um ambiente mais calmo no interior do próprio veículo favorece uma experiência de viagem mais confortável para os passageiros e menos desgastante para os motoristas. Esta melhoria nas condições acústicas reforça a perceção positiva da mobilidade elétrica, o que contribui para a sua aceitação social enquanto alternativa mais sustentável em contexto urbano.

- **Inovação tecnológica e criação de empregos**

A transição para a mobilidade elétrica impulsiona não só o desenvolvimento tecnológico, com avanços significativos em baterias, sistemas de gestão de frota e infraestruturas de carregamento, como também gera novas oportunidades de emprego. Este crescimento abrange desde a produção e instalação de veículos e

postos de carregamento até à manutenção especializada, exigindo técnicos qualificados e atualizados. Além dos postos de trabalho diretos, surgem novos perfis profissionais em engenharia, software, planeamento urbano e formação de condutores (e.g., o uso da travagem regenerativa), essenciais para acompanhar a rápida evolução do setor. A inovação tecnológica estimula ainda o desenvolvimento económico local, promovendo a indústria nacional e a criação de polos de inovação, atraindo investimento e fomentando parcerias público-privadas. Contudo, este processo exige uma gestão cuidadosa da transição laboral, com formação contínua para garantir a adaptação da força de trabalho e minimizar impactos sociais negativos, assegurando uma transição justa e sustentável.

- **Custos operacionais reduzidos**

Apesar do investimento inicial mais elevado, os autocarros elétricos apresentam custos operacionais significativamente inferiores ao longo do tempo. A simplicidade dos motores elétricos, com menos componentes móveis, traduz-se numa manutenção menos frequente e mais económica. Além disso, a energia elétrica, geralmente mais barata e com tarifas diferenciadas em horários de menor procura, contribui para a redução dos custos de operação. A eficiência energética dos motores elétricos é muitíssimo superior à dos motores térmicos, convertendo uma maior percentagem de energia em movimento, o que também influencia positivamente os custos. A longevidade das baterias e as estratégias de gestão do seu ciclo de vida são fatores determinantes para controlar os custos totais ao longo do tempo. Para além dos custos diretos, os incentivos governamentais e os benefícios ambientais e sociais associados a uma menor poluição traduzem-se em vantagens económicas indiretas. Por fim, é importante considerar os custos relacionados com a infraestrutura de carregamento, cuja instalação e manutenção são essenciais, mas que podem ser otimizados com a integração em redes inteligentes, contribuindo para uma operação mais económica e sustentável.

Tendo em conta os desafios e oportunidades associados à implementação de autocarros elétricos urbanos, este trabalho surge da necessidade fundamental de desenvolver ferramentas que facilitem a análise detalhada do desempenho destes veículos. A crescente complexidade na gestão da autonomia das baterias, aliada à importância de monitorizar a degradação dos seus componentes ao longo do tempo de vida útil, exige modelos e algoritmos capazes de refletir estas dinâmicas de forma precisa e acessível. Além disso, a disponibilidade de simulações fiáveis é crucial para apoiar decisões operacionais e estratégicas, contribuindo para a otimização da gestão das frotas elétricas, e em termos globais para a sustentabilidade económica e ambiental do sistema de transporte urbano. Assim, o presente estudo visa a implementação de um modelo REM com especial foco na modelação da bateria, e em complemento, a aplicação de um algoritmo de análise de dados que, em conjunto, constituam uma ferramenta prática e eficiente para a avaliação e gestão destes veículos em contexto real.

1.2 Objetivo do Projeto de Estudo

1.2.1 Objetivos Gerais

O presente relatório de projeto, de uma forma generalizada, tem como objetivo apresentar a implementação de um modelo REM, acompanhado de um algoritmo de análise de dados, direcionado para autocarros elétricos urbanos a baterias. A proposta desenvolvida visa constituir-se como uma ferramenta de simulação simples e funcional, capaz de analisar simultaneamente a dinâmica do sistema de tração de um autocarro urbano e o comportamento das células de lítio ao longo do tempo. Através da modelação das características elétricas e mecânicas do veículo, bem como das propriedades das células que compõem o conjunto da bateria, pretende-se analisar com maior detalhe o impacto de diferentes estratégias operacionais no desempenho energético e na degradação das baterias.

Entre as várias estratégias de otimização, a travagem regenerativa assume um papel central, permitindo que a energia cinética, gerada através de travagens e desacelerações, seja convertida em energia elétrica e armazenada nas baterias. Esta funcionalidade permite melhorar a eficiência energética de todo o veículo, o que contribui para a redução do consumo, assim como também para o prolongamento da autonomia da bateria. Para além disso, ao recorrer ao efeito eletrodinâmico inverso gerado na própria máquina propulsora - que se opõe ao movimento do veículo - a travagem regenerativa reduz significativamente a atuação dos sistemas de travagem convencionais, promovendo assim um menor desgaste dos componentes e, conseqüentemente uma manutenção mais eficiente. Contudo, o impacto desta tecnologia no envelhecimento das células de lítio permanece uma questão complexa e praticamente inexplorada. Compreender os efeitos associados à travagem regenerativa mostra-se essencial para assegurar não apenas a eficiência energética, mas também a fiabilidade e longevidade das baterias em autocarros elétricos urbanos, ou, num panorama mais alargado, em toda a mobilidade elétrica.

Partindo desta premissa, o presente trabalho centra-se sobre a análise do impacto da travagem regenerativa no envelhecimento das células de lítio, tendo como base os perfis de descarga resultantes das rotas urbanas e, em particular, a variação da profundidade de descarga ao longo dos ciclos diários.

Deste modo, e tendo por base o enquadramento anteriormente apresentado, seguem-se os objetivos específicos que orientam a realização do presente estudo, e que visam dar resposta às questões centrais expostas.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos que se seguem foram delineados com o intuito de apresentar uma estrutura clara e precisa das principais vertentes do estudo. Cada um destes objetivos visa aprofundar aspetos fundamentais relacionados com a

modelação do sistema de tração e a análise da degradação das baterias, garantindo uma abordagem detalhada e focada no âmbito do presente trabalho.

1. Desenvolver competências na modelação de sistemas REM;
 - I. Compreender detalhadamente os princípios que fundamentam a representação energética dos sistemas e a sua aplicação prática na simulação do funcionamento dos veículos elétricos urbanos.
 - II. Entender como os diferentes elementos, elétricos e mecânicos, interagem dentro do modelo, de forma a captar as dinâmicas reais do sistema de tração.
2. Validar o modelo da célula e do sistema REM;
3. Aplicar o algoritmo de contagem de ciclos, RainFlow, para análise da degradação das células;
4. Analisar a influência da travagem regenerativa na degradação da bateria;
 - I. Determinar o parâmetro de ajuste da travagem que menor impacto tenha na fadiga da bateria e simultaneamente adquira o máximo de energia possível.
 - II. Investigar se existem padrões ou tendências que se correlacionam entre os diferentes perfis de condução e o comportamento da bateria, contribuindo para um melhor entendimento da sua degradação.
 - III. Avaliar o comportamento da bateria sob diferentes condições de travagem regenerativa para compreender os seus efeitos a médio e longo prazo na durabilidade e no desempenho do sistema energético.

1.2.3 Objetivos futuros

Para além dos objetivos concretizados neste trabalho, revela-se fundamental, em estudos futuros, aprofundar a análise da travagem regenerativa e o seu impacto nas baterias. Isto envolve a comparação das diferentes químicas de células de lítio, avaliando a resposta destas aos ciclos de carga e descarga provocados por esta tecnologia, assim como a influência de variáveis como a temperatura, o perfil topográfico das rotas e a frequência das paragens na degradação das baterias em condições reais. Para além disso, será pertinente investigar a integração da gestão da bateria com sistemas inteligentes de carregamento, visando otimizar a recuperação de energia e prolongar a vida útil dos componentes.

1.3 Estrutura do relatório

A presente dissertação, após esta breve introdução, encontra-se organizada e estruturada em seis capítulos principais. O segundo capítulo estabelece a base conceptual do trabalho a partir de uma revisão da literatura, inicialmente sobre a mobilidade elétrica em contexto urbano, seguindo-se com a temática das baterias e por fim sobre degradação e metodologias de análise de degradação. Neste capítulo são abordadas a importância dos autocarros no planeamento urbano, as atuais tendências do sector e as tecnologias de baterias aplicadas à propulsão elétrica, com especial foco nos mecanismos de degradação e fadiga das baterias de iões de lítio. Ainda, esta revisão integra também uma análise dos principais métodos utilizados em estudos anteriores, o que permite enquadrar e justificar a metodologia adotada no presente estudo. De seguida, o terceiro capítulo introduz a metodologia de Representação Energética Macroscópica (REM), através do enquadramento teórico, os fundamentos e as regras de associação que sustentam a abordagem, bem como o processo de inversão que serve de base à modelação desenvolvida nas etapas seguintes. A partir deste enquadramento teórico, o quarto capítulo apresenta o estudo de caso do miniautocarro Karsan eJest, onde são identificadas as suas características físicas que se constituem como a base fundamental para a implementação da metodologia REM quanto à modelação do sistema de propulsão e do sistema de armazenamento de energia. Ainda, neste capítulo, é descrito todo o processo de implementação em ambiente Simulink, os ensaios realizados e a validação experimental do modelo proposto. O quinto capítulo inicia com um breve enquadramento da metodologia, a qual faz a ligação coerente entre o anterior capítulo desenvolvido com a aplicação do modelo REM, seguindo-se a apresentação e explicação do algoritmo de contagem de ciclos, Rainflow, responsável pela quantificação de ciclos de carga e descarga e também apresenta a Lei de Miner, de forma complementar, para a quantificação da fadiga acumulada pelo sistema e com isto estimar a respetiva vida útil. Posteriormente neste capítulo, é desenvolvida a forma como é integrado o algoritmo em ambiente de simulação e os diferentes cenários de teste considerados para o estudo. Segue-se o sexto capítulo, que reúne e discute os resultados obtidos, analisando a influência da travagem regenerativa na vida útil das baterias, na autonomia do veículo e na distância total percorrida ao longo do seu ciclo de operação. Por fim, o presente trabalho encerra com o sétimo capítulo, onde são sintetizadas as principais conclusões e contributos do estudo, apresentando igualmente propostas para trabalhos futuros e novas abordagens no âmbito da mobilidade elétrica urbana quanto ao estudo da estimativa de vida útil destes sistemas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Mobilidade Elétrica Urbana

2.1.1 O papel dos Autocarros no Planeamento Urbano

Numa atual fase de transição na mobilidade urbana, nos autocarros, os esforços encontram-se orientados para a análise do impacto da integração de frotas 100% elétricas nas cidades, desde a parte económica à parte social e operacional [14]. De uma forma geral, é possível estabelecer que a atualidade se encontra com estas três frentes de estudo, cada uma com a sua particularidade e âmbito. A parte económica refere-se a todo o conjunto de custos associados desde a aquisição dos veículos à sua exploração e manutenção, incluindo também as várias infraestruturas integrantes, seja de carregamento dos veículos, de novas redes de abastecimento, e até mesmo de reformas urbanísticas que sejam necessárias [15]. Em termos operacionais, a estratégia passa por otimizar toda a logística envolvida na gestão dos VEs, como é o caso dos carregamentos, do consumo energético do sistema de tração e sistemas auxiliares, da capacidade e tipo de bateria, da frequência do serviço, dos itinerários e dimensão da frota. No que diz respeito à parte social, os estudos são focados nos efeitos do bem-estar social e desenvolvimento sustentável que é proporcionado pela adoção deste tipo de tecnologias, tanto ao nível da saúde pública com a redução das emissões e ruído, como na maior acessibilidade e descongestionamento dos meios urbanos, que inerente a esta transformação, promovem um ambiente socialmente equalitário [16], [17].

2.1.2 Tendências e Perspetivas

A mobilidade elétrica urbana está a ganhar cada vez mais relevância à medida que as cidades enfrentam os desafios das emissões de carbono e da poluição. Além das questões ambientais, a transição para a eletrificação do transporte público também visa melhorar a eficiência das redes de transporte urbano. As tendências incluem o desenvolvimento de baterias mais eficientes e duradouras, a expansão da infraestrutura de carregamento e a integração de tecnologias inteligentes para otimizar o uso dos veículos elétricos [18].

A longo prazo, espera-se que a eletrificação do transporte público se expanda, não apenas para os autocarros, mas também para outros meios de transporte urbano, como os táxis e os veículos de transporte partilhado, promovendo uma mobilidade urbana mais sustentável e eficiente [19], [20].

2.2 Tecnologias de Baterias para Propulsão Elétrica

2.2.1 Evolução Histórica e funcionamento das baterias

Os sistemas de armazenamento de energia elétrica, historicamente remontam ao início do século XIX, com o surgimento da primeira célula, a conhecida *Célula de Volta*, que, após algumas modificações, se veio a tornar naquilo a que hoje é conhecido como as pilhas comuns [21]. Tecnologias desta natureza são designadas como células primárias pela particularidade do seu funcionamento assentar sobre um processo químico irreversível, isto é, uma vez que os reagentes são consumidos, não é possível ser carregada novamente. A evolução das células, Figura 2, para aquilo que é conhecido atualmente como as células recarregáveis, designadas de células secundárias, aparece ainda na segunda metade do século XIX com as baterias de chumbo-ácido e, posteriormente, já perto do início do século XX, as tecnologias de Níquel-Cádmio. Praticamente oitenta anos depois, aparecem as primeiras tecnologias de lítio e logo a seguir as de níquel-hidretos de metal.

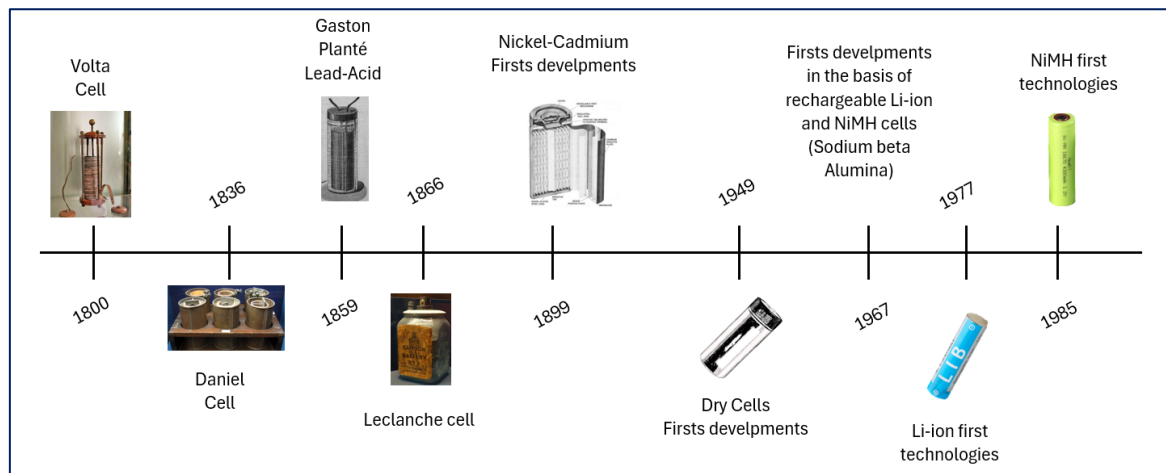


Figura 2 - Linha temporal da evolução histórica das células [21], [22].

Com a crescente evolução tecnológica, os utilizadores de tecnologias elétricas e eletrónicas manifestaram a necessidade e dependência de sistemas de armazenamento de energia como forma de facilitar a acessibilidade e portabilidade dos vários equipamentos sem depender de uma fonte de energia externa.

Uma bateria, do ponto de vista elementar, é um sistema eletroquímico constituído por duas ou mais células ligadas entre si. A célula, na sua forma mais simples, é um sistema composto por dois elétrodos, um positivo e um negativo (ânodo e cátodo), separados por uma barreira isolante, e ambos embebidos por um eletrólito, sólido ou líquido, que apenas permite a passagem de iões [21]. O princípio de funcionamento da célula, Figura 3, assenta num conjunto de reações químicas que ocorrem, onde, durante a descarga a corrente elétrica flui do elétrodo positivo (cátodo) para o negativo (ânodo) por intermédio de um circuito externo, e desta forma produz trabalho. Os eletrões circulam, como é sabido, em sentido contrário.

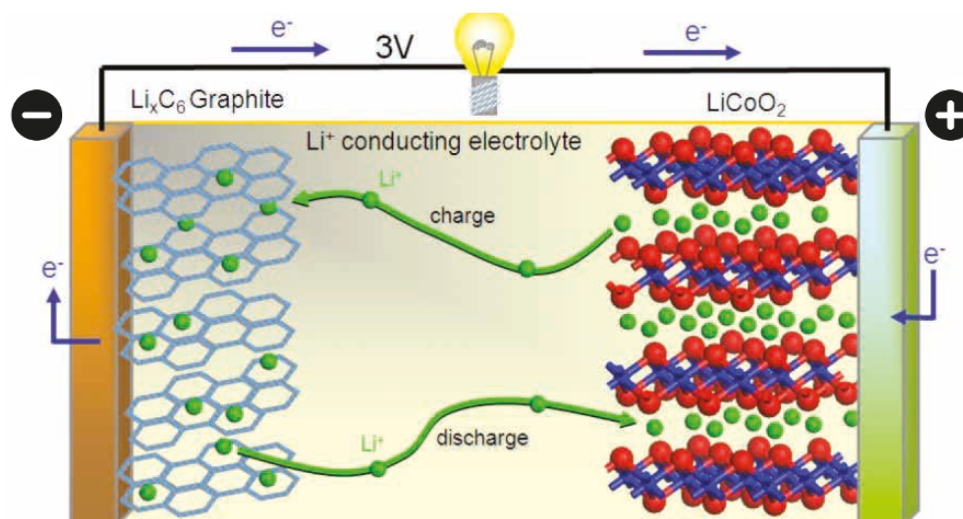


Figura 3 – Representação do funcionamento de uma célula de lítio [23].

Desde o seu surgimento até à atualidade, as células de lítio e as suas químicas revolucionaram o setor automotivo elétrico sobretudo pelas suas características de longa vida útil, baixo custo de manutenção e grande energia e potência específica, combinados com a alta eficiência [24], [25], [26]. Dentre as várias químicas que utilizam íons de lítio, é possível selecionar um conjunto de químicas de células de lítio que atualmente são as mais utilizadas, nomeadamente células de lítio óxido de cobalto (LCO), Lítio óxido de manganês (LMO), Lítio-níquel-manganês e óxido de cobalto (NMC), Lítio-níquel-cobalto e óxido de alumina (NCA), Lítio Fosfato de Ferro (LFP) e Lítio óxido de titanato (LTO). Cada química de lítio usada para a construção de células apresenta características próprias, conforme listado em resumo, na Tabela 1, abaixo.

Tabela 1 – Características típicas associadas às respectivas químicas de células de íons de lítio [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33].

Química	Tensão Nominal [V]	Energia específica [Wh/kg]	Ciclos vida [n°]
LFP	3.2-3.3	90-220	>2000
NMC	3.6-3.7	150-260	1000-2000
LCO	3.6	150-190	500-1000
LMO	3.7-3.75	100-240	1000-1500
NCA	3.65	200-260	1000-1500
LTO	2.2-2.4	50-80	>6000

As diferentes químicas de células de íons de lítio apresentam características próprias que dependem exclusivamente da sua natureza química e que lhes conferem propriedades específicas em termos de densidade de energia, potência, segurança e durabilidade. Regra geral, a referência à química de lítio diz respeito ao eletrodo positivo (cátodo), enquanto o eletrodo negativo tipicamente é constituído por grafite, à exceção de algumas tecnologias, como o caso do LTO, que se refere à composição do eletrodo negativo (ânodo). Sintetizando de uma forma geral as várias químicas, células de lítio óxido de cobalto (LCO) possuem elevada densidade de energia, no entanto, implicam uma menor estabilidade térmica e vida útil limitada, o que restringe a sua utilização para propulsão em veículos elétricos. Por outro lado, químicas como NCA combinam elevada densidade de energia com maior durabilidade, enquanto químicas que contêm fosfatos e óxido de manganês, como o caso das LFP e LMO, apresentam elevada estabilidade térmica, maior segurança e vida útil prolongada, embora com densidade de energia inferior. Composições mistas, como níquel-cobalto-manganês (NCM), permitem otimizar energia, potência e segurança, assegurando uma vida útil razoável. As NCM apresentam maior densidade de energia e custos mais reduzidos, enquanto as LFP apresentam maior estabilidade térmica e durabilidade, evidenciando diferentes perfis de desempenho adequados a distintas aplicações. As células com titanato de lítio (LTO) apresentam uma ampla faixa de operação, longa durabilidade e segurança, devido à sua elevada estabilidade estrutural, isto é, devido à sua alta inércia volumétrica, resultando numa célula com alta eficiência coulombica, e ciclos de vida frequentemente superiores a 6000 ciclos. No entanto, apesar das propriedades enunciadas, as células de LTO, por outro lado, são economicamente mais dispendiosas, e, devido à baixa tensão nominal e densidade energética, em muitas aplicações são substituídas por células NCM e LFP, que para a mesma aplicabilidade, tornam os sistemas mais compactos, leves e económicos [34], [35].

A seleção da química correta, implica assim um compromisso entre densidade de energia, potência, segurança, durabilidade e custo, devendo ser ajustada às exigências específicas de cada aplicação, desde dispositivos portáteis a veículos elétricos e sistemas estacionários de armazenamento. Assim, considerando a evolução histórica das pilhas e, posteriormente, das células de íons de lítio, o seu princípio de funcionamento e as diferentes químicas disponíveis, torna-se possível abordar, de seguida, os mecanismos de degradação que condicionam a vida útil e fiabilidade operacional destas tecnologias.

2.2.2 Degradação e Fadiga em Baterias de Lítio

A degradação das baterias de íons de lítio constitui um dos principais desafios no desempenho e na vida útil dos veículos elétricos [36]. Este processo complexo resulta da interação entre fenómenos termodinâmicos, físicos e químicos, que reduzem progressivamente a capacidade da célula de armazenar e fornecer energia [37]. Fatores como temperatura, profundidade do ciclo de descarga e número de ciclos de carga contribuem para a fadiga dos materiais ativos e com isto para a

degradação geral das células, afetando diretamente a autonomia e a eficiência operacional dos veículos. Compreender detalhadamente estes mecanismos é fulcral para otimizar rotas, desenvolver estratégias de gestão de energia eficientes e melhorar o design e a durabilidade das baterias, garantindo a sustentabilidade e a viabilidade económica dos sistemas de propulsão elétrica.

A investigação sobre a degradação das células de iões de lítio continua a ser uma área ativamente em desenvolvimento e expansão. Vários estudos têm-se focado em quantificar e classificar os demais mecanismos de envelhecimento envolvidos. Estes modelos procuram identificar os principais fatores de degradação, incluindo a perda de capacidade, a redução de potência, o aumento da resistência interna, a deterioração do eletrólito, e, no geral o declínio global do estado de saúde da bateria (State of Health – SOH) [38]. O SOH constitui-se como um indicador fundamental, refletindo a capacidade e o desempenho da bateria relativamente ao seu início de vida útil (Beginning of Life – BoL). A estimação precisa do SOH é essencial para prever o fim de vida útil (End of Life – EoL) do sistema, e assim, definir estratégias de controlo que prolonguem a vida útil, minimizando o impacto dos fatores de stress.

Apesar dos avanços significativos na modelação preditiva, garantir precisão e robustez em condições reais continua a ser um desafio [39]. Variáveis como condições de operação, perfis de carga e influências externas aumentam a complexidade da estimativa da vida útil restante (Remaining Useful Life – RUL) e do EoL [40]. Assim, a melhoria contínua destes modelos é necessária para reduzir a dependência de estudos experimentais exaustivos e para apoiar a implementação de tecnologias de baterias mais duráveis e economicamente viáveis. Superar estes desafios exige uma avaliação detalhada das principais abordagens de modelação, das suas premissas e da sua aplicabilidade em diferentes contextos operacionais.

A degradação das baterias de iões de lítio, Figura 4, é geralmente interpretada através de três modos fundamentais amplamente reconhecidos na literatura [41]. O primeiro corresponde à perda ativa de lítio (*Loss of Lithium Inventory* - LLI), resultante principalmente de reações secundárias, como é o caso do crescimento da camada de interface sólida do eletrólito (*Solid Electrolyte Interphase* - SEI) [41], [42], [43] na superfície do ânodo de grafite, assim como a deposição de lítio metálico e outros processos parasíticos que degradam o eletrólito. O segundo mecanismo, a perda de material ativo (*Loss of Active Material* - LAM), refere-se à redução do material do eletrodo utilizável, tanto no cátodo como no ânodo. A LAM é predominantemente atribuída a tensões mecânicas induzidas durante os ciclos de carga e descarga, em que a expansão e contração volumétrica provocam fadiga e consequentemente a fratura e fragmentação de partículas, comprometendo a condutividade elétrica e diminuindo a capacidade de armazenamento de iões de lítio [42], [41]. Por fim, o aumento da resistência interna decorre do crescimento de camadas passivantes, como a SEI nas superfícies dos eletrodos, e da degradação das vias que permitem a passagem de eletrões na estrutura porosa do eletrodo. Este aumento da resistência

reduz a eficiência energética e contribui para a aceleração da perda do desempenho [41], [42].

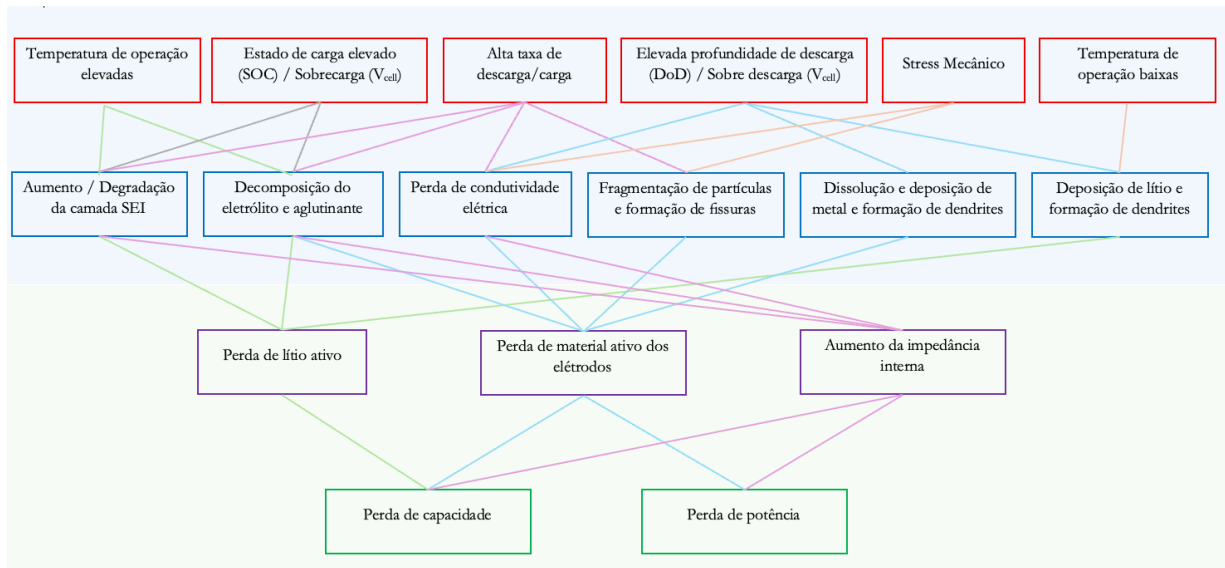


Figura 4 – Principais causas e efeitos dos mecanismos de degradação e os respectivos modos de degradação. [36], [37].

Para uma melhor compreensão e contextualização visual, a Figura 5 ilustra os vários mecanismos degradantes.

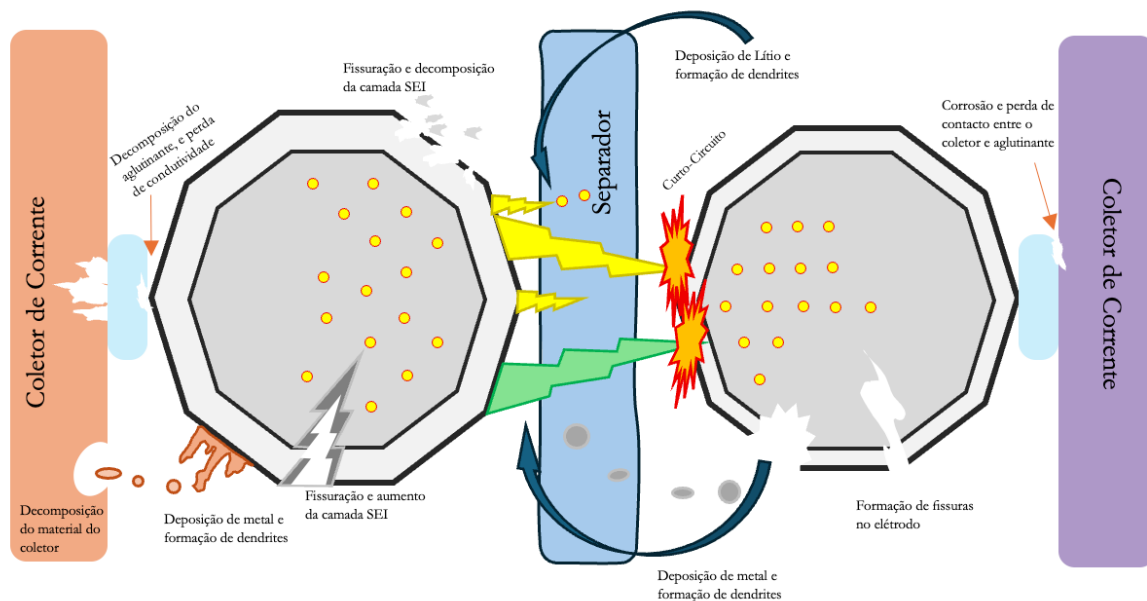


Figura 5 - Principais mecanismos de degradação em células de íões de lítio. Baseado e adaptado de [36], [37].

Um dos principais agentes responsáveis pela degradação, manifestando-se através da decomposição do eletrólito e formação da camada de interface eletrolítica sólida (SEI), são os ciclos de carga e descarga, que induzem um elevado desgaste dos materiais e com isto reduzem a eficiência e a capacidade da bateria [44]. Estes efeitos

são ainda amplificados por fatores como a profundidade de descarga (DoD), as taxas de carga e descarga e as variações extremas de temperatura [45], [46].

Para compreender e quantificar os mecanismos de degradação apresentados, recorrem-se a métodos de análise e modelação que variam de modelos físicos detalhados a abordagens empíricas ou semi-empíricas. No subcapítulo que se segue, serão apresentados os principais métodos aplicados, destacando as suas características, vantagens e limitações.

2.3 Métodos de Análise

As metodologias de modelação da degradação de baterias de íões de lítio podem ser desenvolvidas através de diferentes abordagens, que variam no nível de detalhe, complexidade e requisitos de dados. Modelar de forma precisa o processo de degradação é fundamental para prever a perda de desempenho, otimizar os sistemas de gestão de baterias (BMS) e prolongar a sua vida útil [47]. Para tal, são utilizadas ferramentas que vão desde a monitorização em tempo real a modelos eletroquímicos e técnicas de *machine learning* [48], [49]. Nos parágrafos seguintes apresentam-se os principais modelos e as suas características fundamentais.

- **Modelos Físicos**

Os modelos físicos centram-se nos processos eletroquímicos e termodinâmicos fundamentais que regem o comportamento da bateria. Estas abordagens fornecem uma compreensão profunda dos mecanismos subjacentes de degradação, oferecendo uma visão mais mecanicista dos fenómenos de envelhecimento. No entanto, exigem frequentemente um conhecimento detalhado da estrutura interna da célula e recorrem a simulações numéricas complexas, o que as torna computacionalmente exigentes e demoradas [43]. Tipicamente, estes modelos abordam explicitamente percursos individuais de degradação e empregam sistemas de equações diferenciais para descrever a sua evolução ao longo do tempo.

- **Modelos Empíricos**

Os modelos empíricos, muitas vezes designados por abordagens baseadas em dados, dependem fortemente de dados obtidos em operações reais ou em experiências laboratoriais controladas. Em vez de lidar com a complexidade da modelação física, estes métodos oferecem uma alternativa simplificada e prática [50]. O seu objetivo é captar as relações entre variáveis de entrada e indicadores de desempenho através de técnicas estatísticas ou de algoritmos de aprendizagem automática [36], [51]. Por não

exigirem a modelação dos processos eletroquímicos subjacentes, estes modelos permitem uma implementação mais rápida e com custos computacionais significativamente inferiores. Contudo, a sua precisão e capacidade de generalização dependem fortemente da qualidade, diversidade e representatividade dos dados de treino, o que pode limitar a sua eficácia em condições que se afastem do conjunto de dados original [52].

• Modelos Semi-Empíricos

Esta abordagem de modelação integra elementos tanto de métodos físicos como empíricos. Nos últimos anos, os modelos semi-empíricos têm recebido uma atenção significativa devido à sua capacidade de fornecer previsões precisas exigindo, ao mesmo tempo, menos dados do que os modelos puramente físicos. Ao combinar dados experimentais com princípios teóricos, os modelos semi-empíricos oferecem uma solução promissora para prever a degradação sem necessidade de uma caracterização eletroquímica extensiva [53], [54]. Estes modelos recorrem tipicamente a representações simplificadas de processos eletroquímicos, em conjunto com técnicas baseadas em dados, para simular o comportamento da bateria, proporcionando um equilíbrio entre precisão, eficiência computacional e adaptabilidade em diferentes condições de operação.

Na Tabela 2, em síntese, apresentam-se os principais artigos analisados, com o objetivo de examinar as abordagens mais relevantes de modelação da degradação em baterias de íões de lítio. Esta análise incide, em particular, nos modelos semi-empíricos focados no envelhecimento induzido por ciclos, que constituem o tema central do presente estudo e são discutidos com maior detalhe nas secções seguintes.

Tabela 2 – Principais trabalhos analisados, tipo de modelação e âmbito do trabalho.

Autor(es)	Título	Tipo de Modelo	Âmbito
Anseán et al [55]	<i>“Operando lithium plating quantification and early detection of a commercial LiFePO₄ cell cycled under dynamic driving schedule”</i>	Semi-Empírico	Desenvolve um modelo de simulação que combina os efeitos eletroquímicos e mecanicistas, de forma a detetar e quantificar a deposição de lítio em células.
Schmitt et, al [56]	<i>“Detailed investigation of degradation modes and mechanisms of a cylindrical high-energy Li-ion cell cycled at different temperatures”</i>	Semi-Empírico	Analisa e compara técnicas não invasivas (eletroquímicas) (dOCV, DVA, EIS+DRT) com análises <i>post-mortem</i> na identificação dos mecanismos de degradação em células comerciais de lítio 21700, sob diferentes temperaturas.
Olmos, J. et al [57]	<i>“Modelling the cycling degradation of Li-ion batteries: Chemistry influenced stress factors”</i>	Empírico	Avalia a degradação através da comparação de modelos empíricos em células NMC e LFP, considerando diversos fatores de stress.

Estudo do envelhecimento de baterias de lítio em autocarros elétricos urbanos baseado na representação energética macroscópica

A. Soto et al [58]	<i>“Impact of micro-cycles on the lifetime of lithium-ion batteries: An experimental study”</i>	Semi-Empírico	Investiga e incorpora um modelo que contempla os efeitos dos microciclos no envelhecimento de baterias de lítio, sem depender apenas da análise do fluxo energético acumulado (<i>throughput</i>), ou da equivalência de ciclos completos (EFC).
Huang J et al [59]	<i>“An Improved Rainflow Algorithm Combined with Linear Criterion for the Accurate Li-ion Battery Residual Life Prediction”</i>	Semi-Empírico	Apresenta o algoritmo RainFlow, com modificações, para contagem de ciclos mais precisas e melhor previsão da vida útil, sem necessidade de testes ou equipamentos complexos.
D. Fioriti et al [60]	<i>“Battery lifetime of electric vehicles by novel rainflow-counting algorithm with temperature and C-rate dynamics: Effects of fast charging, user habits, vehicle-to-grid and climate zones”</i>	Semi-Empírico	Desenvolve um modelo para prever a degradação de baterias, considerando a ciclagem, envelhecimento calendário, a temperatura e a corrente, através do RainFlow.
A. Pérez et al. [61]	<i>“A novel aging modelling approach for second-life lithium-ion batteries”</i>	Semi-Empírico	Apresenta uma metodologia de modelação da degradação para baterias de segunda vida, que estima a capacidade e a resistência interna sem necessidade de dados históricos, através da identificação de estágios de envelhecimento e de modelos lineares para a perda de capacidade e aumento da resistência.
A. Nuhic et al. [62]	<i>“Health diagnosis and remaining useful life prognostics of lithium-ion batteries using data-driven methods”</i>	Semi-Empírico	Apresenta um método baseado em dados, com recurso ao algoritmo Rainflow e ao <i>Support Vector Regression</i> (SVR), para estimar o SOH da bateria e prever a vida útil remanescente (RUL).

Complementarmente, na Tabela 3, resume-se as principais descobertas e contribuições dos referidos estudos, assim como, são também identificadas as respetivas lacunas subjacentes. Estas, estão maioritariamente associadas a limitações na disponibilidade de dados experimentais representativos, à complexidade dos fenómenos de degradação e à dificuldade de aplicação dos modelos propostos a diferentes cenários de utilização e condições ambientais.

Tabela 3 – Principais contribuições e descobertas, e respetivas lacunas dos trabalhos.

Autor	Descobertas/Contribuições	Lacunas
Ansean et al [55]	O estudo conclui que a perda de material ativo no eletrodo negativo provoca o desequilíbrio da célula e acelera a deposição de lítio. Também, a degradação da célula segue duas fases de perda de capacidade, acelerada sobretudo pela deposição excessiva de lítio.	Identificaram-se lacunas na compreensão efetiva do impacto total que a travagem regenerativa tem na degradação das células. Conclui-se que existe necessidade de investigação adicional sobre como os efeitos repetitivos da regeneração afetam a vida útil das baterias e de que forma se relacionam com a deposição de lítio.

Schmitt et, al [56]	Identificou-se o LLI como o modo de degradação dominante em todas as temperaturas, enquanto a LAM se tornou evidente apenas a temperaturas elevadas, devido ao maior número de ciclos. Os métodos não invasivos permitiram detetar com sucesso as tendências de degradação, embora a LAM do cátodo tenha sido mascarada pela LLI.	Métodos não invasivos podem subestimar certos modos de degradação, como a LAM do cátodo. É necessário aprimorar a detecção da deposição de lítio sem recorrer à análise <i>post-mortem</i> . Limitações da célula, como a ausência do pino central, contribuem para um envelhecimento desequilibrado.
Olmos, J. et al [57]	O estudo conclui que a degradação das baterias NMC e LFP são influenciadas por fatores como a profundidade de descarga (DOD) e a temperatura, sendo que as NMC apresentaram maior vida útil para DODs e temperaturas mais baixas, enquanto as LFP mostraram maior sensibilidade às taxas de corrente de carga e descarga.	Não foram considerados no estudo alguns fatores de stress, como estratégias de carregamento, e também a exclusão das várias fases de degradação. A falta de mais dados implica resultados menos precisos, como o caso da degradação calendário, ou a resistência interna que deverão ser incluídos em análises futuras para maior fiabilidade.
A. Soto et al [58]	O estudo demonstra experimentalmente que células sujeitas a microciclos apresentam uma vida útil entre 31% a 50% mais longa que células submetidas apenas a ciclos completos, sugerindo que os microciclos influenciam positivamente a longevidade das baterias.	Evidenciam-se lacunas na literatura, relativamente ao impacto dos microciclos na degradação, o que indica que a metodologia carece de uma validação mais ampla do que é proposto, nomeadamente para outros tipos de baterias.
Huang J et al [59]	O estudo demonstra que o algoritmo Rainflow permite uma contagem fidedigna dos ciclos da bateria. O método de previsão linear fornece estimativas de vida útil precisas, com erros inferiores a 2,53%, constituindo-se como uma solução simples e eficiente para a monitorização em tempo real do SOH das baterias em diversas áreas.	O estudo não considera as limitações do algoritmo Rainflow em cenários mais complexos de operação da bateria, como o efeito de fatores ambientais externos na vida útil das mesmas, e descarta a possibilidade de impacto dos microciclos na degradação.
D. Fioriti et al [60]	O modelo estima a vida útil das baterias entre 10 e 20 anos para um uso típico diário. Apresenta resultados com precisão aprimorada ao incluir a dinâmica da temperatura e da taxa de carga/descarga (C-rate), e mostra que o uso intensivo e a condução em autoestradas reduzem a vida útil em cerca de 1 a 2 anos, no entanto, em termos de distância total percorrida a diferença é reduzida.	O estudo recorre a uma abordagem estática baseada no circuito equivalente R_i , V_{ocv} , não incluindo os efeitos eletrodinâmicos numa escala mais reduzida, como o caso da travagem regenerativa. Carece de dados experimentais de maior escala incluindo diferentes químicas e tipologias de células, o que limita a sua precisão geral em condições reais de utilização.
A. Pérez et al. [61]	O estudo mostra que integrar variáveis como a temperatura, SoC, DoD e C-rate melhora a previsão da degradação. A combinação de modelos físicos térmicos e elétricos com abordagens semi-empíricas assegura estimativas mais fiáveis da vida útil. O modelo foi validado para um conjunto amplo de SOH (95%-20%), alcançando previsões dentro de limites considerados aceitáveis, quanto ao seu erro médio quadrático (RMSE - Root mean square error), e o MAPE (Mean absolute percentage error) que expressa o erro médio absoluto em termos percentuais.	O modelo demonstra previsões precisas de degradação ao integrar variáveis como temperatura, SoC, DoD e C-rate. No entanto, faltam análises sobre diferentes químicas de bateria e padrões irregulares de carga/descarga ao longo de períodos prolongados, o que limita a generalização dos resultados.
A. Nuhic et al. [62]	O estudo demonstrou que a combinação de SVR (<i>machine learning</i>) com extensos conjuntos de dados de ciclos de carga/descarga permite estimar com fiabilidade o estado de saúde (SOH) e a vida útil remanescente (RUL) das baterias resultando em erros (RMSE) quase nulos. Este método através do histórico de uso, das condições de carga e o ambiente, mantém precisão mesmo para perfis de condução não incluídos no treino, adequando-se para implementação em sistemas de gestão de baterias.	O modelo foi validado apenas em células de lítio para aplicações automotivas de alta performance, podendo não generalizar para outros tipos de baterias ou veículos. A sua precisão pode ser limitada em condições extremas de carga ou temperatura. Além disso, a previsão da vida útil remanescente não incorpora incertezas nem probabilidades de falha a longo prazo.

Relativamente à literatura existente sobre as abordagens de modelação da degradação de baterias, têm-se registado progressos significativos. No entanto, lacunas importantes persistem, nomeadamente nos modelos baseados em algoritmos de contagem de ciclos, como o método RainFlow. Esta abordagem encontra-se ainda numa fase inicial de desenvolvimento no domínio das baterias, pelo que necessita de mais testes, ensaios e suporte científico que permitam agregar maior robustez aos modelos e, assim, potenciar uma melhor precisão e fiabilidade preditiva. Ainda assim, a sua simplicidade e baixos requisitos computacionais tornam-na altamente adequada para aplicações em tempo real, sobretudo em contextos com recursos limitados.

Dentro deste contexto, a contagem dos ciclos de carga e descarga assume um papel crucial na análise e previsão da degradação. Entre as metodologias existentes, destaca-se o algoritmo RainFlow, originalmente desenvolvido para a análise de fadiga em sistemas mecânicos [63], [64], e que, cada vez mais, tem vindo a ser adaptado ao estudo do comportamento das baterias. Este método permite decompor perfis irregulares de carga e descarga em ciclos discretos, identificando todos os eventos de stress, desde os mais pequenos até aos maiores, que contribuem para a perda de capacidade [65]. Ao quantificar as magnitudes e frequências dos ciclos, o RainFlow apoia a análise preditiva e o desenho de estratégias de uso que minimizem a degradação [66]. Este algoritmo é descrito em maior detalhe no Capítulo 5.

Por fim, muitos modelos existentes negligenciam fatores críticos, incluindo variações de temperatura, taxas de carga/descarga e outros mecanismos dinâmicos que influenciam de forma significativa a degradação da bateria. A investigação futura deve incorporar estas variáveis ambientais e operacionais, permitindo previsões mais precisas em condições diversificadas.

3 REPRESENTAÇÃO ENERGÉTICA MACROSCÓPICA

3.1 Enquadramento

No mundo da ciência e da tecnologia, desde os seus primórdios, que urge a necessidade de representar uma ideia, um conceito ou um elemento físico de forma clara e compreensível. Na engenharia, por inerência, frequentemente recorre-se às representações gráficas como uma ferramenta indispensável para a conceção, desenvolvimento e interpretação de sistemas, sejam eles elétricos, mecânicos ou eletromecânicos. Estas representações permitem, de uma forma simples e intuitiva, transformar sistemas complexos em esquemas visuais representados por elementos padronizados.

Atualmente existe uma vasta gama de ferramentas de representação gráfica para a modelização de sistemas. Muitas destas ferramentas, sejam gráficos de ligações (*Bond Graphs*), diagramas de blocos, gráficos de ordem causal (COG - *Causal Ordering Graph*), Representação Energética Macroscópica (do inglês EMR), além de facilitarem a interpretação, visam também a simplificação sistémica das estruturas de controlo, isto é, promovem uma maior harmonia e eficiência na interação entre elementos e, no global, do sistema. Dentro deste conjunto, estas ferramentas podem ser categorizadas em dois tipos, nomeadamente a representação gráfica estrutural e a representação gráfica funcional, Figura 6. A grande diferença entre estas representações assenta sobretudo, em termos estruturais, na forma como os elementos estão dispostos no sistema e como se conectam fisicamente, e, em termos funcionais, na forma como os elementos interagem, isto é, na forma como os elementos entre si se comportam com as trocas de energia.

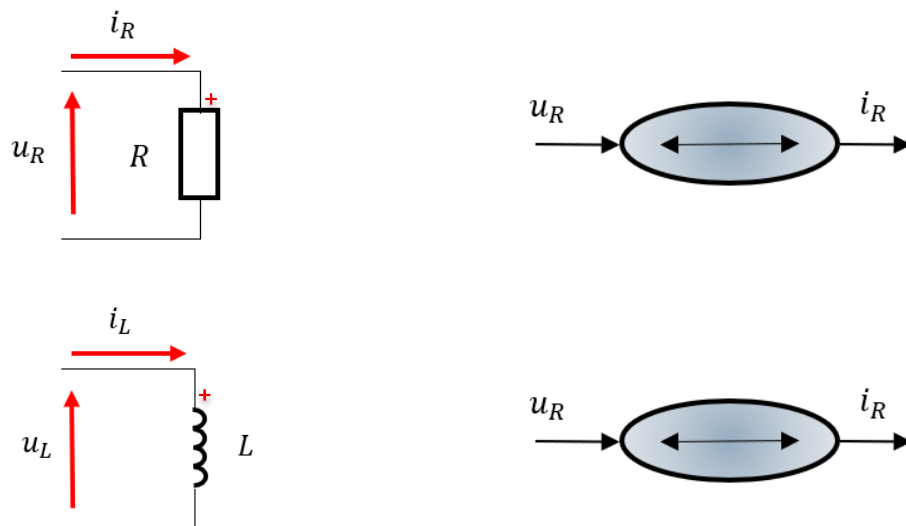


Figura 6 –Exemplo de representação estrutural à esquerda e funcional à direita.

Com a evolução deste tipo de representações, no início dos anos 2000, é introduzida pela primeira vez a técnica de modelização baseada na Representação Energética Macroscópica, Figura 7, com o intuito de promover a investigação e desenvolvimento de sistemas eletromecânicos complexos [67]. Esta abordagem corresponde especificamente a um formalismo derivado da representação COG, que permite, cumulativamente, representar as interações energéticas e todo o controlo dinâmico do sistema [68].

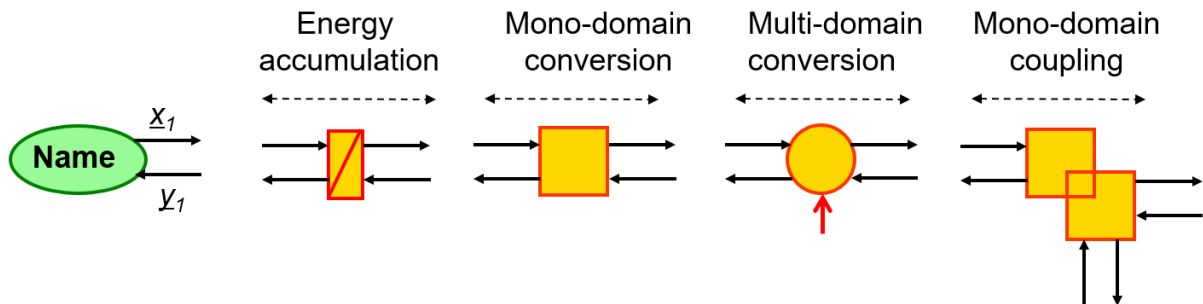


Figura 7 – Pictogramas do formalismo baseado em REM.

Atualmente, esta ferramenta é amplamente utilizada na representação de qualquer sistema físico, permitindo a modelização e análise de diversos processos energéticos de uma forma integrada, independentemente da natureza das fontes, dos processos ou das tecnologias envolvidas.

3.2 Fundamentos do formalismo REM

3.2.1 Generalidades

A representação energética macroscópica (REM) baseia-se no princípio da ação e reação, que estabelece que toda a transferência de energia resulta de um processo ou evento anterior. Este método causal representa de forma simples o processo energético natural, reproduzindo, de maneira lógica e invertível, a interação entre componentes ou variáveis do sistema [67], [69]. A REM segue o princípio da integração, ou seja, a cada instante, o produto entre as variáveis que entram e saem dos elementos corresponde à sua potência instantânea. Ao longo do tempo, essa potência acumula-se, transformando-se em energia. Este processo reflete de forma precisa a dinâmica de sistemas energéticos, destacando como a energia é transferida, armazenada e transformada dentro do sistema. Esta técnica é uma ferramenta de apoio que permite estruturar um sistema de uma forma organizada e intuitiva que acarreta um conjunto de vantagens para quem desenvolve o sistema, simultaneamente, na ótica do desenvolvimento da estrutura de controlo e do ponto de vista da análise das interações energéticas[69].

De uma forma geral, a REM é representada por um conjunto elementar básico de quatro pictogramas, dos quais:

Fonte de Energia

A fonte de energia, Figura 8, é representada por um pictograma oval verde, e serve para representar elementos que possam fornecer ou receber energia, o que nos indica que a energia nestes elementos pode fluir em ambas as direções, isto é, alimentar o sistema a jusante, ou no sentido inverso, ser alimentado pelo sistema. Tipicamente, o pictograma da fonte de energia poderá representar em termos físicos uma bateria ou uma rede elétrica, como também pode representar uma fonte absorvedora de energia, como o caso do atrito das rodas de um veículo no pavimento ou até a força do vento em oposição a um movimento.

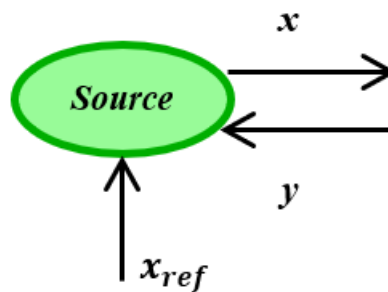


Figura 8 – Representação do elemento fonte de energia, com x a representar a variável que causa a ação, y a variável reação, e x_{ref} a variável de referência da ação.

Elementos conversores

Os elementos conversores de energia podem ser representados de duas formas diferentes, dependendo do tipo de conversão. Em regra, quando se trata de uma conversão monofísica, isto é, quando apenas ocorre a transformação de uma mesma grandeza, a representação será efetuada através de um pictograma quadrado com o interior em cor-de-laranja e as bordas a vermelho. Num caso em que a conversão seja multifísica, ou seja, quando existe a transformação de uma grandeza numa outra distinta, a representação será efetuada através de um pictograma redondo, também cor-de-laranja e com as bordas em vermelho. Ambos os casos estipulam apenas a conversão sem acumulação de energia e de forma bidirecional. As entradas e saídas dos blocos são definidas através da interação com blocos externos, conectados por dois pares de setas indicando as grandezas que vigoram na dinâmica do elemento. Na Figura 9, apresenta-se a forma de representação dos pictogramas, e ainda, a azul, o paralelogramo que representa a inversão para qualquer um dos elementos de conversão.

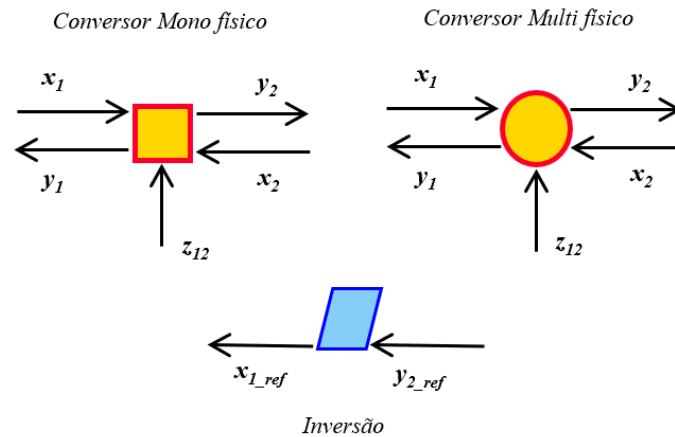


Figura 9 – Representação do elemento que caracteriza um conversor. À esquerda, um conversor monofísico, à direita um multifísico e abaixo o pictograma de inversão para ambos os elementos.

Analisando mais concretamente, num contexto mais familiar, é possível associar um conversor monofísico, por exemplo, a um transformador elétrico ou um conversor de eletrónica de potência, visto que a grandeza que entra e sai, ou seja, a conversão que ocorre, é unicamente de energia elétrica. Por outro lado, um sistema multifísico remete sempre para elementos como é o caso de um motor elétrico, que converte energia elétrica em energia mecânica ou, por exemplo, uma turbina que converte energia cinética rotativa (trabalho de pás) em energia elétrica.

Elemento de acoplamento

Os elementos de acoplamento são representados habitualmente de duas formas. Por quadrados sobrepostos com os contornos em cor laranja, no caso de se tratar da representação de um sistema monofísico, ou por círculos sobrepostos, também com o contorno cor-de-laranja, quando se refere a um sistema multifísico. Estes elementos funcionalmente têm a função de agregar ou distribuir energia sem que a mesma seja armazenada, pelo que operam segundo uma causalidade externa.

Cada bloco possui '**m**' pares de entradas/saídas no lado esquerdo e '**p**' pares de entradas/saídas no lado direito.

- Se $m < p$, o acoplamento ocorre a montante, à entrada do elemento, com o objetivo de distribuir os fluxos de energia por vários caminhos.
- Se $m > p$, o acoplamento ocorre a jusante, à saída do elemento, que agrega múltiplos fluxos de energia num número reduzido de saídas.
- No caso de $m = p$, o bloco tem um papel neutro, servindo apenas para reorganizar os fluxos energéticos sem alterar a sua distribuição

A Figura 10 apresenta os pictogramas utilizados para a representação dos elementos de acoplamento. Os paralelogramos sobrepostos a azul representam a inversão de um elemento de acoplamento.

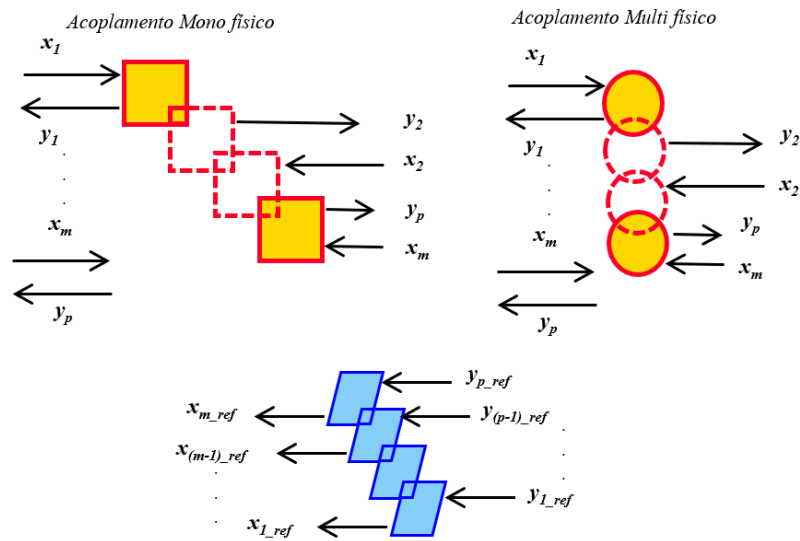


Figura 10 – Representação do elemento que caracteriza o acoplamento. À esquerda um acoplamento monofísico, à direita multifísico e em baixo a inversão para ambos os casos.

Os acoplamentos num caso real podem representar vários elementos físicos, como é o caso de um diferencial de um veículo, ou, por exemplo, um conjunto de células que agregadas formam uma bateria (acoplamento monofísico). Por outro lado, um acoplamento multifísico poderá representar o enrolamento de um motor elétrico que, quando percorrido por uma corrente geradora de um campo magnético girante, induz um binário, ou seja, existe um conjunto de interações entre o estator e rotor através de efeitos de campo que, em conjunto, originam um trabalho mecânico.

Elemento de acumulação

Os elementos de acumulação são representados por um retângulo com uma barra cor-de-laranja na diagonal, composto por dois pares de setas em ambos os lados que definem a bidirecionalidade do fluxo da energia. Portanto, tratando-se de um elemento de acumulação, é dedutível que as variáveis que saem do bloco correspondem a funções integrais das suas entradas, cumprindo o princípio da causalidade. Na Figura 11 apresentam-se os pictogramas utilizados para os elementos de acumulação. O paralelogramo com barras azuis representa o bloco de inversão associado a um elemento de acumulação.

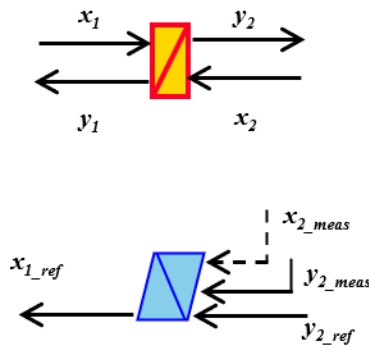


Figura 11 – Representação do elemento de acumulação e a respetiva inversão.

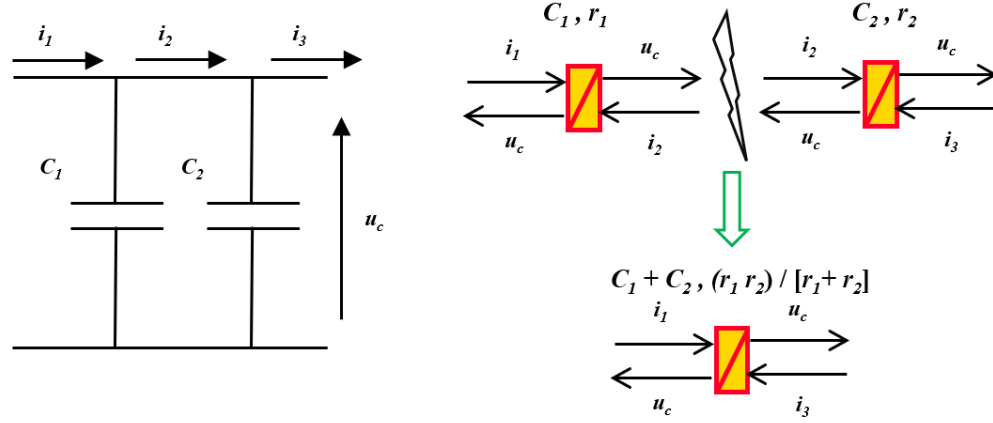
Em termos técnicos, um elemento de acumulação pode ser uma indutância ou uma capacitância, representadas, respetivamente, por uma bobine ou um condensador. Ambos os componentes possuem a capacidade de armazenar energia temporariamente, no caso da indutância, sob a forma de campo magnético, e no caso da capacitância, sob a forma de campo elétrico, permitindo a sua posterior distribuição no circuito.

3.2.2 Regras de Associação

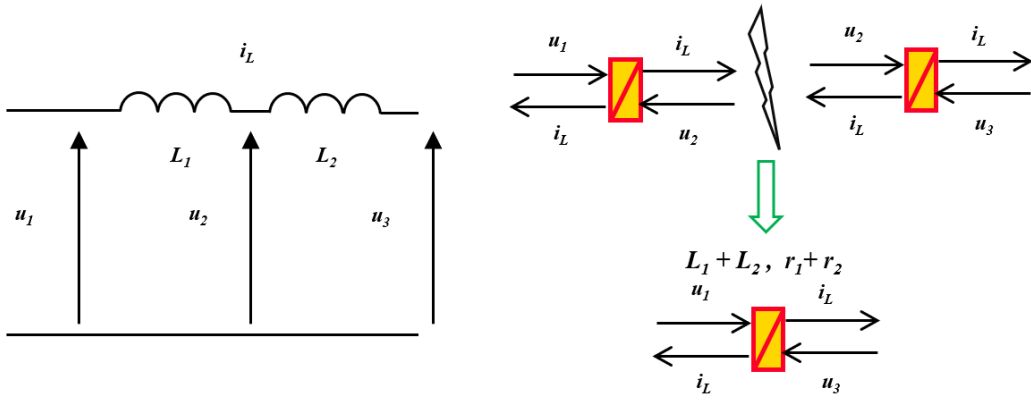
No desenvolvimento da REM, na fase de conceção dos vários elementos dos subsistemas, por vezes, surgem alguns conflitos de associação. Tipicamente, os conflitos ocorrem quando dois elementos que se conectam tentam simultaneamente impor para uma mesma variável de estado diferentes valores. Como apenas é possível interligar dois elementos onde exista correspondência entre as variáveis que entram e saem, duas regras de associação foram desenvolvidas por forma a compatibilizar o sistema sem alterar as suas características funcionais. Desta forma, as duas regras de associação são as seguintes:

Regra de fusão ou combinação

Esta regra, Figura 12, surge da necessidade de ultrapassar o conflito criado por dois ou mais elementos que tentam impor diferentes valores para uma mesma variável de estado, como é o caso de condensadores em paralelo ou indutâncias em série.



(a)



(b)

Figura 12 – Exemplificação da aplicação da regra de combinação, a) para o caso de capacitâncias em paralelo, b) para o caso de indutâncias em série.

Regra de permutação

A regra de permutação, Figura 13, permite alterar a ordem de dois elementos conectados, substituindo os elementos por dois elementos virtuais que produzem o mesmo efeito global da configuração original. O importante é que as entradas e saídas do sistema, como um todo, não sejam alteradas. Para garantir isso, os parâmetros dos elementos virtuais precisam de ser ajustados de forma a manter o comportamento do sistema inalterado.

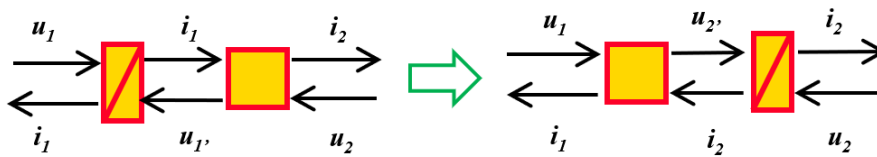


Figura 13 – Exemplificação da aplicação da regra de permutação.

Uma forma simples de compreender esta regra passa pela análise de um transformador, Figura 14. Neste tipo de aparelhagem, deparamo-nos com uma razão de transformação ' m ', que relaciona o rácio de transformação entre o primário e o secundário. Em EMR esta representação faz-se através de um elemento de acumulação para representar a impedância L, r e um elemento de conversão mono físico para a transformação ' m '. Ao aplicar a regra de permutação entre estes elementos, analogamente, corresponde ao mesmo que passar a análise da impedância do lado primário para o secundário, matematicamente, através da divisão da impedância pela razão de transformação ao quadrado.

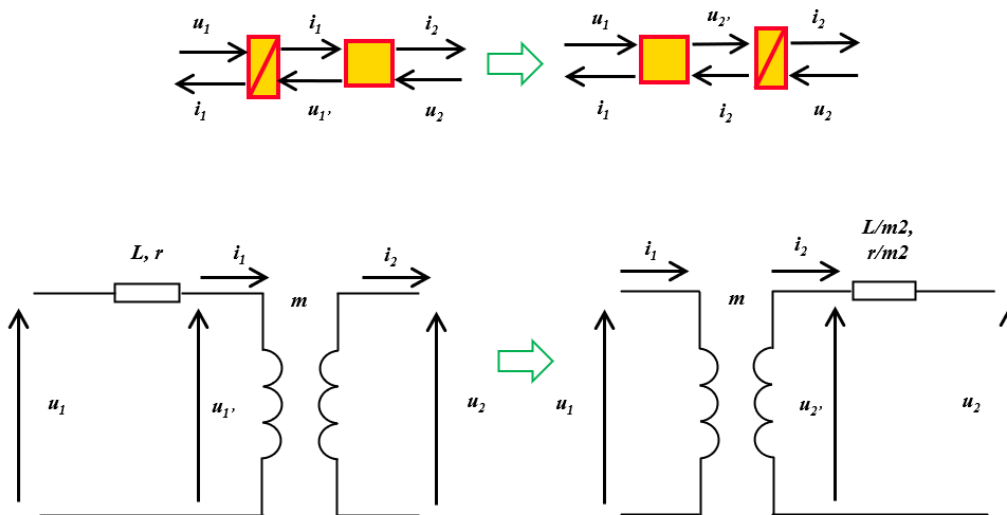


Figura 14 – Aplicação da regra de permutação através da analogia com um caso prático de um transformador.

3.2.3 Inversão da REM

A inversão da Representação Energética Macroscópica advém da necessidade de ter controlo sobre o sistema físico. Na secção anterior é possível observar nas figuras apresentadas os pictogramas da inversão de cada elemento da REM. Os pictogramas da inversão podem ser ilustrados apenas de três formas distintas, das quais, a inversão dos elementos de conversão, de acumulação e acoplamento, representando-se, genericamente, por paralelogramos de cor azul-claro com o contorno delineado a azul-escuro. Esta abordagem permite que sejam definidas as variáveis de ajuste do sistema e, com isto, controlar a dinâmica e interação entre os elementos da REM.

4 ESTUDO DE CASO DO MINIAUTOCARRO KARSAN EJEST

4.1 Generalidades e Características

O estudo conduzido tem início com a análise do veículo alvo. O miniautocarro em questão é um veículo totalmente elétrico da marca turca Karsan, modelo eJest. Este modelo, Figura 15, encontra-se atualmente no mercado equipado com uma bateria de 88kWh de capacidade que, de acordo com o fabricante, possibilita uma autonomia de até 210 km, segundo o ciclo normalizado NEDC (Normalized European Driving Cycle). Este autocarro enquadra-se na categoria M2/M3 e classe A, isto é, concebido para transportar passageiros sentados e de pé, otimizados para transporte urbano ou de curta distância [70].



Figura 15 – Miniautocarro Urbano Karsan e-Jest [70].

Para permitir uma abordagem mais completa do modelo e fundamentar a sua construção em ambiente de simulação, torna-se fulcral apresentar os principais parâmetros físicos e dinâmicos do veículo. Estes dados constituem-se como a base para o desenvolvimento do modelo REM, uma vez que os parâmetros influenciam diretamente o dimensionamento das forças envolvidas no sistema, como sejam a força de resistência do rolamento, ao atrito aerodinâmico, à transmissão de potência e, naturalmente, ao próprio consumo de energia ao longo das rotas simuladas. Posto isto, a Tabela 4, reúne as variáveis essenciais à modelação do sistema, as quais são consideradas na implementação do modelo REM e na sua análise ao nível do sistema.

Estudo do envelhecimento de baterias de lítio em autocarros elétricos urbanos baseado na representação energética macroscópica

Tabela 4 – Características e variáveis físicas para a modelação do autocarro

Variável	Símbolo	Valor	Unidades
Massa	M_{veh}	5200	[kg]
Raio da roda	r	364,45	[mm]
Aceleração da gravidade	g	9,81	[m · s ⁻²]
Relação de transmissão	k_{gear}	11,42:1	-
Área frontal do veículo	A	7,182	[m ²]
Coefficiente Aerodinâmico	C_x	0,7	-
Massa volúmica do Ar	ρ	1,223	[kg · m ⁻³] _{@20°C}
Eficiência da transmissão	η_{gear}	96	[%]
Coefficiente de atrito do rolamento	μ_{rr}	0,035	-

Com base nestas especificações, Tabela 4, o modelo foi desenvolvido e testado em ambiente de simulação, mais concretamente em Simulink®, o qual será alvo de detalhe num próximo ponto. O objetivo desta representação é conseguir com precisão uma simulação do miniautocarro Karsan que reflita toda a dinâmica do próprio veículo em termos reais, e com isto, permitir analisar de que forma diferentes fatores, como sejam, os percursos, o estado de carga da bateria (SoC), o número de passageiros, as condições meteorológicas e a estratégia de travagem, afetam o seu desempenho. Com este simulador, além de ser concebido para ser uma ferramenta de auxílio ao estudo de autocarros, neste trabalho pretende-se que o escopo da análise se centre no estudo do envelhecimento das células, mais propriamente no comportamento das células ao longo dos percursos diários convencionais de trabalho. Numa abordagem mais genérica, ferramentas desta natureza permitem estimar, com margens de erro relativamente baixas, o desempenho do veículo através de tendências e padrões que só se mostram visíveis com uma análise intrínseca ao próprio sistema. De seguida, na próxima secção, é introduzida a modelação baseada na representação energética do veículo e as respetivas considerações.

4.2 Modelação REM do miniautocarro e-Jest

Nesta secção é apresentado todo o desenvolvimento do modelo do miniautocarro e-Jest, numa fase inicial representado com a abordagem REM, e numa secção posterior será apresentado o modelo no ambiente de simulação. Tratando-se de tornar o modelo de simulação o mais possível realista, a modelação foi idealizada e estruturada em três componentes principais: a modelação do sistema de propulsão, a modelação do sistema da bateria, e a fase de testes e validação [71]. As seguintes subsecções, em detalhe, irão explorar todos os constituintes que integram o sistema de propulsão elétrica, incluindo a cadeia cinemática, desde o motor até às rodas, Figura 16, bem como o sistema de baterias, desde o modelo simplificado da célula até à configuração dos módulos e da bateria completa, Figura 31. Serão ainda apresentadas as equações que descrevem o comportamento e a natureza dinâmica dos diferentes subsistemas. Numa fase final, são discutidos os ensaios realizados e o processo de validação do modelo com base em dados experimentais.

4.2.1 Modelação do Sistema de propulsão

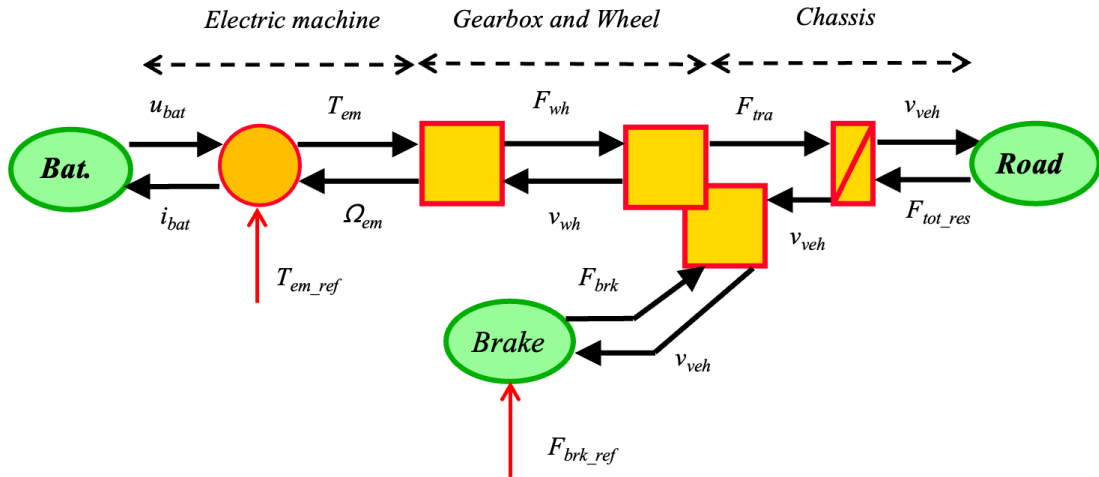


Figura 16 – Abordagem REM do Sistema de propulsão.

Motor

Quando se inicia a análise ao sistema de propulsão o primeiro elemento que surge é o motor, Figura 17. Este é o principal componente responsável pela locomoção do veículo, que converte a energia elétrica, armazenada nas baterias, em energia cinética nas rodas. No âmbito da modelação REM, este elemento é representado como um conversor eletromecânico, sendo descrito pelas seguintes expressões,(1):

$$\begin{cases} T_{em} = T_{em_{ref}} \\ i_{bat} = \frac{T_{em} \cdot \Omega_{em}}{u_{bat} \cdot \eta_{em}^{\beta}} \end{cases}, \text{ com } \beta = \begin{cases} 1, & (P_{em} \geq 0) \\ -1, & (P_{em} < 0) \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

- T_{em} representa o binário motor;
- Ω_{em} a velocidade angular do motor;
- i_{bat} a corrente da bateria;
- u_{bat} a tensão da bateria;
- η_{em} corresponde ao rendimento do motor;

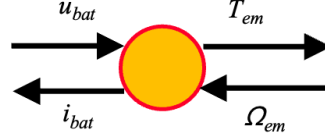


Figura 17 – Pictograma de representação do motor.

Para este elemento, e para facilitar a modelação do sistema, usou-se um modelo estático do motor. Apesar de simples, este modelo tem por base o mapa de rendimento real da máquina, Figura 18, o que permite obter resultados bastante semelhantes, do ponto de vista energético, com os de um modelo dinâmico do motor, evitando assim a complexidade associada à sua parametrização. Em termos de aplicabilidade na simulação, este mapeamento é introduzido através de uma tabela dinâmica de duas dimensões (2D), que a partir da referência de velocidade e binário permite extrair o ponto de funcionamento da máquina e com isto o rendimento associado.

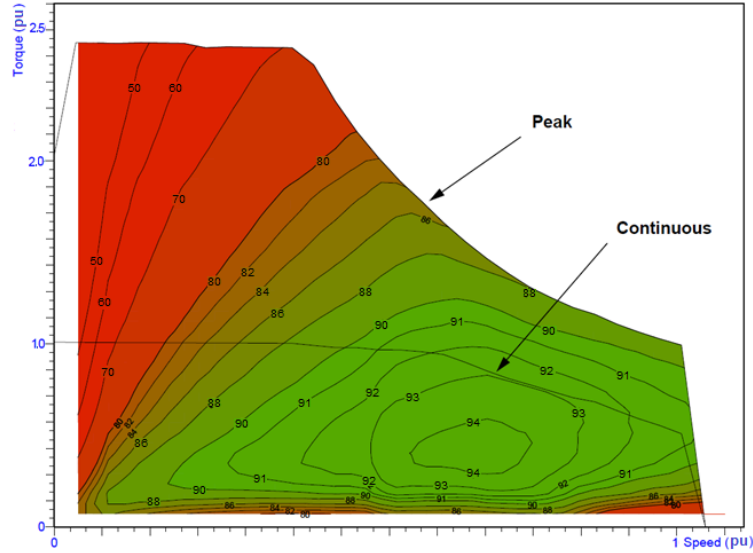


Figura 18 - Mapa de rendimento do motor [72].

É de referir que este parâmetro varia consoante a potência elétrica desenvolvida, isto é, quando a potência é positiva ($P_{em} \geq 0$) a máquina opera em modo motor, assegurando a tração, por outro lado, se a potência for negativa, ($P_{em} < 0$), a máquina atua como gerador, como é no caso da travagem regenerativa.

Caixa de velocidades, diferencial e roda

Os seguintes elementos que se incluem na construção do modelo são aqueles que fisicamente são responsáveis pela transmissão do binário gerado pelo motor até às rodas. O conjunto formado pela caixa de velocidades, o diferencial e as rodas, em termos de análise energética poderiam ser abordados de forma separada. Neste caso optou-se por não seguir essa opção devido ao facto de serem elementos de conversão monofísicos, ou seja, que convertem a mesma grandeza por meio de relações de transmissão ou transformação, isto é, por parâmetros fixos. Assim, sendo o principal objetivo a simplificação, optou-se por agregar os três elementos num só, Figura 19. Estes, são considerados na modelação REM como um sistema de transmissão não ideal, pelo que se considerou perdas mecânicas na ordem dos 5%, constantes ao longo das simulações. Posto isto, abaixo na equação (2) é possível observar a relação entre as grandezas envolvidas:

$$\begin{cases} F_{wh} = T_{em} \frac{K_{gear}}{R_{wheel}} \\ \Omega_{em} = v_{wh} \frac{K_{gear}}{R_{wheel}} \end{cases} \quad (2)$$

Onde:

- F_{wh} representa a força nas rodas;
- T_{em} representa o binário motor;
- K_{gear} é a relação de transmissão total (incluindo caixa de velocidades e diferencial);
- R_{wheel} é o raio da roda do veículo;
- Ω_{em} a velocidade angular do motor;
- v_{wh} é a velocidade linear das rodas;

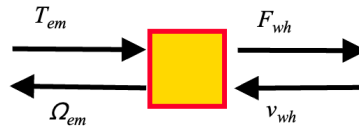


Figura 19 – Pictograma de representação da transmissão.

Considerando a transformação imposta pela cadeia de transmissão, o qual inclui a relação de conversão do sistema mecânico e a própria geometria das rodas, este elemento simplificado permite relacionar diretamente o binário do motor e a velocidade, com a força de tração aplicada ao solo e a velocidade da roda, respetivamente.

Acoplamento de travagem

No modelo REM, o esforço total resultante da tração advém da combinação de forças, sendo esta gerada pelo equilíbrio entre a força de propulsão e a força de travagem aplicada ao veículo. Este acoplamento entre tração e travagem, Figura 20, reflete-se diretamente no comportamento dinâmico do sistema, assumindo um papel determinante em regimes de aceleração e desaceleração, que de acordo com o âmbito do presente estudo, será fulcral para cenários onde ocorre regeneração de energia. Assim, as interações entre estas duas variáveis, (3), e a forma como influenciam o esforço transmitido às rodas, são integrados no sistema e representados pelas seguintes equações:

$$\begin{cases} F_{tra} = F_{wh} + F_{brk} \\ F_{brk} = F_{brk_ref} \end{cases} \quad (3)$$

Onde:

- F_{tra} é a força total aplicada às rodas;
- F_{wh} representa a força nas rodas;
- F_{brk} é a força de travagem;
- F_{brk_ref} a referência de força de travagem imposta pela estratégia de travagem;

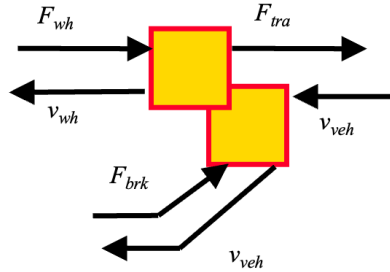


Figura 20 - Pictograma de representação do acoplamento de forças.

Neste contexto, assume-se que os contributos provenientes da tração e da travagem atuam diretamente no eixo motriz, permitindo, de forma simples, captar os efeitos da regeneração no esforço resultante transmitido às rodas.

Carroçaria

O movimento do veículo é modelado com base na segunda lei de Newton. A variação da velocidade ao longo do tempo resulta diretamente do balanço entre o esforço total transmitido às rodas e as forças resistentes que se impõem ao deslocamento do veículo, Figura 21. Abaixo, na equação (4) e (5), é possível analisar como esta relação fundamental é expressa matematicamente:

$$M_{tot} \frac{d}{dt} v_{veh} = F_{tra} - F_{tot_res} \quad (4)$$

$$v_{veh} = \frac{1}{M_{tot}} \int_0^t (F_{tra} - F_{env}) dt \quad (5)$$

Onde:

- M_{tot} é a massa total do veículo;
- v_{veh} é a velocidade do veículo;
- F_{tra} é a força total aplicada ao solo;
- F_{tot_res} representa o conjunto das forças resistivas se opõem ao movimento;

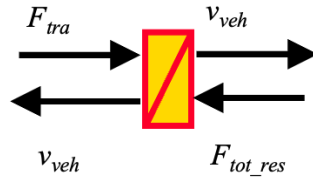


Figura 21 – Pictograma de representação da carroçaria.

No ponto seguinte serão analisadas em detalhe as forças resistivas consideradas na construção do sistema de tração, que compõem a variável F_{tot_res} , e de que forma influenciam a dinâmica do veículo.

Meio ambiente

No fim da cadeia do modelo REM, e para que o sistema traduza o comportamento físico integral do veículo, é importante que exista um elemento que correlacione o próprio sistema interno do veículo com o ambiente externo ao veículo, Figura 22. Nesse sentido, o ambiente externo caracteriza-se por agregar todas as forças resistivas ao movimento longitudinal do veículo, compostas essencialmente pela resistência aerodinâmica, pelo atrito gerado nos rolamentos das rodas e pela resistência gravítica associada a cenários de inclinação da via. No modelo utilizado, estas resistências são representadas pela seguinte expressão, (6):

$$F_{tot_res} = \mu_{rr} \cdot M_{veh} \cdot g + 0.5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot A \cdot (v_{veh})^2 + M_{veh} \cdot g \cdot \sin(\theta) \quad (6)$$

Onde:

- F_{tot_res} é a força total de resistência do meio;
- μ_{rr} é o coeficiente de resistência ao rolamento;
- M_{veh} é a massa total do veículo;
- g é a aceleração da gravidade;
- ρ é a massa volúmica do ar;
- C_x é o coeficiente de resistência aerodinâmica;
- A é a área frontal do veículo;
- v_{veh} é a velocidade do veículo;
- θ é o ângulo de inclinação da via;

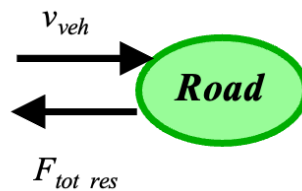


Figura 22 – Pictograma de representação dos fatores externos.

Numa análise mais pormenorizada à equação que expressa o efeito dos fatores externos, observa-se, na primeira parcela, o contributo da resistência ao rolamento, a qual está diretamente associada ao peso do veículo e ao coeficiente de atrito do próprio rolamento. Prosseguindo com a análise, a parcela seguinte representa a resistência aerodinâmica do veículo, caracterizada por uma força de oposição ao movimento, resultante do deslocamento do mesmo. Esta resistência inclui propriedades intrínsecas à geometria do veículo, como o coeficiente aerodinâmico C_x e a área frontal A , sendo ainda essencial considerar a massa volúmica do ar, ρ , que define o efeito do meio envolvente. Importa salientar que esta força cresce com o quadrado da velocidade, sendo fortemente influenciada pela forma e pela área projetada do veículo. Por fim, a terceira parcela evidencia o impacto da resistência gravítica, correspondente à projeção do peso do veículo quando sujeito às inclinações da via, expressas matematicamente pelo ângulo de inclinação, θ . Esta força assume um valor positivo em subidas, traduzindo-se num maior esforço de tração para manter o movimento, e negativo em descidas, cenário o qual que contribui para a redução do esforço motriz exigido ao motor, podendo, inclusivamente, induzir o seu funcionamento em modo gerador, possibilitando assim a regeneração de energia.

4.2.2 Inversão do Sistema de propulsão

Uma vez estabelecido o sistema REM, o passo seguinte consiste na construção da estrutura de controlo e resposta do sistema, Figura 23, com o objetivo de ajustar a variável final, a velocidade do veículo, v_{veh} . Conforme mencionado anteriormente no Capítulo 3, o desenvolvimento desta estrutura segue uma abordagem inversa, isto é, parte-se da variável controlada em direção às variáveis de comando, respeitando a lógica causal da cadeia de controlo.

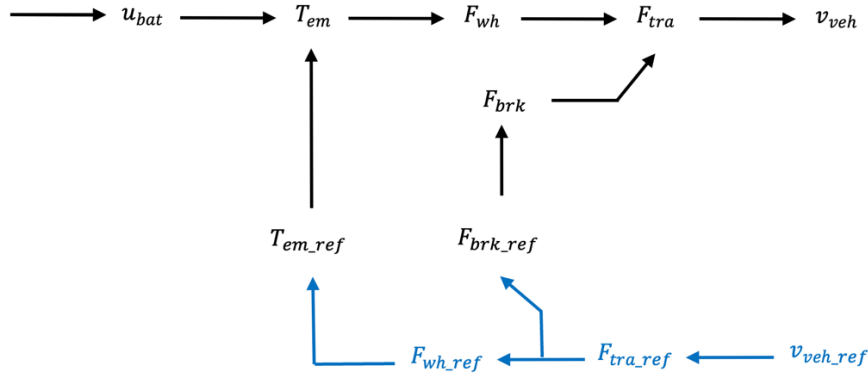


Figura 23 – Estrutura base para a inversão do Sistema de tração.

De acordo com este princípio, o primeiro bloco a ser invertido corresponde à carroçaria, por se tratar de um elemento de acumulação que exige controlo em malha fechada. Segue-se a inversão do acoplamento da travagem, e, por fim, a inversão do conjunto constituído pela roda, diferencial e caixa de velocidades.

Carroçaria

A carroçaria é o primeiro bloco da cadeia de controlo alvo de inversão, Figura 24. Uma vez que representa a dinâmica acumuladora da velocidade do veículo, para garantir que a velocidade de referência do veículo, v_{veh_ref} , acompanhe a referência desejada, recorre-se a uma estrutura de controlo em malha fechada. Nesta fase, adota-se uma formulação genérica, (7), onde a força de tração de referência é calculada com base no erro da velocidade e nas respetivas forças resistivas medidas:

$$F_{tra_ref} = C_s(t)[v_{veh_ref} - v_{veh_mes}] + F_{tot_res_mes} \quad (7)$$

Onde:

- F_{tra_ref} é a força de tração de referência para o sistema;
- $C_s(t)$ é o controlador de velocidade;
- v_{veh_ref} é a velocidade de referência do sistema;
- v_{veh_mes} é a velocidade medida;
- $F_{tot_res_mes}$ é a força resistente total medida

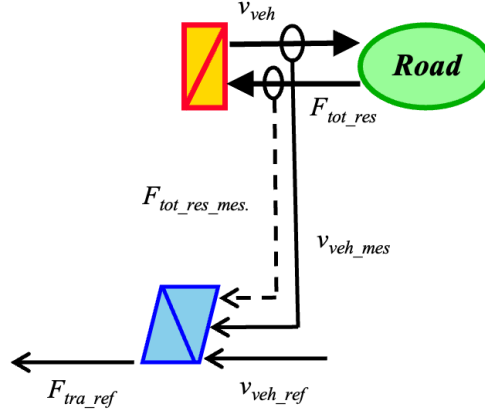


Figura 24 - Inversão do pictograma representativo da carroçaria.

Para que a força de referência do sistema seja representativa das condições reais de operação, a mesma depende da integração de dois contributos distintos. Começando a análise pelo termo que define a força de resistência medida, $F_{tot_res_mes}$, esta trata-se apenas do respetivo valor de forças resistentes medidas através do elemento que define o meio ambiente, abordado anteriormente no subcapítulo 4.2.1. Como estas forças, naturalmente, atuam no sentido de redução da velocidade do veículo, esta parcela é incluída no cálculo da força de tração de referência, uma vez que se constitui como o valor base a partir do qual o veículo deverá assegurar um esforço suficiente para compensar as perdas impostas pelo meio e pelas condições da via.

Já o termo $C_s(t)[v_{veh_ref} - v_{veh_mes}]$ corresponde à ação de controlo, que ajusta a força aplicada em função do erro de velocidade instantânea. Partindo deste pressuposto, significa que sempre que o veículo circula abaixo da velocidade desejada, esta componente aumenta proporcionalmente a força de tração, permitindo acelerar até que se atinja a referência pretendida. Analogamente, quando o veículo se encontra em regime de desaceleração, o controlador atua de forma a reduzir a força motriz, levando a uma aproximação progressiva do valor de referência. O Controlador escolhido para a velocidade é o controlador IP (Integral-Proporcional), (8)(9), o qual assegura não só uma resposta proporcional imediata, mas também a correção de erros persistentes ao longo do tempo.

$$C_s(t) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (8)$$

No domínio do tempo,

$$C_s(t)[v_{veh_ref} - v_{veh_mes}] = k_p \cdot \varepsilon(t) + k_i \cdot \int_0^t \varepsilon(t) dt \quad (9)$$

com,

$$\varepsilon(t) = v_{veh_ref}(t) - v_{veh_mes}(t)$$

A Figura 25, abaixo, apresenta o diagrama de blocos correspondente ao controlador implementado.

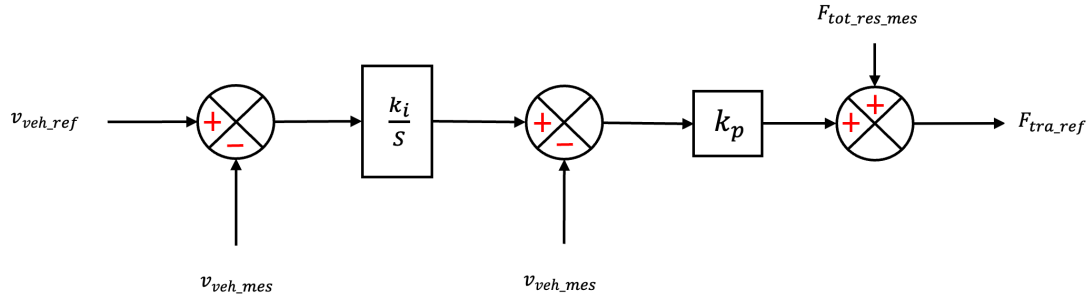


Figura 25 - Diagrama de blocos representativo do controlador Integral-Proporcional (IP) para a velocidade.

Uma vez definido o controlador, o próximo passo passa por obter a função de transferência para o sistema, Figura 26, que neste caso resultará num sistema de segunda ordem.

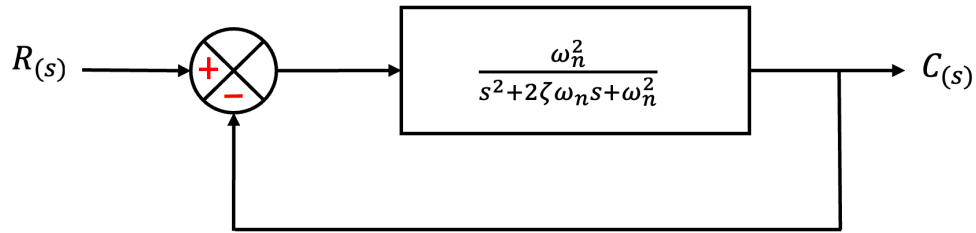


Figura 26 - Função de transferência genérica para um sistema de 2ª ordem.

Nesta função, os parâmetros mais relevantes para caracterizar a dinâmica do sistema são a frequência natural, ω_n , o coeficiente de amortecimento, ζ , e o tempo de resposta, t_r , conforme definido na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores dos parâmetros da função transferência do controlador implementado da velocidade.

Símbolo	Valor	unidade
t_r	1	[s]
ω_n	4,744	[rad/s]
ζ	1	-

Com base nesta estrutura, a expressão que define a força de tração de referência, (10), pode ser reformulada da seguinte forma:

$$F_{tra_ref}(t) = k_p \cdot \varepsilon(t) + k_i \cdot \int_0^t \varepsilon(t) dt + F_{tot_res_mes}(t) \quad (10)$$

Desta forma, a força total calculada não só assegura a correção da resposta da velocidade do veículo como também compensa as resistências físicas do movimento. A formulação apresentada constitui-se assim como a base do sistema de controlo, servindo de suporte à implementação das etapas de inversão seguintes.

Acoplamento e estratégia de travagem

A lógica de inversão do sistema de travagem, Figura 27, neste enquadramento, visa permitir a distribuição controlada da força total de referência em função do regime de operação do veículo. O parâmetro de ajuste k_{br} atua como fator de ajuste em função da estratégia definida para a travagem. Esta abordagem permite que o parâmetro atue virtualmente como um mediador que, em função da força de referência resultante, determina a proporção de energia que será regenerada pelo conjunto da bateria, e o quanto de energia será entregue para a travagem puramente mecânica. As seguintes equações, (11), expressam matematicamente a relação que existe entre as forças de referência, da travagem e das rodas, e o respetivo parâmetro.

$$\begin{cases} F_{wh_ref} = k_{br} \cdot F_{tra_ref} \\ F_{brk_ref} = (1 - k_{br}) \cdot F_{tra_ref} \end{cases} \quad (11)$$

Onde:

- F_{wh_ref} é o valor de referência da força nas rodas;
- F_{brk_ref} é o valor de referência de força de travagem;
- F_{tra_ref} é o valor de referência da força de tração;
- k_{br} é o parâmetro de ajuste da travagem;

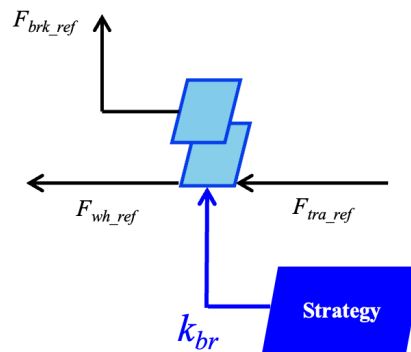


Figura 27 – Pictogramas que caracterizam o acoplamento e estratégia de travagem.

O valor de k_{br} , por si só, não permite identificar o modo de operação, ou seja, se o veículo está em regime de aceleração ou desaceleração. Portanto, sem que exista uma lógica base para o parâmetro, torna-se difícil para o sistema interpretar o contexto operacional, isto é, quando deve funcionar em modo de regeneração e vice-versa. De seguida, é apresentado o fluxograma, Figura 28, com a lógica de decisão que permite ao sistema interpretar os respetivos modos.

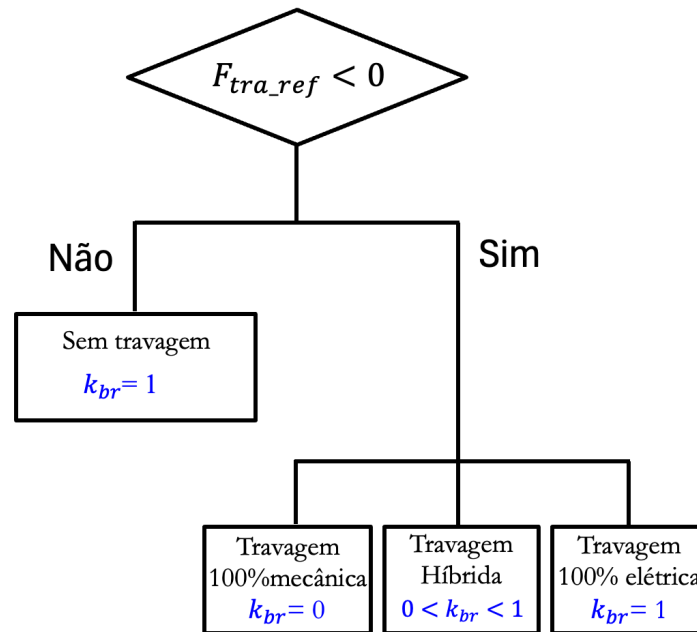


Figura 28 - Fluxograma de funcionamento da estratégia de travagem.

A estratégia implementada, que atua numa camada lógica inferior do bloco de inversão da travagem, neste estudo, depende unicamente do vetor de referência da força. Portanto, numa primeira abordagem, a lógica subjacente identifica o modo de operação através da referência do vetor força, o qual indica que o veículo se encontra em modo de tração quando a referência de força é positiva, e que está em modo de desaceleração quando a referência é negativa. Partindo desta premissa pode-se afirmar que o k_{br} assume diferentes papéis em função da referência de força. Para que se compreenda mais pormenorizadamente esta dinâmica é fulcral que se analise esta estratégia em conjunto com a equação (11). Assim, ao considerar o caso em que o veículo se encontra em regime de tração, o parâmetro por defeito assume-se com o valor 1, o qual indica ao sistema que o motor deverá produzir um binário proporcional à força de referência das rodas para que este continue em aceleração. Por outro lado, quando a força é negativa, o parâmetro de ajuste, conforme o valor estipulado, define a proporção de força que é atribuída à travagem convencional, que atua diretamente no bloco de travagem e resulta numa energia que é dissipada, e, também a proporção de força negativa que permite à máquina elétrica o seu funcionamento como gerador, ao mudar o quadrante de operação, e com isto produzir uma corrente negativa no sistema que é absorvida pelo conjunto da bateria.

Inversão do sistema de transmissão

Por fim, o último elemento da estrutura de inversão do sistema de tração é a cadeia de transmissão, Figura 29, responsável por converter a referência de força das rodas, F_{wh_ref} , proveniente do bloco de travagem, no binário de referência que o motor elétrico deverá desenvolver, (12). Esta conversão é realizada com base na geometria da roda e no parâmetro de transmissão equivalente, conforme definido anteriormente.

$$T_{em_ref} = F_{wh_ref} \frac{R_{wheel}}{K_{gear}} \quad (12)$$

Onde:

- T_{em_ref} é o binário de referência do motor;
- F_{wh_ref} é a força de referência de tração das rodas
- R_{wheel} é o raio da roda do veículo;
- K_{gear} é o valor da relação de transmissão;

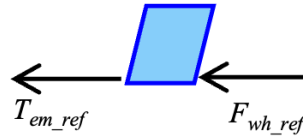


Figura 29 - Inversão do bloco de transmissão.

Estando estabelecida toda a dinâmica do sistema, a Figura 30 apresenta a estrutura completa do modelo REM em estudo, incluindo tanto o sistema direto como a respetiva estrutura de controlo obtida por inversão. Esta representação permite visualizar de forma integrada, os fluxos de energia e as relações de controlo estabelecidas entre os subsistemas que compõem a referida modelação. Este modelo, constitui-se como a base sólida para o desenvolvimento do restante estudo.

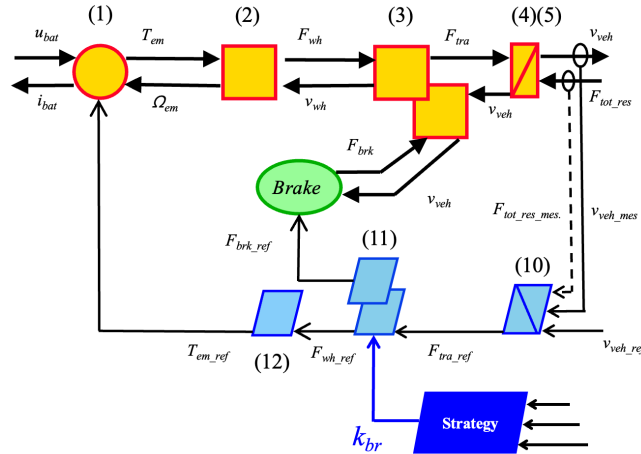


Figura 30 – Representação REM de todo sistema de tração e a respetiva inversão.

4.2.3 Modelação do Sistema da Bateria

Com o objetivo de completar a modelação global do sistema, este subcapítulo dedica-se ao desenvolvimento do sistema de armazenamento de energia, concretamente da estrutura da bateria, através do modelo da célula. Com isto, e de uma forma simples, é considerada a estrutura REM representada na Figura 31(c), onde todo o sistema de tração é agrupado e representado como uma fonte de energia equivalente, para que o foco da análise seja respetivamente direcionada para o comportamento e dinâmica da bateria. Através da observação mais detalhada deste subsistema, é possível identificar uma estrutura interna mais complexa. Assim, a presente abordagem, na sua base, consiste na construção do modelo da bateria, por intermédio do modelo da célula, a qual, estruturalmente foi concebida com recurso a dados experimentais de uma célula de lítio LiFePO_4 (Lítio Fosfato de Ferro).

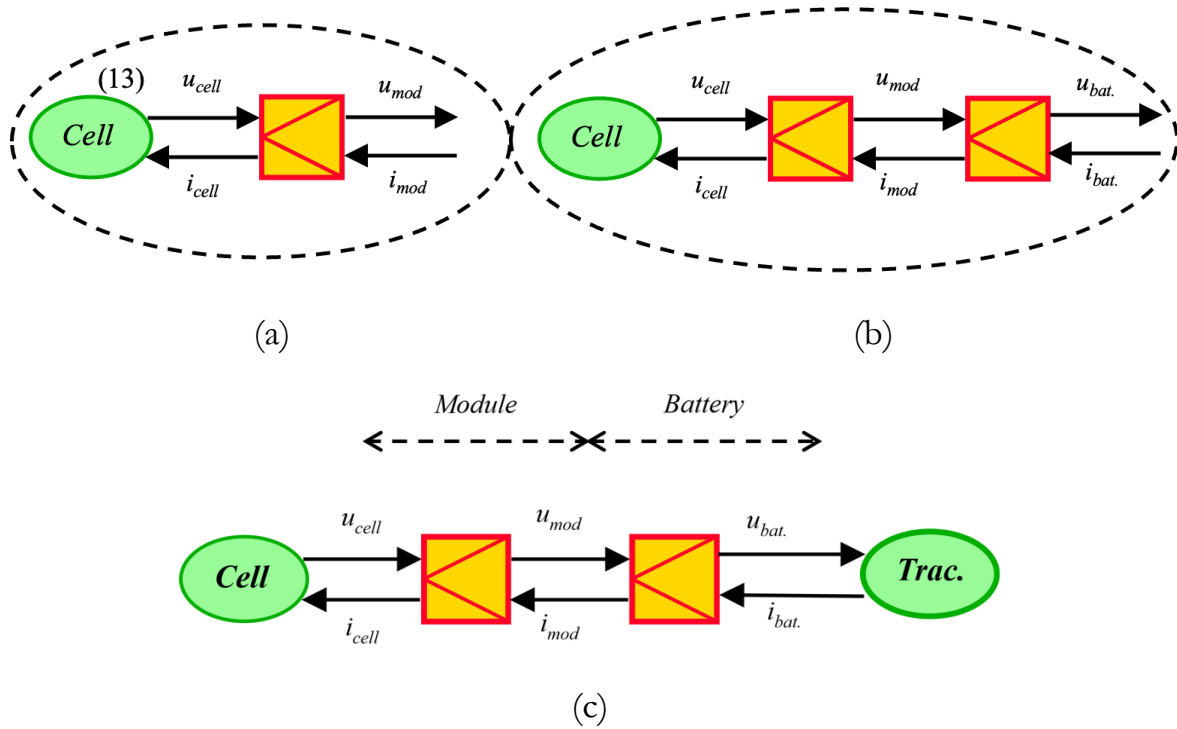


Figura 31 – Representação REM da célula convertida para módulos (a), para a bateria (b), e com a integração da bateria no sistema de tração(c).

Para representar a estrutura da bateria desde a base da célula e a respetiva configuração, recorreu-se a pictogramas de adaptação de potência, também ilustrado na Figura 31, para representar a disposição das células ligadas em paralelo (a), e posteriormente dos módulos em série (b), constituído assim a arquitetura global da bateria do veículo. Antes de proceder à modelação da bateria em detalhe, na Tabela 6 apresentam-se os parâmetros técnicos do fabricante da célula, e a respetiva configuração adotada, Tabela 7, que cumpre com as especificações elétricas da bateria, tensão e capacidade, indicadas pelo fornecedor do autocarro.

Tabela 6 – Características das células da bateria em estudo.

Battery pack, 358,4V 120Ah@1C LFP48H4G6 Chemistry			
Variável	Símbolo	Valor	Unidade
Tensão nominal da célula	u_{cell}	3,2	[V]
Limites de tensão da Célula	$u_{cell_{max,min}}$	[3,65; 2,5]	[V]
Capacidade da Célula	C_{cell}	1800	[mAh]
Resistência interna	R_0	14	[mΩ]

Tabela 7 - Configuração série-paralelo das células para a construção da bateria.

Nº de células em série	112
Nº de células em paralelo	68
Configuração das células (s_xp)	112x68

Passando à análise do modelo da célula, neste estudo adotou-se a sua representação estrutural com base no modelo clássico do circuito equivalente de primeira ordem. Este circuito em termos elétricos é composto por uma resistência em série com um ramo paralelo RC. Desta forma é possível representar tanto a resistência interna da célula como a própria resposta dinâmica, face às solicitações impostas pelo sistema de tração. Na Figura 32, ilustra-se a representação do circuito elétrico equivalente da célula.

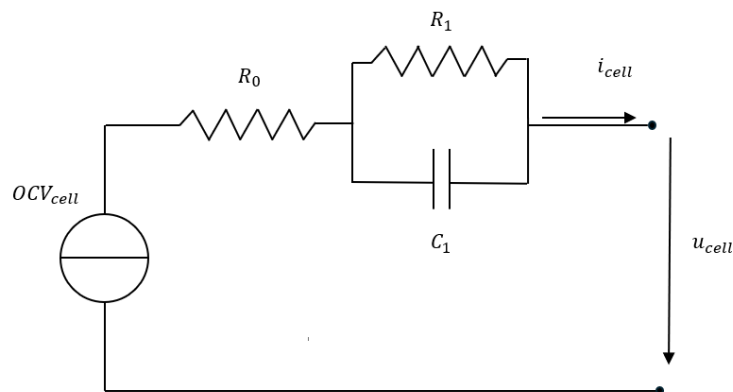


Figura 32 – Representação elétrica do modelo equivalente da célula

Seguindo a análise do esquema apresentado, é assim possível determinar as equações que regem o comportamento elétrico da célula, (13). Estas expressões permitem descrever a resposta dinâmica da tensão da célula e a evolução do estado de carga em função da corrente imposta, isto é, pela variação de carga do sistema de tração.

$$\begin{cases} u_{cell} = OCV_{cell}(SoC) - R_0 i_{cell} - u_{RC} \\ SoC = 100\% \left(1 - \frac{1}{3600 C_{cell}} \int i_{cell} dt \right) \end{cases} \quad (13)$$

Onde:

- OCV_{cell} a tensão de circuito aberto da célula
- SoC o estado de carga da célula, do inglês “*State of Charge*”
- R_0 a resistência interna da célula
- i_{cell} a corrente da célula
- u_{RC} a tensão no ramo paralelo RC

Ainda, a tensão no ramo paralelo e a respetiva corrente são descritas através das equações (14) e (15), abaixo:

$$u_{RC} = \frac{1}{C_1} \int i_{C1} dt, \text{ e } i_{C1} = i_{cell} - i_{R1} \quad (14)$$

Com,

$$i_{R1} = \frac{u_{RC}}{R_1} \quad (15)$$

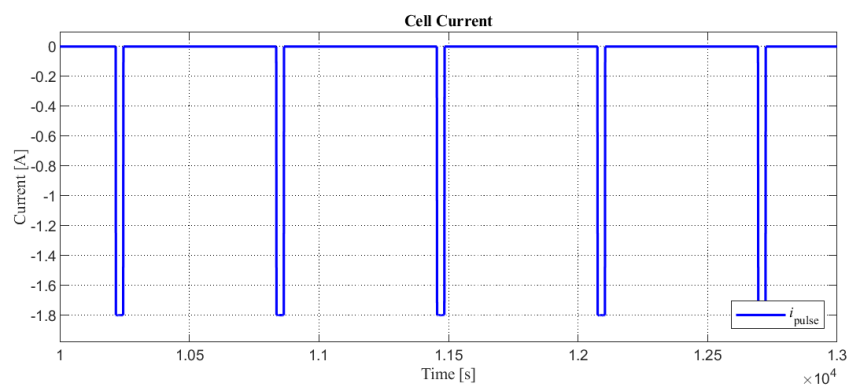
Onde R_1 e C_1 , a resistência e capacitância do ramo paralelo do circuito de primeira ordem [73], [74].

Tratando-se de um modelo intrinsecamente dinâmico, todas as variáveis expressas anteriormente são alvo de variações contínuas ao longo de todo o perfil de descarga da célula. Deste modo, e consequentemente motivado pelas próprias características eletroquímicas do sistema, tornou-se necessário representar esta variabilidade, com o maior grau de detalhe possível, de forma a garantir uma resposta realista e eficaz do modelo. Para isso, internamente no modelo REM da célula, a estrutura que suporta a variabilidade dos parâmetros é estabelecida através de tabelas dinâmicas de uma dimensão (1-D *lookup tables*). Estas tabelas unidimensionais ajustam as respetivas grandezas envolvidas, tal como o OCV_{cell} , a resistência interna R_0 , e a resistência e capacitância do ramo paralelo (R_1 e C_1), instantaneamente para o valor correspondente ao estado de carga atual da célula.

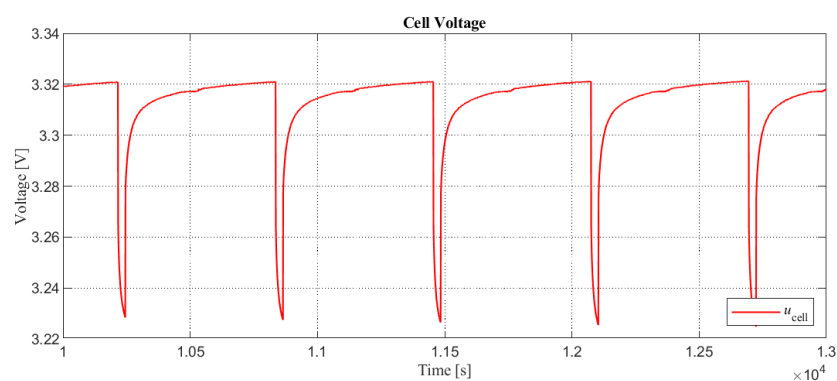
Na literatura sobre modelação de células, diversos métodos são propostos para determinar parâmetros internos da célula e a construção das tabelas de dados. Com o principal objetivo de representar com precisão o comportamento das células, entre os mais comuns e o modelo empregue neste trabalho, destacam-se os modelos de circuito elétrico equivalente (ECM), nomeadamente os de ordem integral, amplamente utilizados nas áreas científicas de engenharia [73]. Estes são tipicamente usados pela sua versatilidade e pela sua característica simples de representar os

sistemas através de elementos elétricos simples como resistências e capacitâncias, que variam em função do estado de carga e da temperatura, evitando assim modelos físicos e matemáticos complexos que caracterizam integralmente o comportamento eletroquímico da célula. De forma complementar aos modelos equivalentes, e para a identificação precisa destes parâmetros, são empregues técnicas experimentais em ambientes controlados que envolvem a aplicação de pulsos de corrente seguido da monitorização da resposta da tensão da célula. Entre estas, destaca-se a técnica GITT, do inglês *Galvanostatic intermittent titration*, que consiste na aplicação de uma corrente constante durante um determinado intervalo de tempo, seguida por um período de repouso para a estabilização da tensão. Este procedimento é repetido sucessivamente para diferentes níveis de estado de carga e temperatura. Desta forma é possível captar os dados que caracterizam a dinâmica da célula de maneira precisa.

Com base nos dados experimentais obtidos através do GITT, e do estudo de LeBel et al. [73], foram determinados os parâmetros e construídas as tabelas dinâmicas que descrevem a variação dos parâmetros elétricos em função do estado de carga. Na Figura 33(a) e (b), abaixo, é possível observar trechos do ensaio GITT efetuado à célula para a obtenção dos referidos dados.



(a)



(b)

Figura 33 – Técnica GITT para obtenção dos parâmetros elétricos da célula. (a) pulsos de corrente; (b) resposta de tensão da célula

Após o GITT e o respetivo tratamento dos dados, foram então construídas as tabelas. Nesse sentido, apresentam-se os gráficos que ilustram a forma como as variáveis se relacionam com o estado de carga, isto é, como os principais parâmetros do modelo variam em função do SoC, Figura 34.

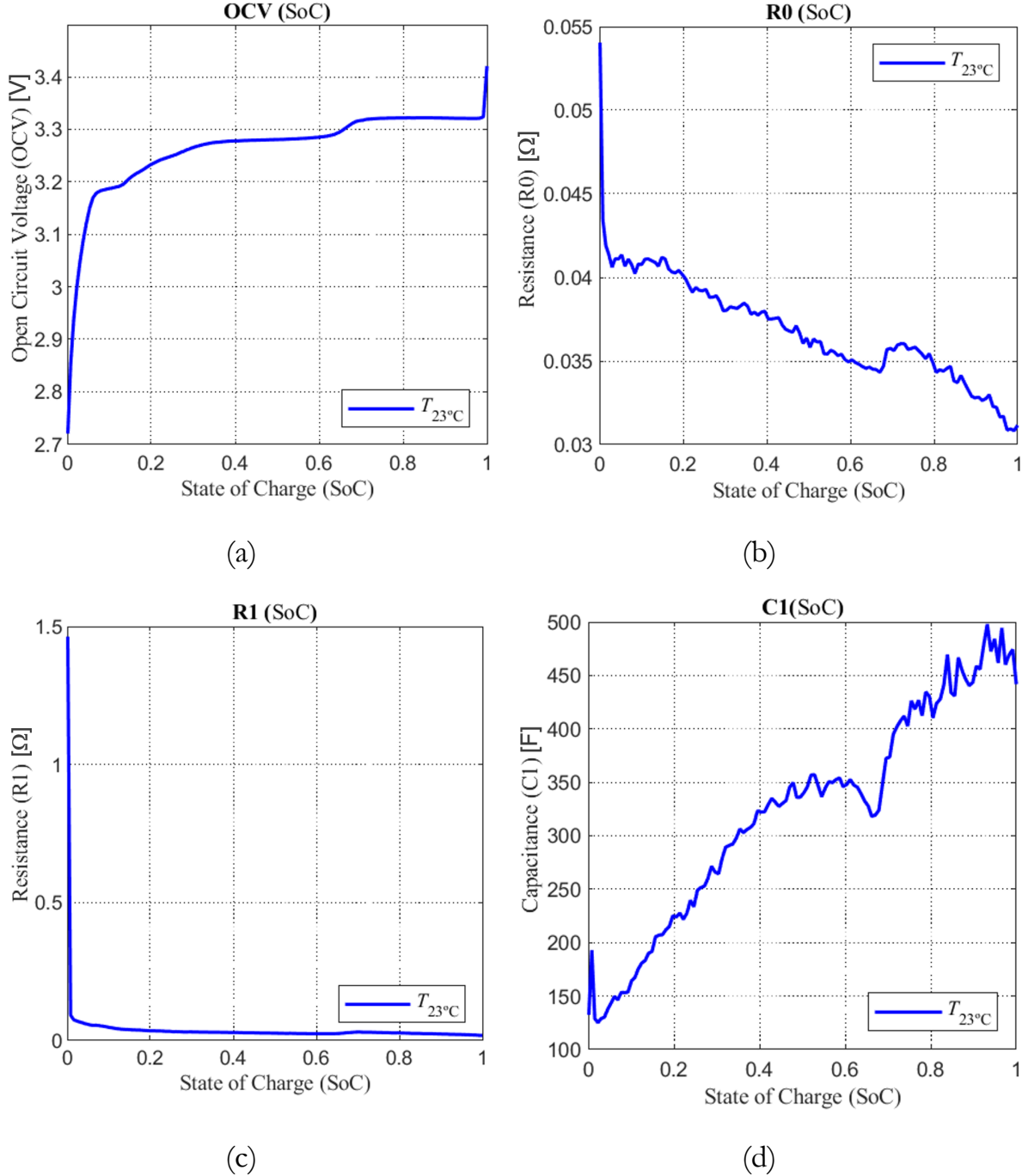


Figura 34 – (a) Variação da tensão de circuito aberto em função do SoC; (b) Variação da resistência interna em função do SoC; (c) Variação da resistência do ramo paralelo em função do SoC; (d) Variação da capacitância do ramo paralelo em função do SoC.

Os dados obtidos para as tabelas foram considerados para uma temperatura constante de 23°C. Significa isto, que o modelo assume que a bateria é refrigerada o que se traduz numa operação a temperaturas devidamente controladas. Esta simplificação permite tornar o modelo menos denso e computacionalmente mais eficiente, assegurando na mesma a sua fiabilidade. Numa outra perspetiva, incluindo diferentes faixas de temperatura, o modelo tornar-se-ia complexo ao ponto de dispor de tabelas dinâmicas mais pesadas, e inerentemente, o modelo teria de integrar no sistema da célula os efeitos termodinâmicos e como estes influenciam os parâmetros elétricos e o desempenho geral.

Por questões de simplicidade e foco no objetivo principal, optou-se por não contabilizar estas variações térmicas. Assim, o modelo mantém-se mais simples e prático para simulações dentro das condições estabelecidas, sem deixar de ser útil para analisar o comportamento da bateria em situações normais de operação.

4.2.4 Implementação em ambiente Simulink

Nesta secção, é apresentada a implementação do modelo desenvolvido em ambiente de simulação, como mencionado anteriormente, com recurso ao Simulink e às bibliotecas dos pictogramas REM, disponíveis no website da Universidade de Lille [67]. Esta ferramenta permite integrar todos os subsistemas modelados, desde o sistema de propulsão, Figura 35, até à bateria, Figura 36, numa estrutura funcional, possibilitando a análise do comportamento global do veículo.

Sistema de propulsão

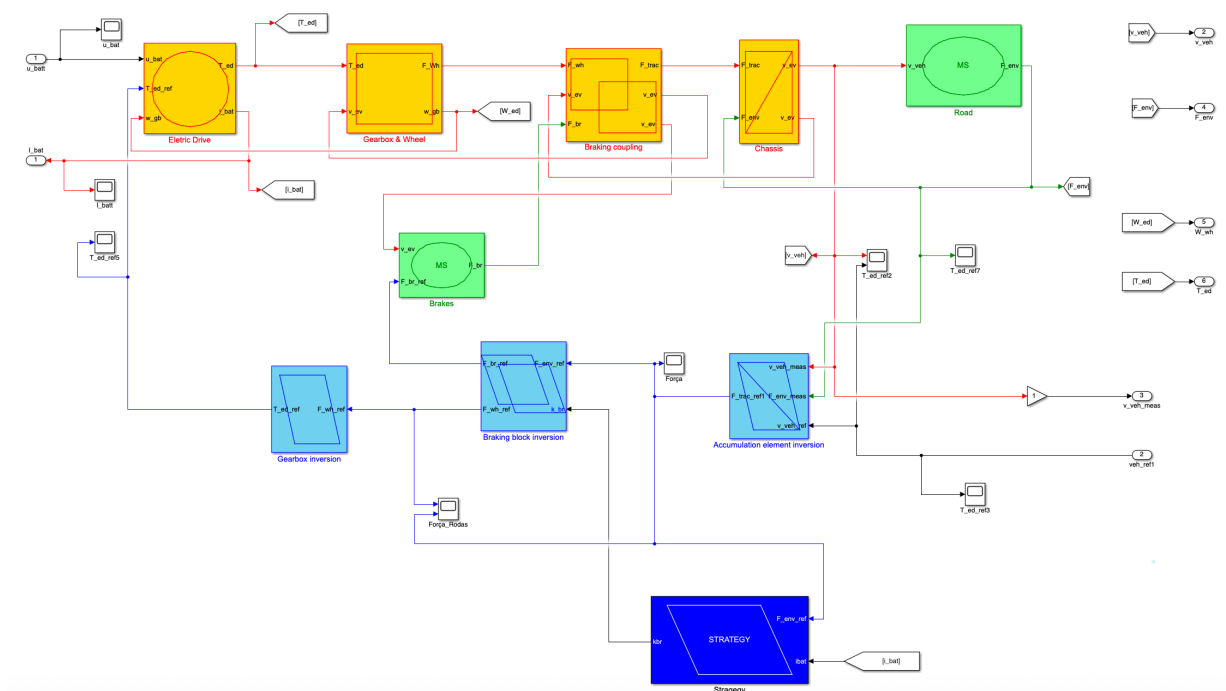


Figura 35 – Modelo REM do Sistema de propulsão construído no Simulink.

Na Figura 35 é possível analisar a estrutura implementada em ambiente de simulação, onde são visíveis todos os elementos que compõem o modelo de propulsão. Cada subsistema do modelo, internamente, tem implementado as respectivas equações definidas que regem o seu funcionamento, conforme apresentado no capítulo anterior.

Sistema da bateria

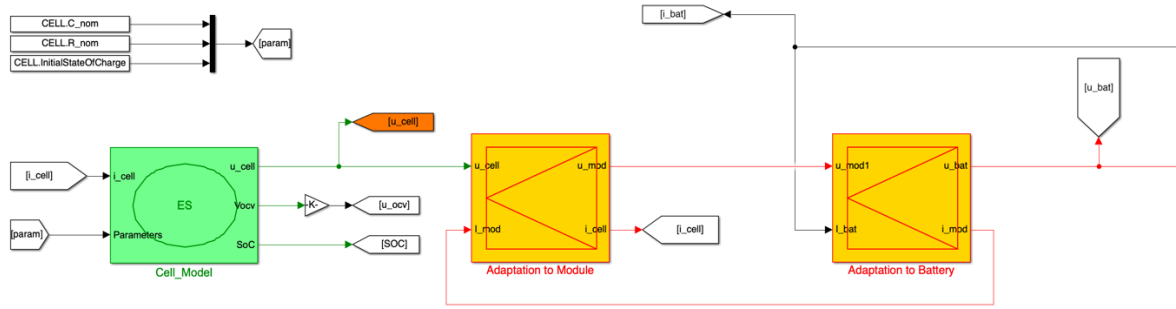


Figura 36 – Modelo REM do Sistema implementado da célula à bateria.

De forma análoga ao modelo de propulsão, acima, na Figura 36 é apresentada a estrutura da bateria cujo funcionamento se rege de acordo com as equações definidas no capítulo 4.2.3. Dentro do modelo da célula, conforme definido, foram incorporadas as tabelas dinâmicas que mediante a referência do estado de carga da bateria, modelam as características internas da célula. Esta implementação é visível internamente no pictograma da célula, e abaixo, na Figura 37 transpõe-se a respectiva arquitetura.

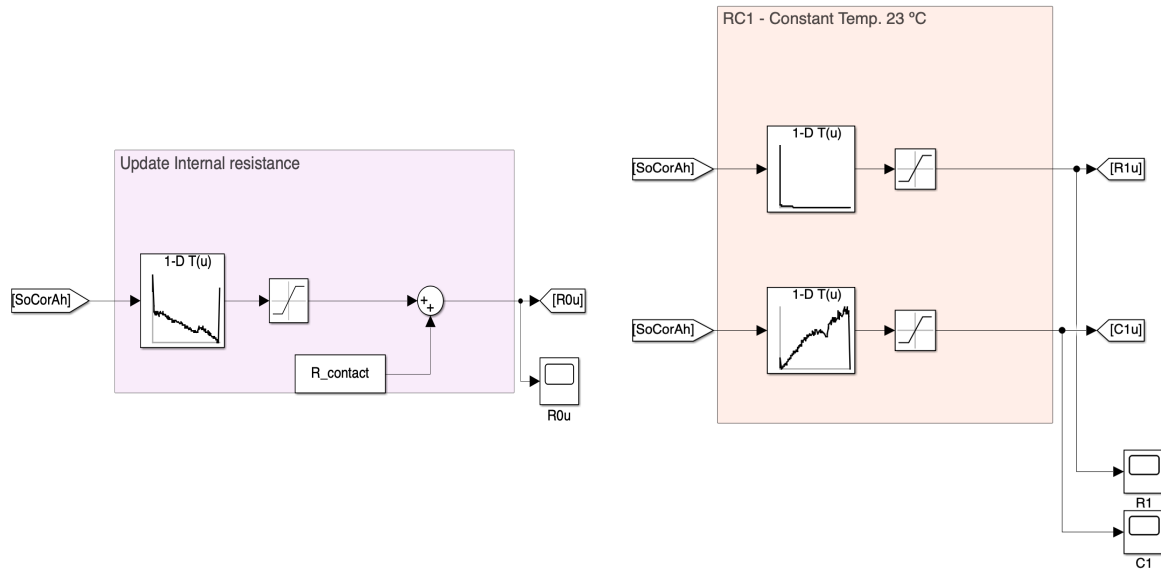


Figura 37 - Tabelas dinâmicas dos parâmetros da célula.

4.2.5 Testes e Ensaios

Os testes do modelo consistiram essencialmente em aplicar um conjunto de ciclos de condução com o objetivo de extrair os principais perfis do comportamento dinâmico do motor e da célula. Para isto, aplicou-se inicialmente o ciclo normalizado NEDC, do inglês *New European Driving Cycle*, e o ciclo WLTP, do inglês *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure*. É importante frisar que cada um dos ciclos foi ajustado para as características do autocarro em estudo, na medida em que foi definida a velocidade máxima do ciclo para uma velocidade adequada à envolvimento do respetivo veículo. Com isto, para o ciclo NEDC definiu-se a velocidade máxima para 40 km/h, de forma que o ciclo representasse uma rota do veículo por zonas puramente urbanas, e para o ciclo WLTP a velocidade definida foi de 65 km/h, que representa ciclos urbanos a velocidade média reduzida em conjunto com períodos extraurbanos.

- Ciclo NEDC

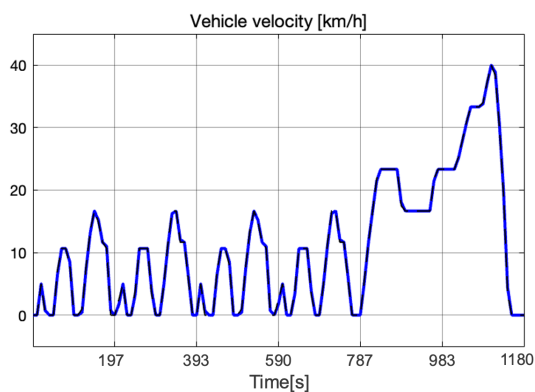


Figura 38 - Perfil de velocidade do ciclo NEDC.

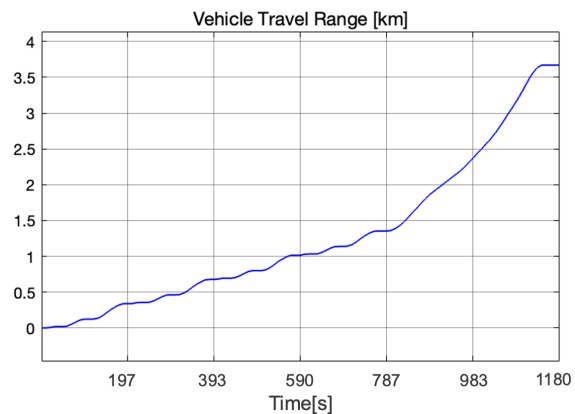


Figura 39 – Distância percorrida pelo ciclo de condução NEDC.

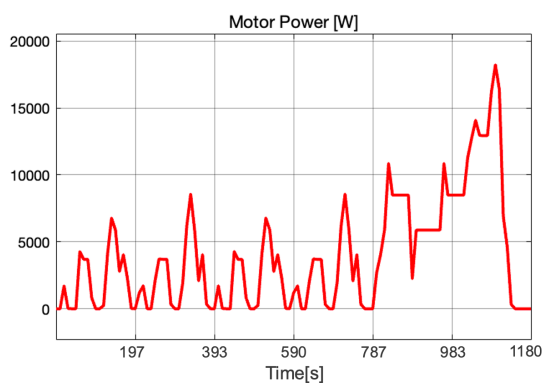


Figura 40 – Perfil da potência desenvolvida pelo motor no ciclo NEDC.

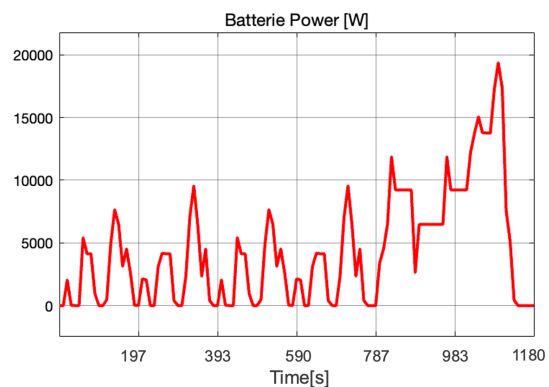


Figura 41 - Perfil da potência desenvolvida pela bateria no ciclo NEDC.

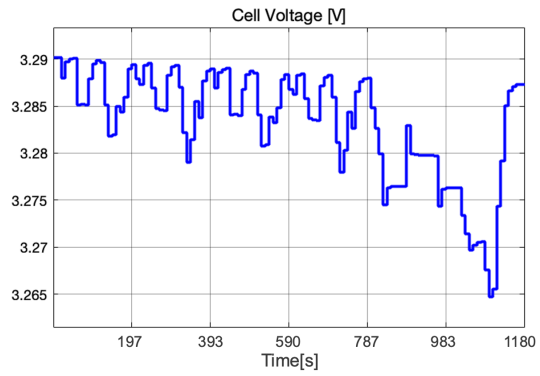


Figura 42 – Perfil de tensão na célula no ciclo NEDC.

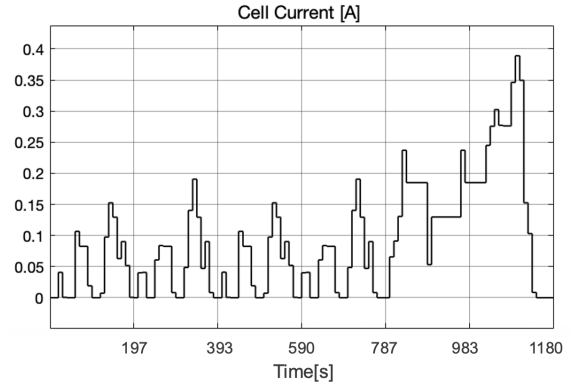


Figura 43 – Perfil de Corrente da célula no ciclo NEDC.

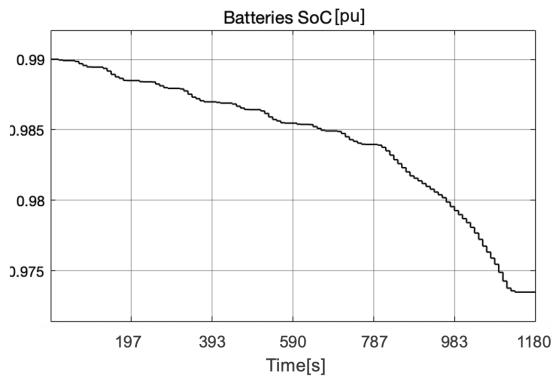


Figura 44 – Estado de carga da bateria no ciclo NEDC.

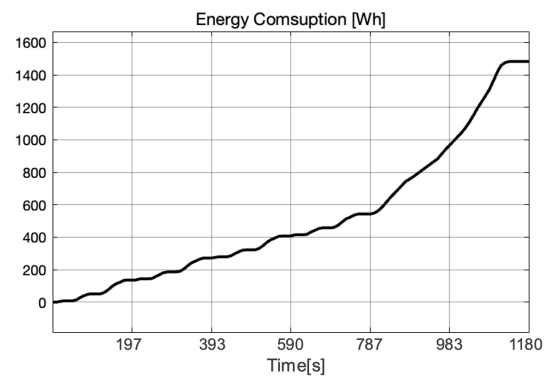


Figura 45 – Consumo de energia total do ciclo NEDC.

Estudo do envelhecimento de baterias de lítio em autocarros elétricos urbanos baseado na representação energética macroscópica

Após o teste de um ciclo de condução segue-se com o teste de repetição do ciclo para uma abordagem mais geral ao comportamento do veículo. Para isto estipulou-se que o autocarro inicia as rotas com as baterias carregadas, isto é, com um estado de carga, SoC de 99%, até atingir os 10% de carga.

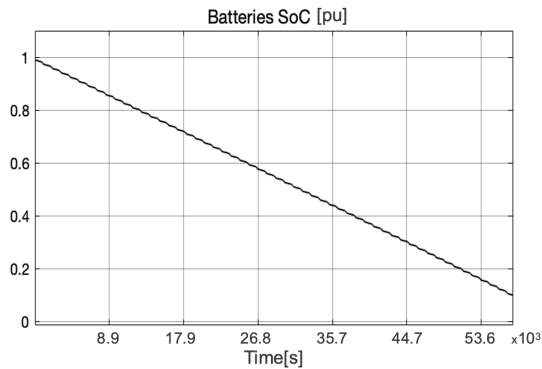


Figura 46 – Perfil do estado de carga da repetição cíclica do NEDC.

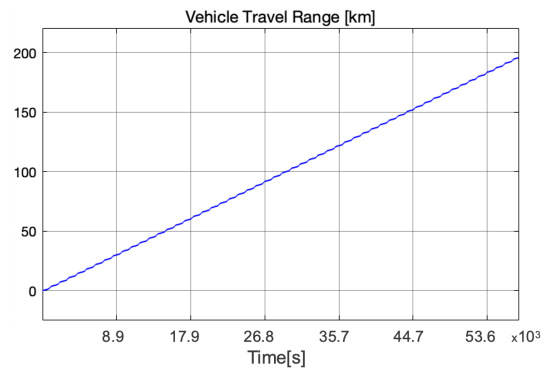


Figura 47 – Distância total percorrida pelo veículo.

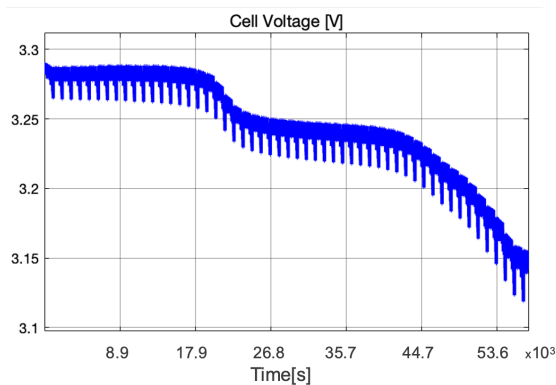


Figura 48 - Perfil de tensão da célula para a repetição cíclica do NEDC.

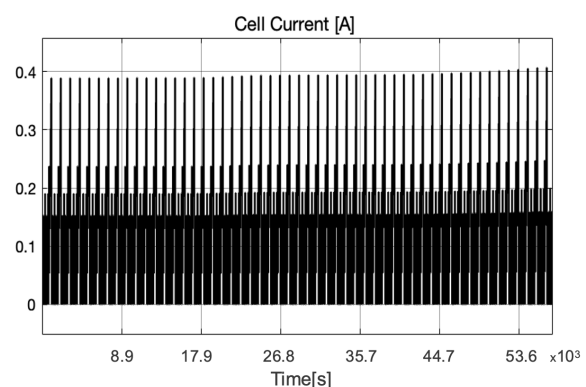


Figura 49 – Perfil da Corrente na célula para a repetição cíclica do NEDC.

- Ciclo WLTP

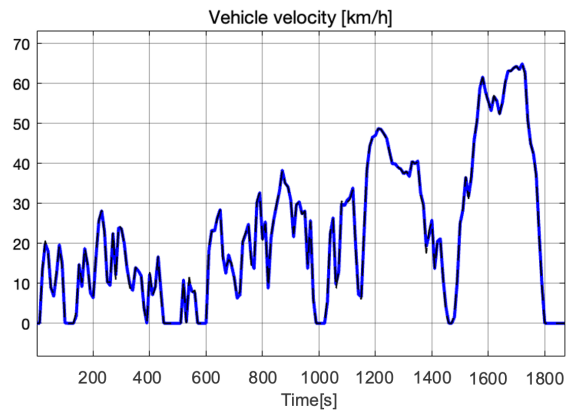


Figura 50 - Perfil de velocidade do ciclo WLTP.

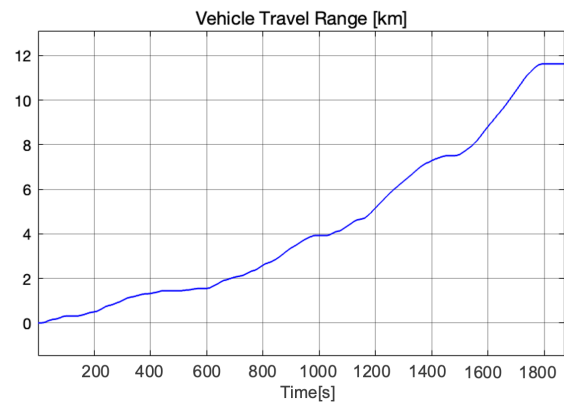


Figura 51 - Distância percorrida pelo ciclo de condução WLTP.

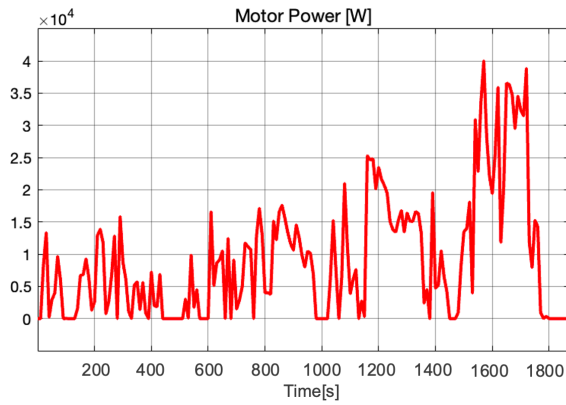


Figura 52 - Perfil da potência desenvolvida pelo motor no ciclo WLTP.

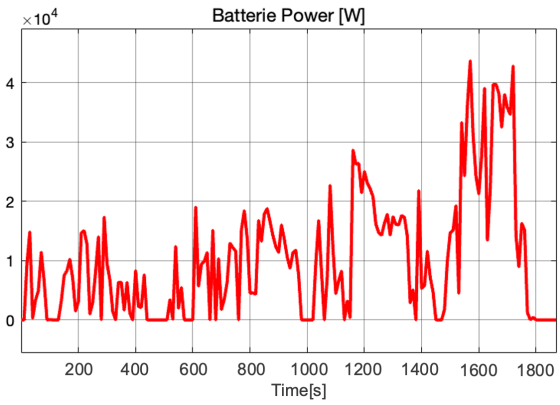


Figura 53 - Perfil da potência desenvolvida pela bateria no ciclo WLTP.

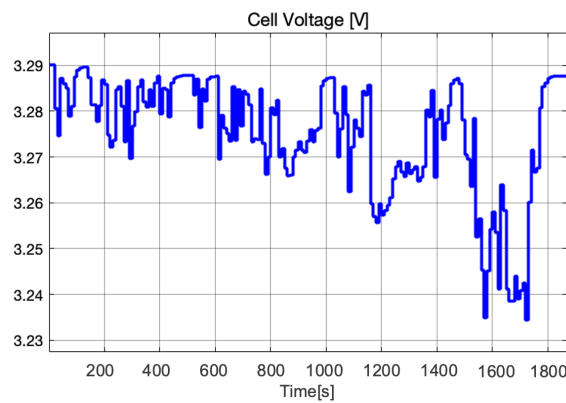


Figura 54 - Perfil de tensão na célula no ciclo WLTP.

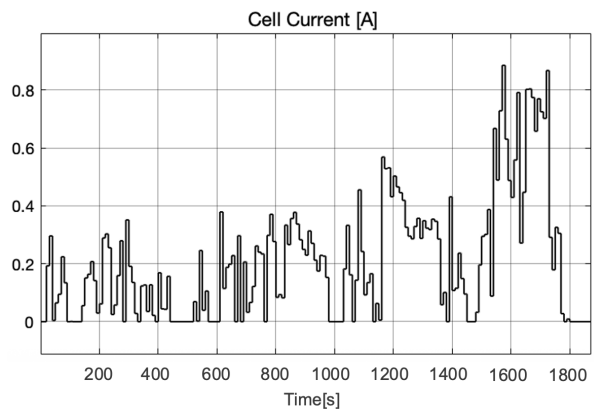


Figura 55 - Perfil de corrente da célula no ciclo NEDC.

Estudo do envelhecimento de baterias de lítio em autocarros elétricos urbanos baseado na representação energética macroscópica

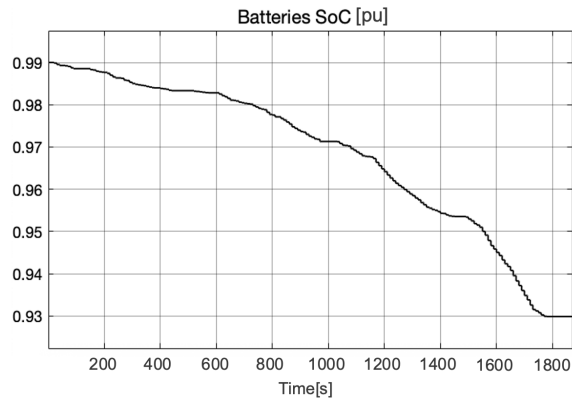


Figura 56 - Estado de carga da bateria no ciclo WLTP.

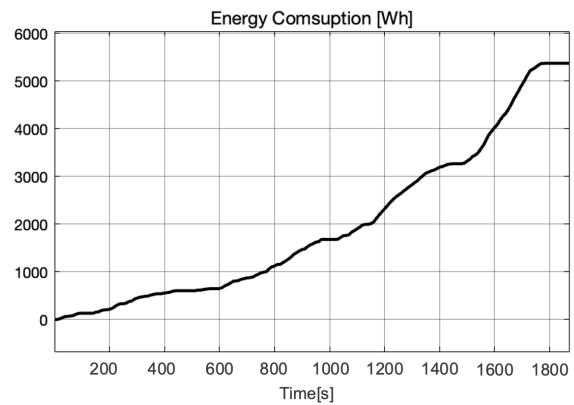


Figura 57 - Consumo de energia total do ciclo WLTP.

Da mesma forma, foi executado o ensaio do ciclo para uma descarga da bateria para o intervalo de 99% até 10% de SoC. Abaixo ilustram-se os resultados obtidos.

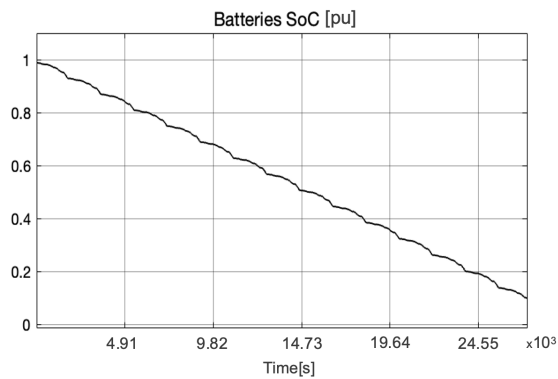


Figura 58 - Perfil do estado de carga da repetição cíclica do WLTP.

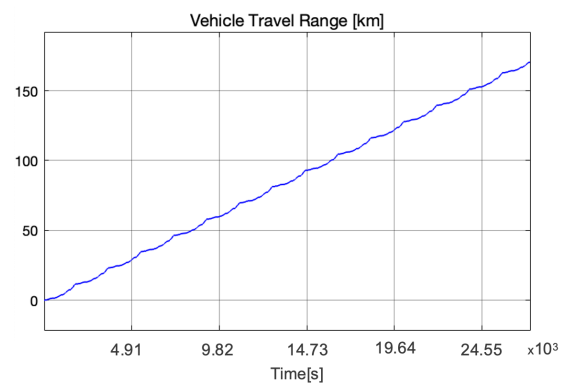


Figura 59 - Distância total percorrida pelo veículo.

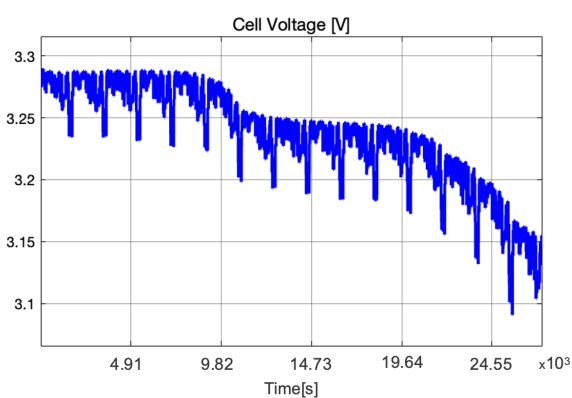


Figura 60 - Perfil de tensão da célula para a repetição cíclica do WLTP.

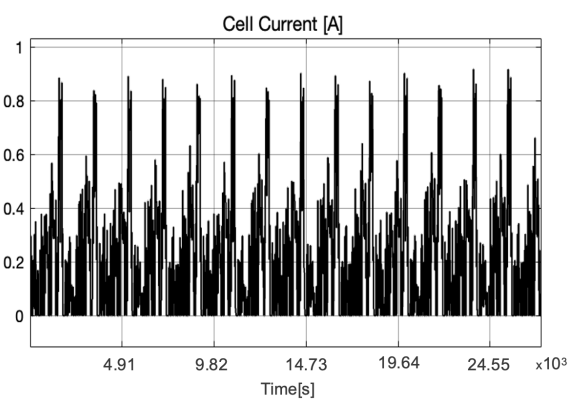


Figura 61 - Perfil de corrente da célula para a repetição cíclica do WLTP.

As imagens anteriormente apresentadas para o ciclo WLTP apresentam a evolução das respectivas variáveis sem qualquer tipo de travagem regenerativa, isto é, a travagem que vigora nos ciclos é mecânica. De forma a visualizar também o efeito da consideração da travagem regenerativa, as seguintes imagens apresentam os resultados obtidos, considerando uma regeneração de 50% e 100%, respetivamente, para efeitos de análise dos ciclos.

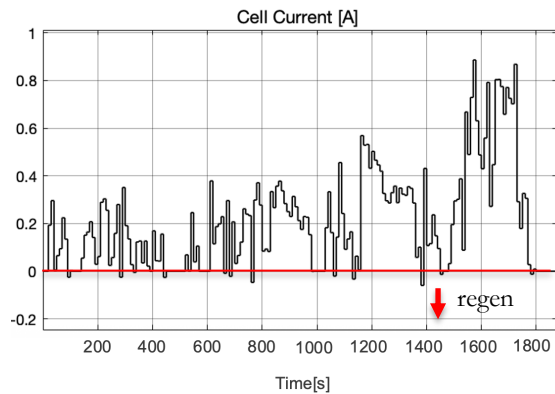


Figura 62 - Corrente do ciclo WLTP para uma travagem híbrida de 50%.

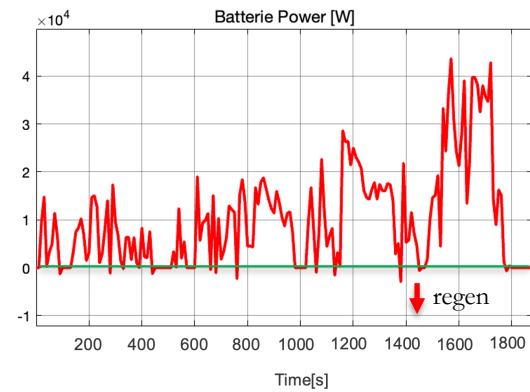


Figura 63 - Potência da bateria do ciclo WLTP para uma travagem híbrida de 50%.

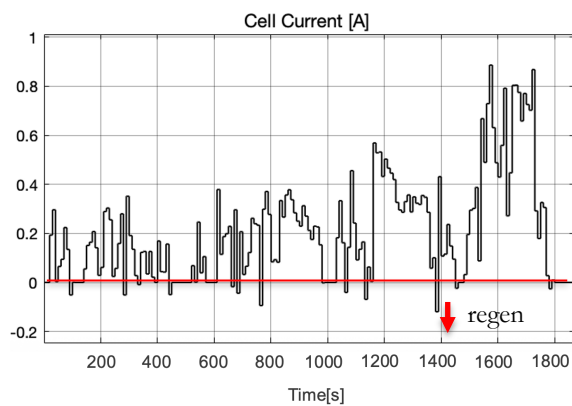


Figura 64 - Perfil de corrente do ciclo WLTP para uma travagem regenerativa de 100%.

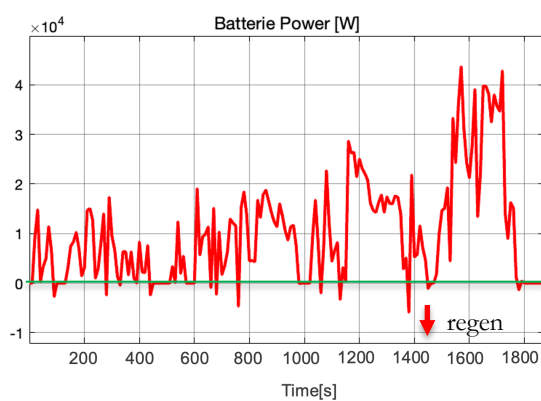


Figura 65 - Perfil de potência da bateria do ciclo WLTP para uma travagem regenerativa de 100%.

No seguimento da análise dos ciclos com a aplicação da travagem regenerativa, abaixo na Tabela 8, encontra-se em pormenor os ganhos obtidos, expressos em termos de quilómetros recuperados.

Tabela 8 - Resumo dos resultados da travagem regenerativa aplicada aos ciclos de condução.

Ciclo	Tipo travagem	Valor	Recuperação
NEDC	Mecânica	195,6 [km]	-
	Híbrida 50%/50%	195,7 [km]	0,1 [km]
	Elétrica 100%	195,8 [km]	0,2 [km]
WLTP	Mecânica	170,4 [km]	-
	Híbrida 50%/50%	171,6 [km]	1,2 [km]
	Elétrica 100%	172,9[km]	1,3 [km]

É importante salientar que os resultados obtidos advêm dos ciclos NEDC e WLTP, ajustados proporcionalmente às características do autocarro em estudo, uma vez que os perfis originais excedem a velocidade máxima de 70 km/h, conforme estipulado pelo fabricante [70].

4.2.6 Validação do modelo

De forma a assegurar que a estrutura REM construída representasse uma boa aproximação do modelo real, prosseguiu-se com a respetiva validação dos resultados, para garantir a robustez da análise. Partindo dos dados de velocidade e binário reais, estes, serviram como base para a confirmação da precisão do modelo da tração ao serem comparados com os resultados extraídos da simulação. Neste teste as variações de declive e inclinação foram excluídas da simulação devido à dificuldade de aquisição dos respetivos dados, pelo que, optou-se por comparar os resultados de parte de um percurso, na zona de Coimbra, próxima do rio Mondego, que apresenta um perfil orográfico praticamente plano. Posto isto, foi então possível correr o modelo, cujos resultados se apresentam na Figura 66 [71].

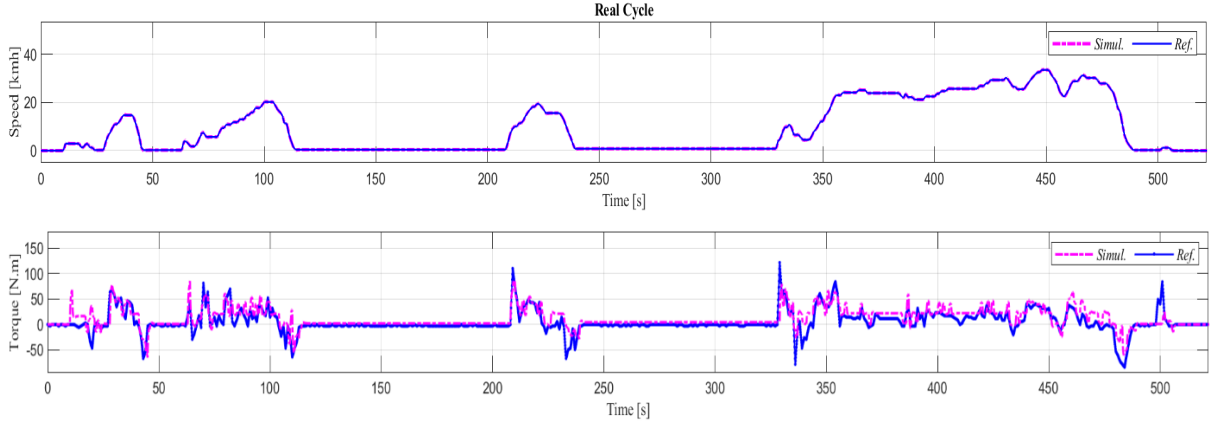


Figura 66 - Perfil de velocidade e binário do modelo com base em dados reais e simulados.

Após os resultados extraídos, e de maneira que fosse possível identificar a precisão das simulações, recorreu-se à expressão discriminada pela equação (16) para a comparação dos dados reais e simulados através do erro relativo entre os respetivos dados.

$$\varepsilon = \frac{\int_0^{T_{cyc}} |x - x_{ref}| dt}{\int_0^{T_{cyc}} |x| dt} \quad (16)$$

Genericamente, x pode representar uma qualquer variável da qual se pretenda extrair o erro ε , podendo representar um valor de tensão, corrente, ou como neste caso em concreto, o binário do motor.

O erro relativo do ciclo, calculado através da fórmula, é de cerca de 1,65%. Este valor corresponde a uma diferença relativa, entre os dados reais e simulados, de aproximadamente 4,78 N.m. É importante notar que não foram consideradas as respetivas irregularidades do pavimento, aliado ao conjunto de simplificações que têm vindo a ser identificadas ao longo do estudo, que apesar de serem diminutas, implicam sempre pequenas discrepâncias entre os resultados reais e simulados das curvas. Contudo, o nível de precisão resultante, satisfaz as exigências de muitas aplicações reais para efeitos de análises e estudos ao nível do sistema energético. Embora ainda exista margem para melhorias no modelo, o erro obtido foi considerado suficientemente aceitável para permitir a continuação do presente trabalho. No capítulo seguinte, será introduzido o tema principal do estudo, onde é abordado o impacto da travagem regenerativa na vida útil das baterias e, consequentemente, do autocarro, através da aplicação do algoritmo RainFlow para a quantificação da fadiga cíclica associada aos ciclos de carga e descarga resultantes das rotas diárias de operação.

5 RAINFLOW, ALGORITMO PARA CONTAGEM DE CICLOS

No presente capítulo, é apresentado o algoritmo Rainflow, que se constitui como uma técnica amplamente utilizada para a contagem de ciclos dinâmicos, como por exemplo, de carga e descarga de uma bateria. Este método é essencial para a análise e quantificação da fadiga induzida pelas respetivas variações dinâmicas de carga, que neste estudo concreto se mostra relevante para a análise dos efeitos que a travagem regenerativa induz no envelhecimento das células da bateria. A compreensão detalhada dos ciclos e o respetivo impacto, é fundamental para estimar a vida útil do sistema, e através dos resultados obtidos possibilitar o desenvolvimento de estudos de otimização e gestão energética do sistema alvo.

5.1 Introdução

A vida útil de um determinado sistema é um fator crítico e decisivo quando se pretende adquirir o máximo de longevidade. No mundo dos sistemas de armazenamento, concretamente das baterias de lítio, a duração estimada e os ciclos de carga e descarga que a mesma consegue desenvolver ao longo da vida útil de operação, são imprescindíveis. No entanto, num enquadramento real onde todo um conjunto de variáveis influenciam direta ou indiretamente toda a cadeia comportamental, técnicas e meios auxiliares são necessários para identificar as tendências e padrões que afetam o sistema. Numa visão holística de um sistema de transporte urbano, tendências e padrões dependem sobretudo de percursos diários de operação bem definidos, que apesar de revelarem uma complexidade significativa, também possibilitam estimar e correlacionar comportamentos e variáveis relevantes ao longo do tempo. De forma a traduzir alguns destes padrões, de seguida apresenta-se a metodologia adotada neste estudo para posterior análise da travagem regenerativa, e na forma como esta impacta, ao longo do tempo, conjuntos cíclicos de operação.

5.2 Metodologia

A metodologia empregue para a análise cíclica da degradação da bateria do veículo em estudo, tem por base o modelo desenvolvido em Simulink e a informação dinâmica extraída dos ciclos de condução. Para isto, foram considerados os perfis de SoC associados à utilização real do veículo, e, de seguida aplicada a técnica semiempírica RainFlow. Esta abordagem algorítmica, fundamentada nos perfis de condução, permite identificar a frequência e profundidade de cada evento carga-descarga do perfil de utilização, quantificando-os e classificando-os segundo o respetivo impacto no desgaste total da bateria, expresso em percentagem.

Para implementar este método o primeiro passo incide na recolha e preparação dos dados provenientes da simulação, assegurando uma boa resolução dos mesmos. Seguindo o procedimento, a aplicação do algoritmo RainFlow aos dados permitiu decompor o sinal em ciclos discretos, distinguindo entre ciclos completos e parciais, assim como em ciclos de baixa amplitude, frequentemente associados a eventos de travagem regenerativa. De maneira a traduzir as contagens de ciclos e o respetivo dano acumulado, aplicou-se a Lei de Miner de forma auxiliar e complementar ao algoritmo, para refletir o efeito total dos vários ciclos e a respetiva fadiga induzida. A Figura 67 ilustra a metodologia utilizada, a qual será aprofundada nos subcapítulos subsequentes.

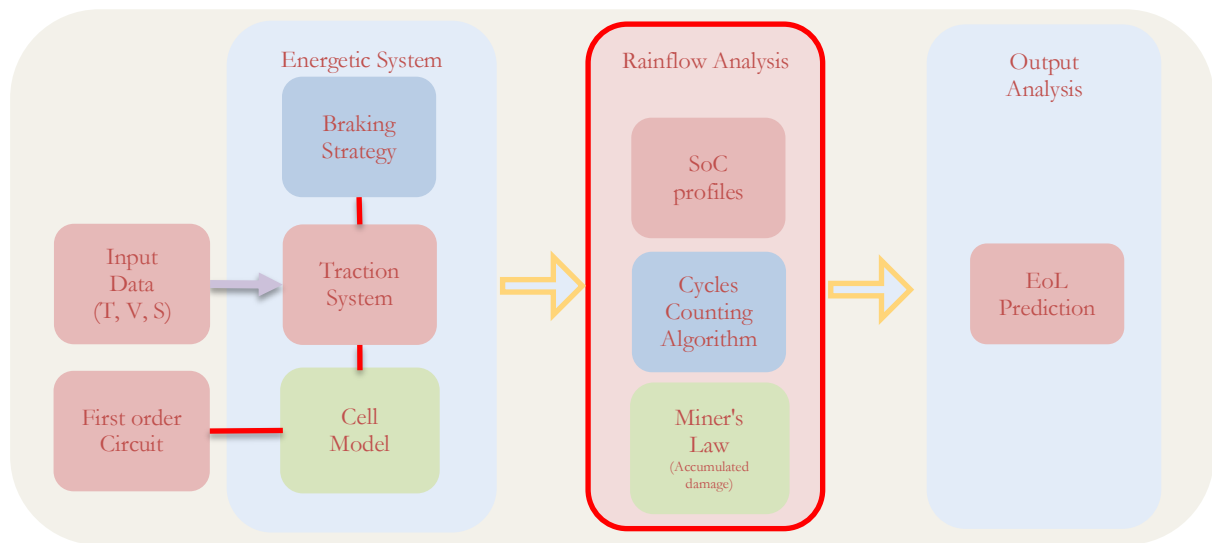


Figura 67 - Metodologia aplicada para análise dos ciclos de vida e estimativa da vida útil.

De forma genérica, a metodologia, procura assim combinar os benefícios de uma abordagem baseada em dados experimentais e simulação, constituindo-se como uma ferramenta robusta para a análise de fadiga e proporcionando uma perspetiva prática e eficaz sobre o impacto de diferentes padrões de utilização na degradação da bateria.

5.2.1 Contagem de ciclos com o RainFlow

O RainFlow, como referido anteriormente, é um algoritmo de contagem de eventos capaz de processar qualquer variável que produza efeitos dinâmicos contínuos no tempo. Originalmente desenvolvido por M. Matsuishi e T. Endo [64] e, mais tarde adaptado para MATLAB por A. Nieslony [75], de acordo com a norma ASTM, o método de contagem *RainFlow Counting Method* (RfCM) fundamenta-se no comportamento cíclico estável de tensão-deformação dos materiais. Os ciclos completos correspondem a ciclos histeréticos fechados, enquanto ciclos incompletos são classificados como semiciclos. Esta classificação, que determina se se trata de um ciclo ou semiciclo, é definido pela amplitude de cada evento através dos máximos e mínimos locais presentes no sinal [63]. Com isto, o algoritmo permite distinguir se um determinado evento, completo ou parcial, induz fadiga total ou apenas parcial na respetiva curva de degradação. Para uma compreensão mais

pormenorizada deste método, a Figura 68 apresenta o fluxograma do funcionamento geral do algoritmo, seguida da explicação passo a passo da sua dinâmica.

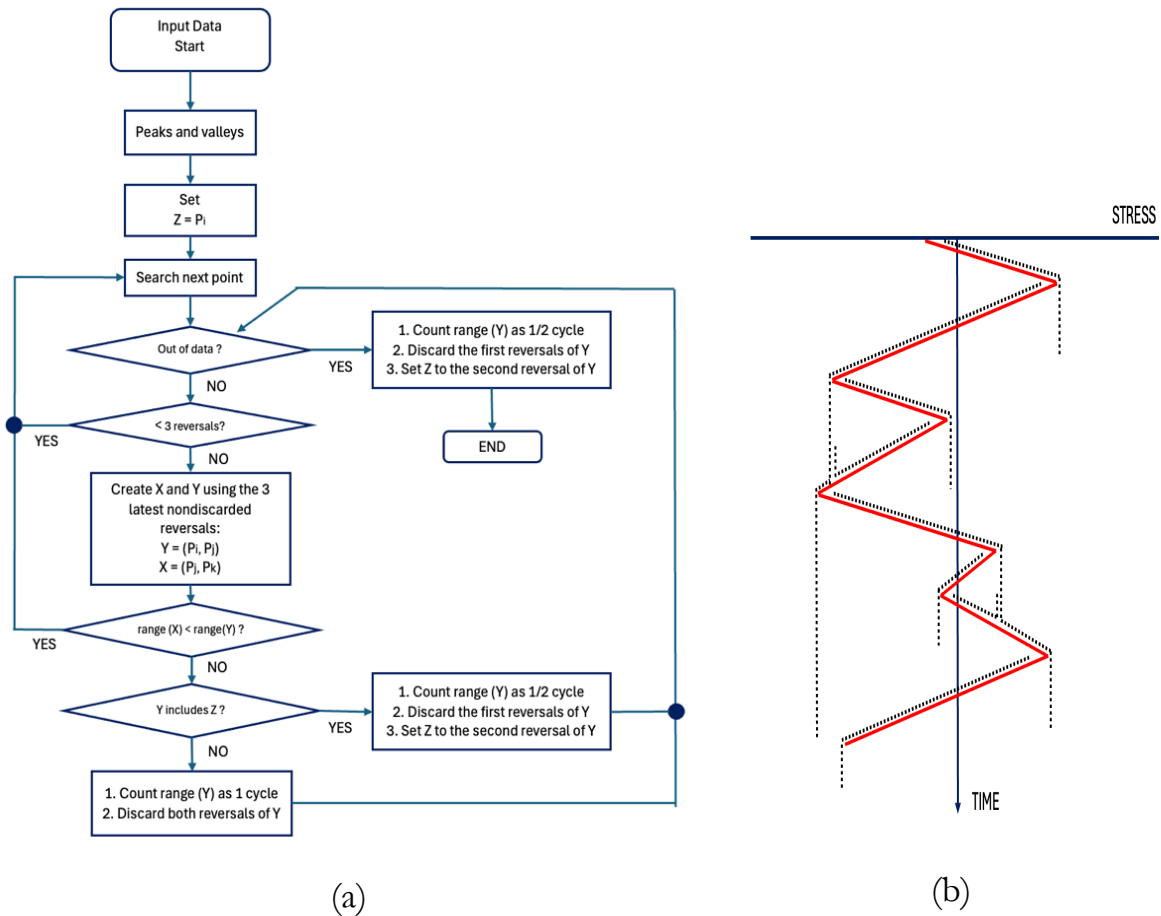


Figura 68 – (a) Fluxograma de funcionamento do algoritmo RainFlow, (b) Exemplo de análise do RainFlow.

A metodologia de contagem de ciclos segue os seguintes passos fundamentais:

1. Início num ponto de inversão

O processo inicia-se num pico ou vale local do sinal de carga ao longo do tempo. Tipicamente a análise começa sempre de um vale para um pico, e posteriormente de forma inversa, de um pico para um vale.

2. Simulação do escoamento da “chuva” (*rain flow*)

A partir desse ponto, virtualmente análogo ao escoamento de água sobre uma superfície inclinada, é percorrida toda a extensão do sinal até encontrar um ponto de inversão, máximo ou mínimo local, ou o cruzamento com outro “escoamento”.

3. Paragem quando bloqueado

Quando é encontrado um ponto de inversão no sinal, o algoritmo compara o ponto de inversão seguinte ao encontrado ($x+2$) e verifica se essa inversão se

encontra numa amplitude inferior ao atual ponto de partida, pelo que, caso se verifique, o “escoamento” é interrompido e é registada a amplitude correspondente. Esta interrupção também é aplicada quando o “escoamento” colide com um existente, evitando sobreposição de ciclos.

4. Contagem dos ciclos completos

Sempre que duas inversões formam um ciclo completo, seja de subida e descida ou o inverso, o ciclo é registado e a amplitude armazenada.

5. Reanálise dos pontos restantes

Partindo da premissa que a análise iniciou de um vale para um pico, e todos os pontos de inversão se encontram analisados e os ciclos e semiciclos registados, a mesma análise é efetuada para o inverso, isto é, de um pico para um vale e é realizada uma nova contagem RainFlow sobre esta sequência invertida.

6. Somatório dos resultados

O número total de ciclos e semiciclos corresponde à soma dos eventos identificados nas duas fases do processo, os quais, já armazenados e diferenciados por amplitude de impacto.

Estando estabelecida a dinâmica do algoritmo RainFlow na contagem de ciclos, é também fundamental perceber o impacto real que cada ciclo tem sobre a degradação do sistema. Nesse sentido, para cada ciclo e semiciclo identificado é associado um determinado grau de impacto, que se reflete através da curva de envelhecimento da célula e se traduz num valor de dano percentual. Através desse dano acumulado é possível avaliar o efeito real do perfil de utilização ao longo do tempo. Posto isto, o ponto seguinte, aborda como é feita essa contabilização da fadiga acumulada, que resulta da repetição contínua dos ciclos identificados pelo algoritmo.

5.2.2 Lei de Miner - Fadiga acumulada

A noção de fadiga acumulada é essencial para perceber o impacto real que o comportamento cíclico tem na vida útil da bateria. Ao relacionar os resultados obtidos através do RfCM, com a curva de degradação da célula, é possível determinar a correspondente perda de capacidade da célula com o dano que cada ciclo, ou semiciclo provoca no sistema. Para isto aplica-se a Lei de Miner para a fadiga acumulada, princípio este que afirma que o dano total resulta da soma dos contributos individuais de cada ciclo, e que a probabilidade de falha ocorre quando somatório de todas as contribuições atinge um limite físico, empírico, inerente ao material e ou sistema.

A falha do sistema, nomeadamente a perda significativa de capacidade que leva à falha crítica, convencionou-se que atinge esse limite quando o dano total que deriva da equação de Miner atinge o valor unitário, isto é, os 100% de fadiga. Este processo de ocorrência de falha que leva à inutilidade de um determinado sistema é possível de interpretar através da equação (17).

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1, \text{ for li-ion } \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \leq 0.2 \quad (17)$$

Nesta equação, n_i representa o dano provocado pelo ciclo i , N_i corresponde ao número total de ciclos que essa mesma condição consegue suportar até ocorrer a falha, e k é o número total de ciclos contabilizados. Sendo o valor unitário definido pela lei de Miner um parâmetro que estabelece um limite físico empírico relacionado à probabilidade de ocorrência de falha total, torna-se imprescindível ajustar esta noção de limite ao presente estudo. No caso das células de íões de lítio, considera-se que atingem o fim de vida útil para propulsão (EoL) quando a fadiga atingiu 20 %, ou seja, a sua capacidade se reduz em 20% em relação à capacidade nominal. Com efeito, considera-se, normalmente, que as células atingem o fim da vida útil para propulsão, quando apenas conseguem fornecer 80 % da sua capacidade nominal.

Da mesma forma como se procede na análise de fadiga de materiais, onde se recorre frequentemente à curva S-N para descrever a relação entre o número de ciclos e a amplitude de tensão aplicada, também nas baterias é possível definir uma curva de degradação que reflete a perda de capacidade em função do número de ciclos, Figura 69.

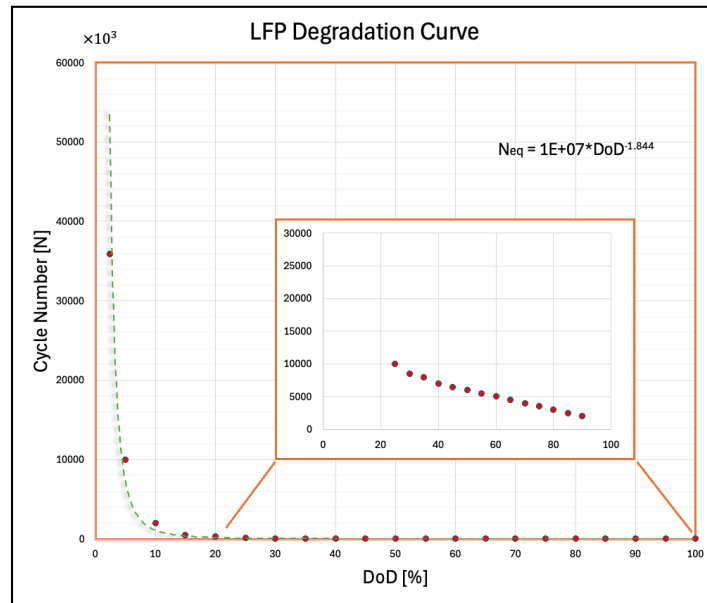


Figura 69 – Curva de degradação da célula LFP em estudo.

A curva de degradação evidencia de forma explícita como os vários níveis de SoC se relacionam com o número total de ciclos que uma célula consegue desenvolver. Com base nesta relação, é possível retirar informações importantes sobre o comportamento da bateria, a longo prazo, e como diferentes perfis de utilização afetam o seu desempenho. O número de ciclos até à falha segue uma relação de potência inversa em função do DoD [36, 37], o que reforça a ideia de que a

profundidade de descarga se apresenta como um fator absolutamente crítico na vida útil da célula assim como na quantificação do dano acumulado em diferentes condições de carga e descarga.

A título de exemplo, conforme representado na Figura 69, uma célula sujeita a uma descarga total (DoD de 100%), seguida de uma carga completa, realiza um ciclo completo. De acordo com as especificações do fabricante, esse único ciclo corresponde a aproximadamente 1/2000 (i.e., 2000 ciclos) da capacidade útil, isto é, a célula perde 0,05% da capacidade permitida antes que a mesma atinja o EoL.

A curva apresentada advém de dados provenientes do fabricante, e como tal apresenta algumas limitações naquilo a que se refere a valores de ordem inferior a DoDs de 1%. Tendo em consideração que a travagem regenerativa induz micro picos de recuperação de carga, relativamente inferiores a 1%, isto é, opera em condições de muito baixas amplitudes de DoD, recorreu-se a um modelo matemático no sentido de contornar essa limitação. Portanto, uma vez conhecida a forma como a curva se desenvolve, isto é, tratando-se de uma curva de potência invertida, extrapolou-se os valores abaixo do limiar da curva de degradação do fabricante, para toda a gama de DoD necessários. Esta extrapolação foi fundamental para garantir que todas as amplitudes de ciclo relevantes fossem devidamente consideradas, nomeadamente as de menor impacto, que estão associadas ao efeito da travagem regenerativa e ocorrem com maior frequência. Sem esta consideração o sistema iria categorizar todos os DoD provenientes da travagem regenerativa com o respetivo impacto “limite” de um DoD de 1%, o que iria apresentar resultados discrepantes face à realidade.

5.2.3 Implementação do RainFlow e Lei de Miner

A implementação desta metodologia, ou seja, do RfCM e Lei de Miner, em contexto prático resume-se à implementação da mesma em forma de código através do MATLAB. O processo inicia-se com a importação dos dados de saída do sistema EMR, em formato de vetor, com os dados de SoC do perfil de carga e descarga. Após a importação dos referidos dados, o código em si tem implementado a função desenvolvida por A. Nieslony [75], que interpreta os dados de acordo com a dinâmica do algoritmo e retorna os dados na forma de matriz. Esta matriz resultante é composta por três colunas de valores, dos quais, as amplitudes dos ciclos detetados, os valores médios e as respetivas frequências de ocorrência. De seguida o código com os valores de amplitudes, procura o valor correspondente de nº de ciclos através da curva de degradação, também implementada, e, para que cada valor de DoD seja associado corretamente ao ponto correspondente na curva, foi aplicada uma interpolação matemática. De forma a aumentar a precisão do processo, e, otimizar a eficiência computacional, a curva de envelhecimento foi inicialmente convertida para o domínio logarítmico, Figura 70, conforme apresentado em (18) e (19). Após o processo de interpolação, os dados foram novamente convertidos para a escala linear permitindo assim o cálculo final do dano acumulado.

$$\begin{aligned}
 y &= \frac{a}{x^b} \\
 \Leftrightarrow y &= a \cdot x^{-b} \\
 \Leftrightarrow N_{cyc} &= a \cdot DoD^{-b}
 \end{aligned} \tag{18}$$

Sendo N_{cyc} o número equivalente de ciclos, e ‘ a ’ e ‘ b ’ os parâmetros de ajuste da curva.

$$\log N_{cyc} = \log a + (-b) \cdot \log DoD \tag{19}$$

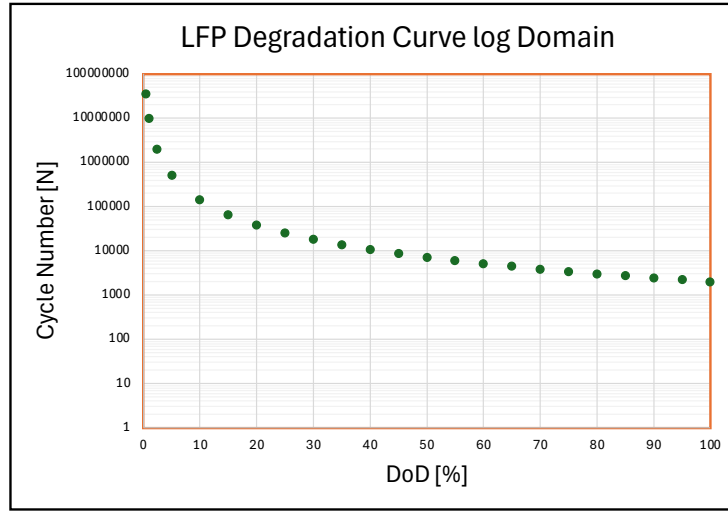


Figura 70 – Curva de degradação da célula LFP no domínio logarítmico, com o número máximo de ciclos que a célula suporta até atingir a fadiga total, em função da profundidade de descarga.

A análise em estudo foi efetuada com base em ciclos mensais, portanto, tornou-se necessário expandir a abordagem para uma perspetiva anual, de maneira a estimar a durabilidade esperada da bateria. Partindo do princípio de que os perfis de condução se mantêm constantes ao longo do ano, isto é, um determinado veículo assume rotas bem definidas, a degradação anual foi calculada através da replicação da Lei de Miner para os doze meses (equação (20)). Por fim, considerando o limite de vida útil para tração os 20% de perda de capacidade total, tornou-se fundamental traduzir o desgaste anual em função dessa limitação para um rácio total que nos indica a estimativa de vida do veículo em funcionamento. Para isto, recorreu-se à expressão definida pela equação (21).

$$Deg_{year}[\%/year] = 100 \cdot 12 \cdot \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \tag{20}$$

$$EoL_{predic.}[years] = \frac{Cap. Loss_{max}}{Deg_{year}} \rightarrow \frac{20\%}{Deg_{year}} \tag{21}$$

5.2.4 Cenários de teste

Neste trabalho quatro cenários distintos de rotas foram testados, cada um definido por um valor diferente de profundidade de descarga (DoD) e, cada, com variações diferentes de travagem regenerativa. O objetivo destes cenários passa por avaliar o impacto de cada perfil na degradação da bateria, segundo condições realistas de operação. Estes cenários, de natureza padronizada, foram idealizados com o intuito de replicar padrões típicos de utilização de veículos elétricos. Estes, podem caracterizar padrões de uso diário intensivo, com descargas mais profundas, até perfis mais moderados, e, simultaneamente, abrangem situações com rotas constantes e variáveis. A análise centra-se em compreender de que forma diferentes intensidades de utilização da bateria, assim como as próprias estratégias de recuperação de energia, influenciam ou retardam o envelhecimento das células e a perda de capacidade ao longo do tempo. De seguida apresenta-se uma breve descrição dos quatro cenários em causa:

1. **DoD Elevado ($\pm 70\%$)** – Este cenário, apresentado na Figura 71 como *Route 1*, representa ciclos de descarga profunda, em que 70% da capacidade total da bateria é utilizada diariamente em trajetos. Esta utilização foi estipulada para simular percursos urbanos mistos incluindo também situações extraurbanas, onde as descargas mais intensas são frequentes e colocam a bateria sob maior esforço.
2. **DoD Médio ($\pm 60\%$)** – Neste perfil, visível na Figura 71 como *Route 2*, cada ciclo corresponde à utilização de 60% da capacidade da bateria, diariamente através de rotas. Comparativamente ao cenário anterior, este permite representar o efeito de descargas mais moderadas onde a pressão sobre os elementos da célula é menor.
3. **DoD Médio ($\pm 50\%$)** – Tal como o anterior, este cenário envolve uma descarga de 50% por ciclo de operação diária, identificado por *Route 3* na Figura 71. Este tipo de utilização aproxima-se bastante do comportamento diário típico de condução em contexto urbano, constituindo-se como uma boa base de comparação para ciclos regulares de operação.
4. **Ciclo Combinado** – Este perfil, designado por *Combined Route* na Figura 71, procura simular um cenário mais complexo e próximo da realidade, pelo que alterna entre valores de DoD mais elevados e outros mais moderados, onde a bateria é sujeita a diferentes níveis de descarga e exigências de operação.

Estudo do envelhecimento de baterias de lítio em autocarros elétricos urbanos baseado na representação energética macroscópica

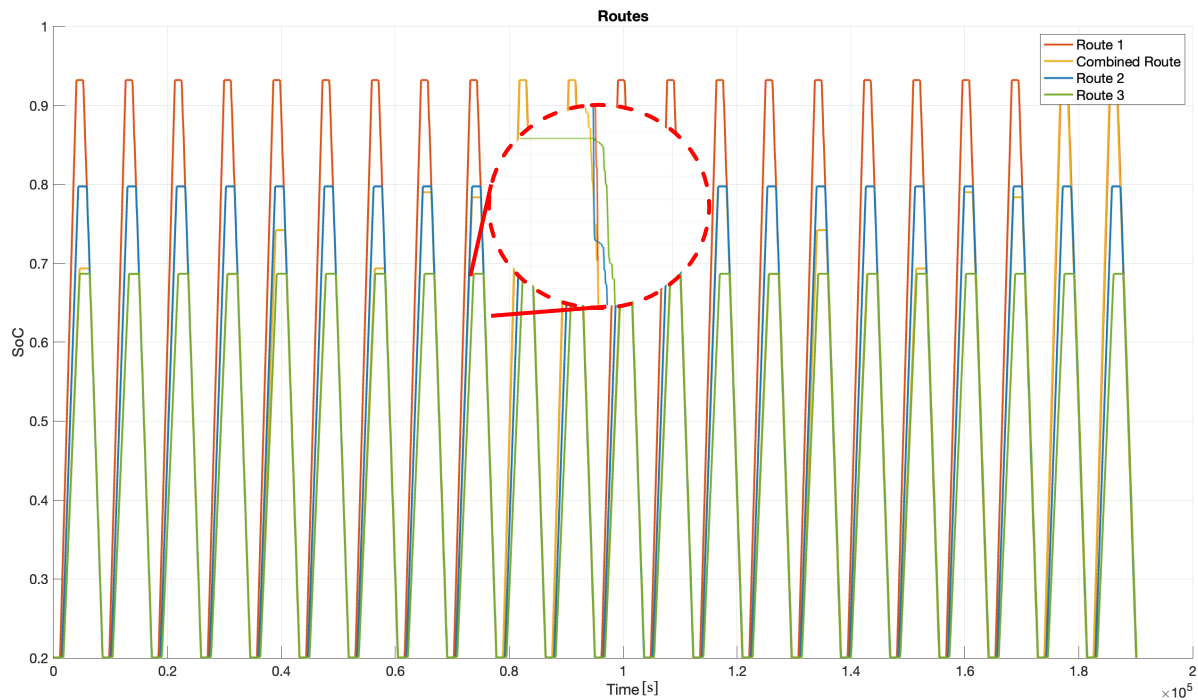


Figura 71 – Perfis de carga e descarga (SoC) dos diferentes cenários definidos em estudo, para um mês de operação.

Todos os cenários definidos com um valor de descarga, DoD, constante, simulam uma operação repetitiva ao longo de um mesmo itinerário de autocarro, durante 22 dias consecutivos. Por outro lado, o cenário caracterizado como ciclo combinado procura refletir de forma mais realista as condições típicas de serviço de um autocarro que percorre diferentes itinerários, concretamente alternando entre 11 rotas distintas ao longo de um mês completo de operação. O DoD define-se como a fração da capacidade útil da bateria que é utilizada diariamente, valores mais elevados de DoD estão diretamente associados a operações mais exigentes em termos energéticos, o que na prática, corresponde a itinerários de serviço mais longos. Para cada cenário analisado, assume-se que o respetivo padrão de condução se repete mensalmente ao longo de toda a vida útil da bateria, até ser atingido o critério de fim de vida. Desta forma é assim estimada a vida útil expectável para um determinado veículo que opera segundo condições específicas.

Cada ciclo em estudo foi objeto de análise quanto ao impacto da travagem regenerativa. Os respetivos ciclos diários, ampliados para o caso mensal, foram testados para os vários níveis de travagem, que variaram entre 0%, o que corresponde a uma operação sem qualquer tipo de regeneração ou travagem elétrica, e 100%, que representa o máximo aproveitamento da energia de travagem, Figura 72. Para cada cenário de teste, foram efetuados 11 ensaios, cada, com incrementos de 0,1, ou seja, aumentos de 10% entre cada nível de regeneração. Estes incrementos correspondem diretamente à percentagem da corrente total que é absorvida pelo pack de baterias.

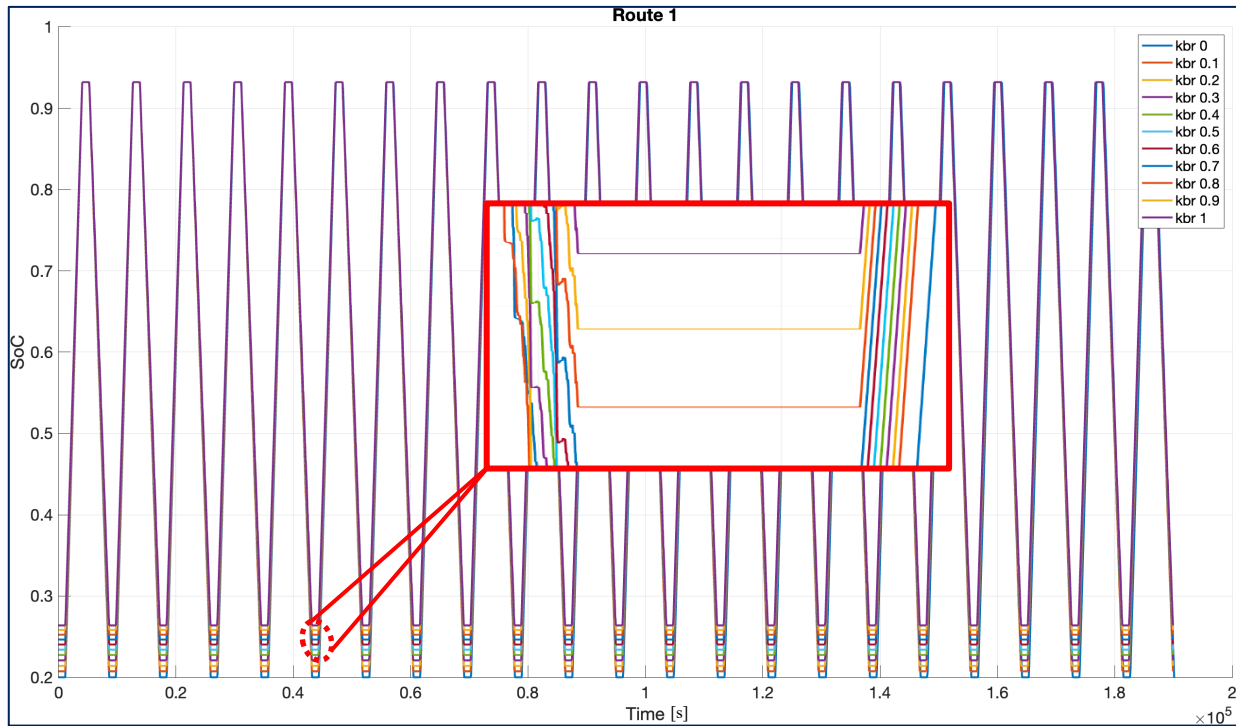


Figura 72 – Exemplo do efeito dos vários níveis de travagem regenerativa no perfil de condução com um DoD diário de 70%.

Estes cenários de utilização servem de base à análise desenvolvida no capítulo seguinte, o qual examina pormenorizadamente o impacto da profundidade de descarga e da travagem regenerativa, inicialmente, quanto aos efeitos na vida útil da bateria, posteriormente quanto à influência em termos de autonomia, e por fim, uma análise simultânea de ambas as métricas analisadas.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O enquadramento anteriormente descrito quanto aos cenários teste, os quais, alvo de análise através de simulação, permitiu gerar um conjunto de condições cíclicas representativas, com as respetivas variações de DoD, e, intensidade de travagem regenerativa, definida pelo parâmetro k_{br} . Nesta secção, é apresentado todo um conjunto de resultados seguido de uma avaliação detalhada de como os parâmetros influenciam o envelhecimento da bateria. Para analisar o impacto de cada cenário na degradação, foram aplicadas as técnicas definidas nos capítulos anteriores, ou seja, o RfCM e equação de Miner. Esta abordagem permitiu uma comparação quantitativa entre diferentes níveis de DoD e os respetivos perfis diários de operação, tanto constantes como combinados. Especial ênfase é dado ao efeito atenuador do k_{br} na perda de capacidade útil, destacando o seu potencial para prolongar a vida total da bateria. Ainda, são exploradas e discutidas as tendências obtidas em termos de recuperação de vida útil e autonomia, com o objetivo de identificar possíveis otimizações e estratégias de gestão de energia.

6.1 Influência da Travagem Regenerativa na Recuperação da Vida da Bateria

A avaliação do impacto da travagem regenerativa na estimação da vida da bateria, neste estudo, foi executada através da análise de três indicadores principais, os quais, a projeção da duração total de vida útil, o ganho absoluto de vida útil atribuído a cada nível de travagem regenerativa e por fim a evolução relativa entre níveis sucessivos de travagem. Em todos os cenários de utilização, verifica-se que um aumento do nível de travagem regenerativa está sempre associado a um prolongamento da vida útil da bateria. No entanto, a dimensão desse benefício varia consoante a profundidade de cada perfil, o que evidencia que a eficácia das estratégias de regeneração está diretamente relacionada com a profundidade e o padrão de descarga aplicados.

A estimação do EoL, com base no método de dano acumulado, confirma que o DoD é o parâmetro mais determinante no desenvolvimento acelerado do envelhecimento da bateria. Iniciando a análise pela observação da Figura 73, o cenário com descargas mais profundas, com um DoD de 70%, acelera significativamente a degradação, reduzindo de forma evidente a vida útil da bateria, neste caso concreto em cerca de 4 anos face ao melhor cenário. Perfis com DoD reduzidos, como o de 50%, proporcionam uma maior durabilidade, já que impõem um menor esforço diário sobre a bateria, traduzindo-se numa longevidade superior.

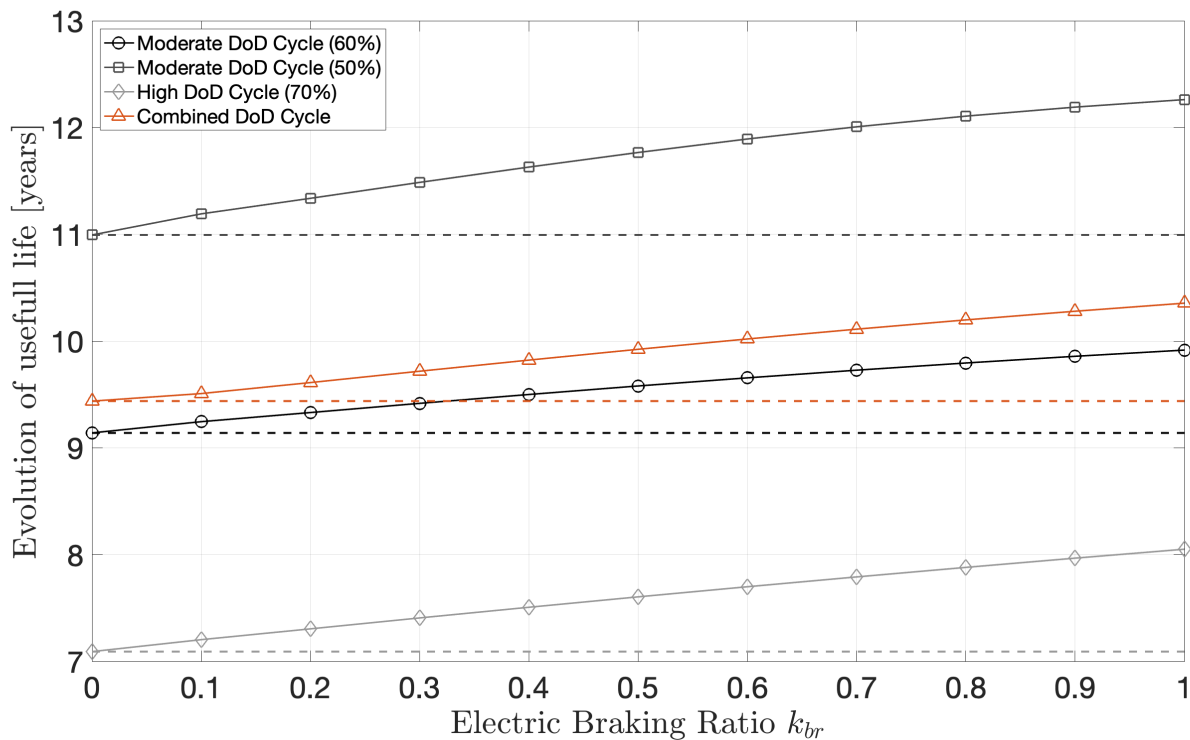


Figura 73 – Evolução da vida útil da bateria em função dos níveis de travagem regenerativa, k_{br} .

Em termos comparativos, o perfil com DoD variável, que alterna entre utilizações leves e moderadas até intensas ao longo dos dias, revela um comportamento mais equilibrado quando comparado com os cenários constantes de 60% e 70% de DoD. Embora não apresente melhores resultados que o perfil de 50%, em termos absolutos, o seu desempenho relativo sugere que a variabilidade de trajetos diários pode atenuar o stress acumulado e contribuir para uma maior robustez do sistema ao longo do tempo. Isto indica que perfis de utilização não uniformes ajudam a reduzir a degradação localizada e promovem uma distribuição mais homogênea do desgaste.

Importa ainda destacar o efeito visível da travagem regenerativa na vida útil projetada da bateria, com ganhos que podem chegar até cerca de um ano e três meses à medida que se aumenta a intensidade de regeneração. Isto representa um ganho de aproximadamente 11.5% na vida útil face à condição padrão sem regeneração. De seguida, a análise em termos absolutos irá mostrar estas evoluções.

Analisando os ganhos de vida útil com o aumento do nível de regeneração, todos os perfis evidenciam efeitos positivos tanto quanto mais elevados os valores de k_{br} . A travagem regenerativa aumenta a vida útil de circulação dos autocarros, com ganhos compreendidos entre os 8.5% a 13.5%, respetivamente, para o ciclo de 60% e 70% de DoD. Conforme ilustrado na Figura 74, os ciclos com o DoD mais reduzido mostram uma variação mais acentuada na longevidade da bateria à medida que a travagem regenerativa aumenta, pelo que, indica que condições de utilização menos agressivas beneficiam mais da recuperação de energia, sendo a regeneração mais eficaz na atenuação da degradação quando o esforço base imposto à bateria, definido pelo DoD, é menor.

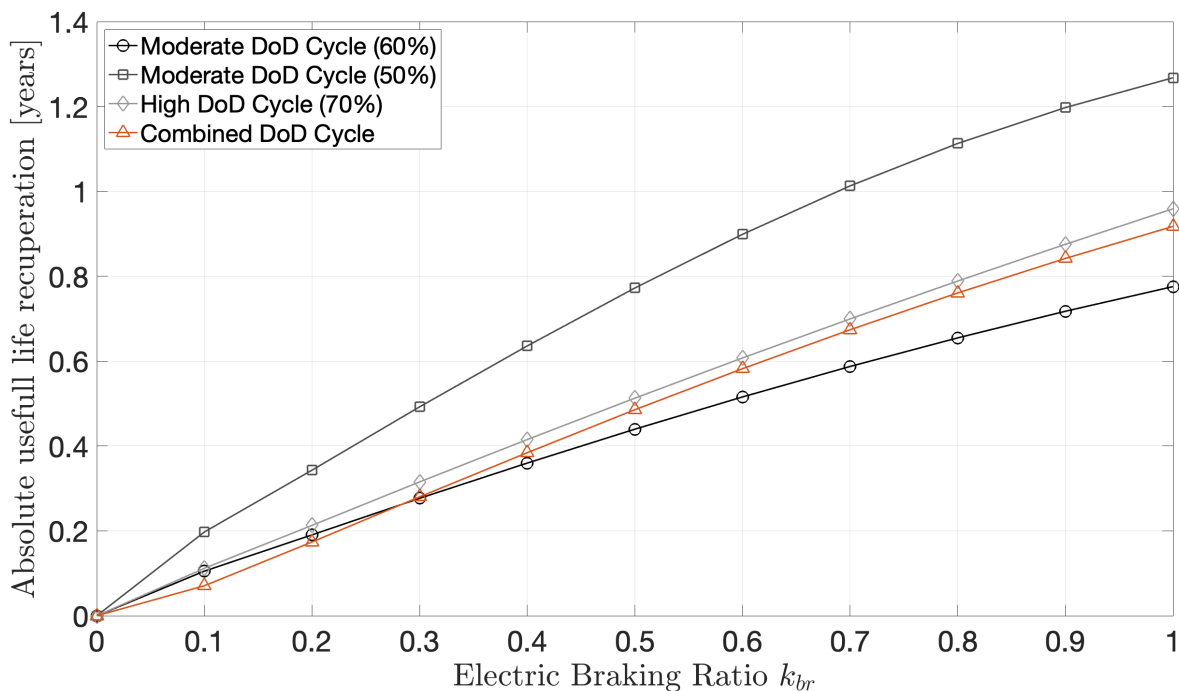


Figura 74 – Recuperação absoluta de vida útil em função dos níveis de travagem regenerativa, k_{br} .

A extensão total da vida útil atinge em média aproximadamente mais 0,9 anos para cenários com travagem totalmente regenerativa, sendo observada uma evolução praticamente linear na maioria dos perfis até cerca de $k_{br} \approx 0,6$. Como esperado, o perfil com 50% de DoD apresenta uma recuperação absoluta maior, reforçando a sua eficiência tanto no cenário base como nas configurações com regeneração. O perfil de operação variável demonstra também melhorias consistentes, seguindo tendências semelhantes às dos ciclos fixos, no entanto destaca-se superiormente pela sua evolução mais consistente e previsível. Esta tendência reforça que padrões de condução não repetitivos determinam potenciais vantagens quanto à eficiência da travagem regenerativa.

Por outro lado, perfis com DoD mais elevado ou ciclos combinados mostram uma evolução mais constante, com melhorias em vida útil mais homogêneas. Nestes casos, o processo de envelhecimento é predominantemente influenciado pela

profundidade e frequência dos ciclos de carga e descarga, o que reduz o impacto da travagem regenerativa na mitigação da degradação.

A recuperação relativa, definida como o aumento percentual da vida útil em comparação com o potencial máximo de cada perfil sob travagem totalmente regenerativa, oferece perspectivas adicionais. A Figura 75 mostra que as melhorias relativas na longevidade da bateria, apresentam ganhos decrescentes à medida que os níveis de travagem regenerativa aumentam. Os ganhos com maior impacto, isto é, mais significativos, ocorrem para os níveis de k_{br} de 0 a 0,3, com um efeito de saturação evidente para valores superiores a $k_{br} \approx 0,4$. Para estes níveis baixos de regeneração, o ciclo de 50% de DoD atinge ganhos relativos ligeiramente superiores comparativamente ao ciclo de uso mais intensivo (70% DoD) com ganhos de 4,48% comparado com os 4,45% do ciclo de 70%, o que reforça a vantagem que os ciclos mais moderados têm nestas faixas de regeneração. Para valores de k_{br} superiores a 0,4, os ganhos relativos indicam que o ciclo de uso mais intensivo (DoD de 70%) apresenta melhor aproveitamento sob as mesmas condições de regeneração, atingindo, em média, melhorias de 3% na vida útil face aos ciclos de. operação moderados e ao perfil variável. Destaca-se ainda, que as maiores melhorias marginais se registam em torno do k_{br} 0,1, onde níveis mínimos de travagem proporcionam benefícios substanciais regenerativos. Isto deve-se à capacidade do sistema de captar energia ao longo de uma ampla gama de eventos de desaceleração, incluindo sobretudo frequentes fases de travagem de baixa intensidade.

O perfil de DoD variável, de forma consistente, apresenta tendências de recuperação suaves e menos sensíveis às flutuações na intensidade da travagem. Em contrapartida, os perfis constantes, especialmente o ciclo com 50% de DoD, embora apresentem a maior melhoria relativa, também exibem uma redução gradual mais acentuada à medida que a travagem regenerativa aumenta. Esta análise leva à conclusão de que profundidades de descarga baixas são mais eficazes para níveis baixos de k_{br} , enquanto profundidades maiores demonstram melhor eficiência para valores mais elevados de k_{br} .

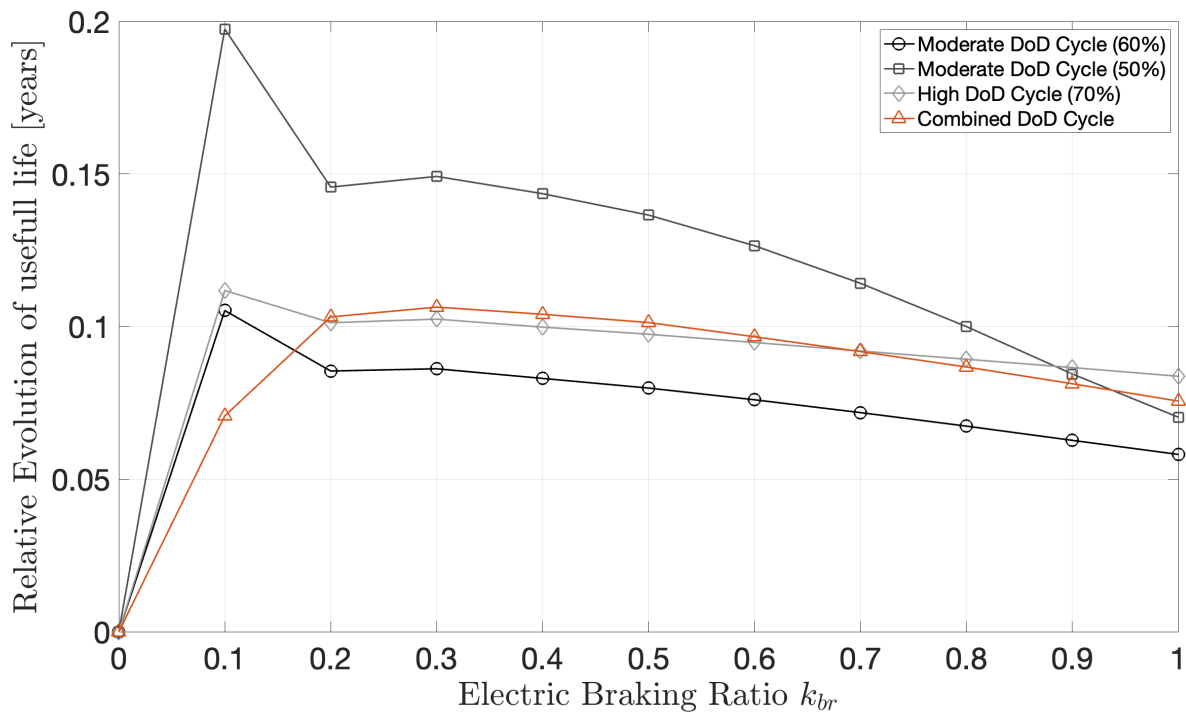


Figura 75 – Evolução relativa da vida útil recuperada em função da travagem regenerativa, k_{br} .

Estes resultados destacam a importância do ajuste do rácio quanto à intensidade da travagem com os perfis de utilização, de modo a otimizar tanto a recuperação de energia como o desempenho a longo prazo. De um modo geral, observa-se que o aumento do rácio de travagem regenerativa se traduz em ganhos na vida útil da bateria, no entanto, a análise das curvas evidencia uma redução progressiva do ganho relativo associado a incrementos sucessivos de k_{br} , particularmente para valores mais elevados. Este comportamento sugere que níveis baixos a moderados de travagem regenerativa, até cerca de 0,3, poderão constituir um compromisso operacional mais equilibrado, embora esta tendência deva ser interpretada como indicativa e dependente do perfil de utilização considerado. A sinergia entre perfis de DoDs baixos e estratégias de travagem regenerativa moderada revela-se particularmente relevante no contexto dos autocarros urbanos, onde as paragens frequentes facilitam uma recuperação de energia consistente. O impacto destas estratégias de travagem na autonomia é explorado na subsecção seguinte.

6.2 Influência da Travagem Regenerativa na Autonomia

Para avaliar o impacto da travagem regenerativa na autonomia, de forma idêntica ao caso anterior, foram analisadas três métricas principais, como seja, a distância diária, a distância absoluta recuperada através da travagem e a recuperação relativa com o aumento da intensidade da travagem. Embora anteriormente o foco fosse a vida útil da bateria, a atual análise revela uma tendência paralela nos ganhos de autonomia, da mesma forma influenciada pela taxa de travagem elétrica e pelo perfil de DoD. Ao examinar os quilómetros diários percorridos e recuperados em função da taxa de

travagem elétrica, Figura 76, esta análise mostra como a travagem regenerativa influencia a eficiência energética do veículo e no geral o seu desempenho.

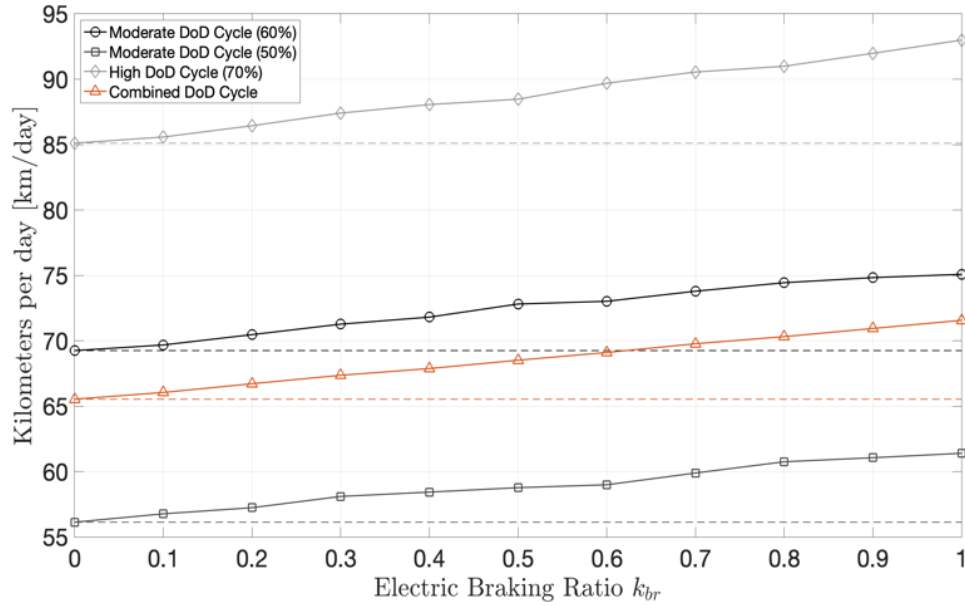


Figura 76 – Recuperação total diária de autonomia em função da taxa de travagem regenerativa, k_{br} .

Através da análise da Figura 76, os resultados demonstram que as descargas mais profundas, como o caso do ciclo de 70% de DoD, apresentam maior potencial para recuperação através da travagem regenerativa, resultando num maior número de quilómetros totais. Isto corresponde aproximadamente a ganhos de 9,26% para o ciclo de 70% de DoD quando comparado com as suas condições base, isto é, sem travagem regenerativa. Ciclos de DoD moderado (60% e 50%) apresentam melhorias mais modestas, em torno de 9,39% e 8,78% respetivamente, e, por outro lado, o ciclo combinado apresenta um melhor equilíbrio entre a agressividade da descarga e a eficiência da recuperação com ganhos relativos à condição base na ordem dos 9,21%, assegurando um desempenho estável ao longo do tempo. As diferenças entre os ciclos tornam-se mais evidentes quando a taxa de travagem regenerativa ultrapassa os 40%, onde os ciclos de DoD mais profundos recuperam mais energia, enquanto ciclos moderados e combinados mantêm um padrão de recuperação com menor variabilidade, isto é, quase linear.

Na Figura 77, os quilómetros absolutos recuperados por dia evidenciam este padrão praticamente linear, isto é, de baixa variabilidade consoante o incremento da taxa de regeneração. Para valores baixos de travagem regenerativa, desde a ausência de recuperação até cerca de 30%, não se observam variações significativas na autonomia entre os diferentes ciclos de DoD. Contudo, após os 40%, os padrões de recuperação tendem a divergir significativamente, confirmando assim que descargas profundas se destacam em termos de recuperação energética face aos demais perfis de DoD. O ciclo combinado e também o de menor DoD, por sua vez, mantêm uma progressão consistente na recuperação de autonomia, com o ciclo combinado a apresentar melhores resultados devido à sua curva de recuperação estável e

previsível. Isto sugere que condições de condução mistas permitem maior robustez operacional, tornando-se como uma escolha prática para situações reais variadas.

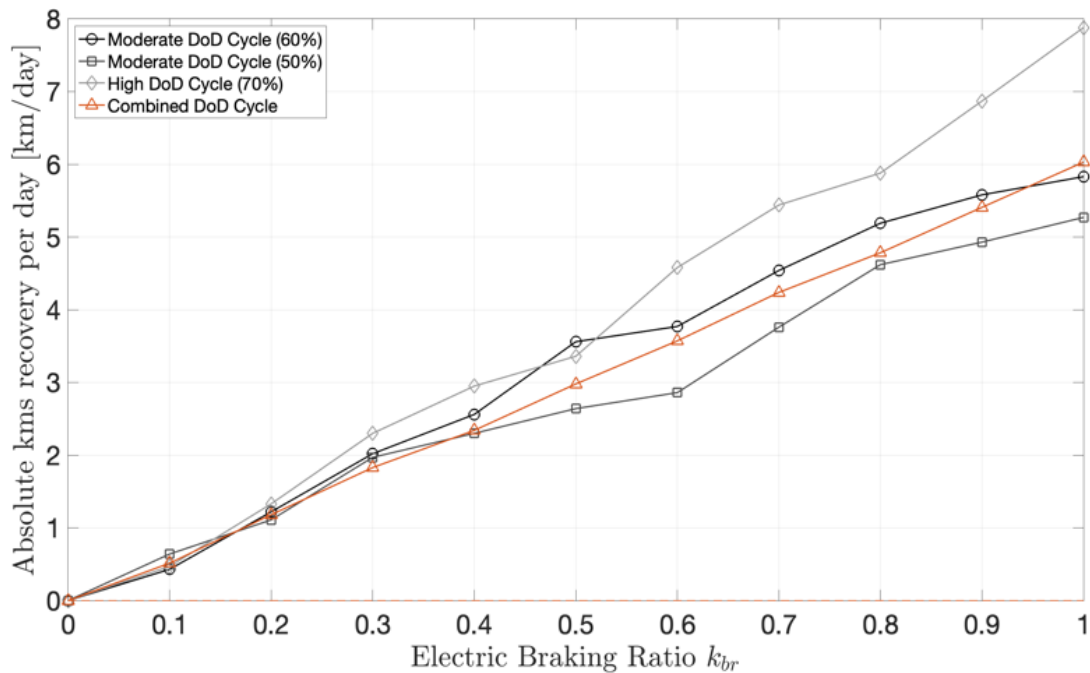


Figura 77 –Recuperação absoluta diária de quilómetros em função da taxa de travagem elétrica, k_{br} .

Uma vez que todos os perfis apresentaram uma tendência consistentemente crescente a cada incremento na taxa de regeneração, tornou-se indispensável realizar uma análise relativa normalizando cada nível de k_{br} em relação à recuperação máxima alcançável do respetivo ciclo de DoD. Esta abordagem equivale a avaliar a eficiência de cada intensidade de travagem, permitindo identificar de forma mais evidente os pontos ótimos locais entre os diferentes perfis ou trajetos, destacando possíveis correlações no comportamento da recuperação de energia.

Esta análise revela que existem níveis com taxas ótimas de travagem regenerativa em todos os ciclos. As intensidades muito baixas ou muito altas de travagem mostram-se menos eficazes, destacando-se assim valores intermédios, concretamente para taxas de k_{br} de 0,3 e 0,7, que oferecem o melhor equilíbrio entre recuperação e eficiência. Estes incrementos relativos na autonomia, apresentados na Figura 78, evidenciam flutuações significativas ao longo dos intervalos de k_{br} , que são diretamente associados ao comportamento dinâmico dos fluxos de energia, sobretudo influenciados pela frequência de travagem, perfis de velocidade e limitações da própria química das células.

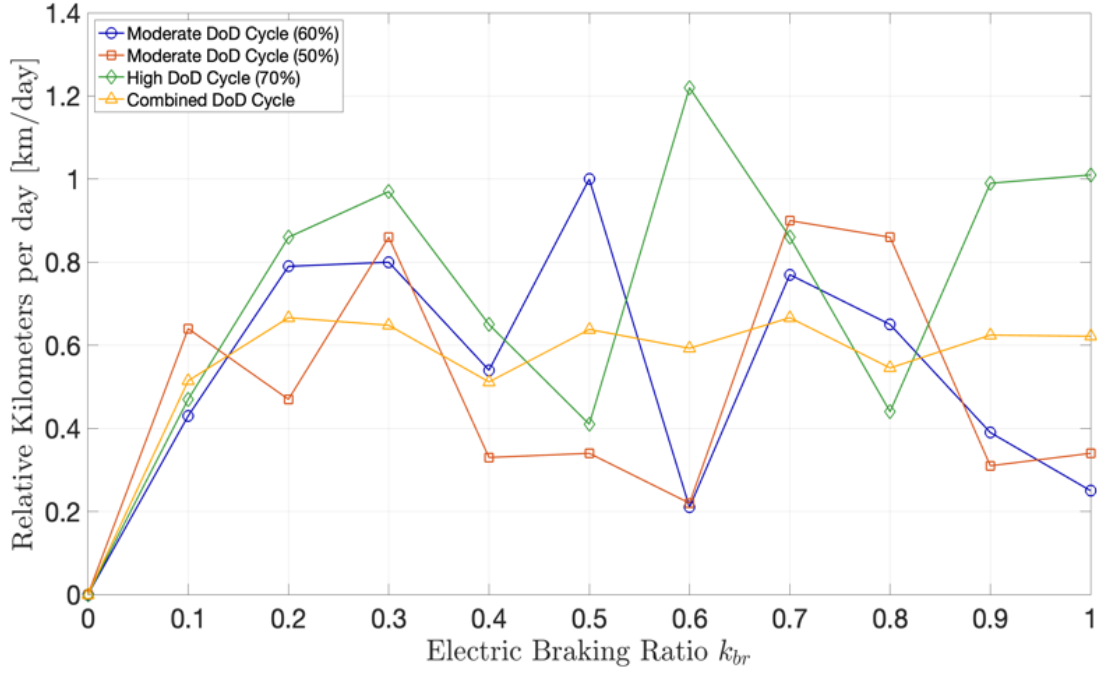


Figura 78 -Recuperação relativa de autonomia em função da taxa de travagem regenerativa, k_{br} .

Esta análise indica que a travagem regenerativa desempenha um papel fulcral na extensão da autonomia, com a eficiência de recuperação a depender dos perfis de descarga e da intensidade da travagem. Contrariamente ao uso de configurações extremas, estratégias moderadas proporcionam resultados mais consistentes e energeticamente eficientes.

6.3 Análise da Distância Total ao Longo da Vida Útil

Nas subsecções anteriores, explorou-se, através da análise das respetivas métricas definidas, como diferentes níveis de travagem regenerativa influenciavam a vida útil e a autonomia do veículo. O comportamento geral indicou que o sistema em estudo apresenta tendências bem definidas para perfis de descarga específicos, revelando diferenças significativas nas trajetórias de desempenho. Estes padrões tornam-se particularmente evidentes ao avaliar a autonomia ao longo da vida útil total, que integra tanto o alcance diário como a dinâmica da degradação, oferecendo uma métrica abrangente da eficácia energética a longo prazo. As imagens seguintes, apresentam uma análise mais generalizada face ao comportamento global de cada rota definida, onde é relacionado o total de quilómetros que o veículo consegue atingir ao longo da vida estimada em função das várias taxas de travagem elétrica, e também a relação entre a vida total estimada e a autonomia alcançada.

A distância cumulativa alcançável ao longo do ciclo de vida da bateria, Figura 79, sob diferentes níveis de travagem regenerativa, revela padrões de inflexão distintos que refletem a complexa interdependência entre a intensidade da recuperação de energia e o tipo de perfil ou trajeto que o veículo desempenhou no seu ciclo de vida.

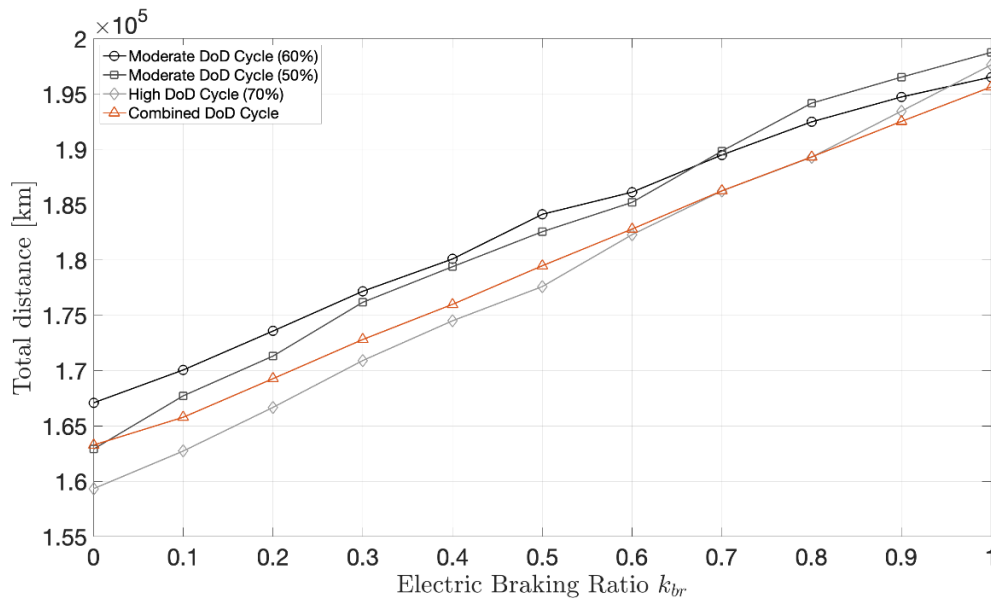


Figura 79 – Distância total percorrida em função da taxa de travagem regenerativa.

Os resultados evidenciam a configuração de 60% de DoD como o perfil de maior destaque, proporcionando consistentemente mais quilómetros percorridos para valores de k_{br} até 0,7. O gráfico reforça que ciclos de profundidade intermédia se alinham de forma otimizada com recuperações regenerativas moderadas. Isso demonstra a capacidade do ciclo em aproveitar o aumento da energia recuperada durante a travagem sem acelerar de forma significativa a degradação, sugerindo um equilíbrio entre produtividade operacional e durabilidade.

No entanto, essa hierarquia inverte-se a partir de valores de k_{br} superiores a 0,7. Nesse ponto, a estratégia de 50% DoD supera todas as demais, proporcionando mais quilómetros percorridos ao longo da vida útil. Essa inversão revela uma percepção fundamental. Em regimes regenerativos intensos (k_{br} elevados), ciclos mais conservadores não apenas mitigam a degradação, mas também aproveitam de forma mais eficiente a energia recuperada, garantindo um retorno energético superior a longo prazo. Trata-se de uma mudança de paradigma que sublinha a importância de alinhar os perfis de utilização ao ambiente regenerativo previsto, em vez de otimizar um único parâmetro de forma isolada.

O perfil de 70% DoD, embora limitado para k_{br} baixos, melhora significativamente com o aumento da regeneração, ultrapassando o Ciclo Combinado para k_{br} acima de aproximadamente 0,7. Padrões de descarga mais intensos, apesar de penalizados inicialmente pela degradação, podem recuperar competitividade em condições de elevada frequência de travagem e maior captura de energia.

O Ciclo Combinado apresenta uma tendência linear e consistente em toda a gama de k_{br} , refletindo a sua natureza equilibrada. No entanto, esta posição intermédia limita a liderança em vida útil ou autonomia total, evidenciando o compromisso inerente a cenários operacionais generalizados.

As diferenças anteriormente identificadas tornam-se ainda mais evidentes na Figura 80, que relaciona a vida útil com os quilómetros percorridos, oferecendo uma perspetiva clara do desempenho da bateria ao longo do tempo e da distância percorrida. Assumindo a métrica de regeneração máxima, $k_{br}=1$, como base da análise, a estratégia de 50% DoD atinge mais de 12 anos de operação prevista aproximando-se dos 200.000 km de serviço realizado, combinando de forma equilibrada durabilidade e produtividade máximas. Em termos combinados de vida útil e distância percorrida, o ciclo de 50% de DoD apresenta ganhos de aproximadamente 22%.

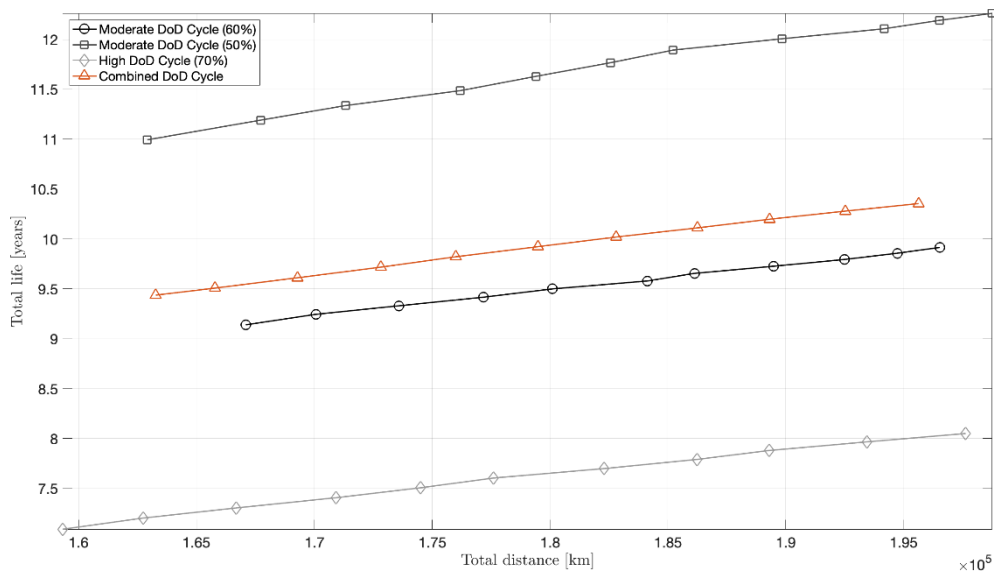


Figura 80 – Vida total estimada de operação do veículo em função do total de quilómetros percorridos.

O Ciclo Combinado ocupa a segunda posição, com cerca de 10,4 anos de serviço e 195.000 km percorridos, o que corresponde a ganhos relativos combinados em torno dos 19,8% face à condição base sem travagem regenerativa. Por outro lado, a configuração de 60% DoD, apesar de apresentar uma ligeira redução na vida útil (9,9 anos), supera o perfil variável em quilómetros totais percorridos (197.000 km). Apesar do ciclo de 60% de DoD apresentar melhorias globais relativas inferiores aos demais ciclos (17.6%), quando se analisa de forma separada os ganhos de vida útil e de quilómetros recuperados, esta distinção permite evidenciar uma nuance operacional importante. Portanto, um autocarro que tenha uma esperança de vida operacional inferior, mas em contrapartida consegue produzir mais quilómetros, isto implica que, a energia por unidade de tempo seja relativamente superior quando comparado com outros ciclos. Desta forma, a adoção de rotas diárias mais intensivas pode constituir-se como uma vantagem operacional, podendo ser justificada em função das prioridades económicas.

O perfil de 70% DoD apresenta uma vida útil mais curta, mas supera todas as outras opções em quilómetros totais, à exceção do ciclo de 50% de DoD. Contudo, em termos globais a recuperação relativa do ciclo de uso intensivo apresenta melhorias de sensivelmente 24% face às condições padrão (2% superior ao ciclo de 50% de DoD). Isto confirma que configurações com maior degradação podem ainda proporcionar maior produção acumulada quando otimizadas para intensidade de uso. Esta conclusão é particularmente relevante em cenários de serviço intensivo, em que o foco se concentra no acumulo de quilómetros percorridos ao longo da operação, mesmo que isso implique uma vida útil da bateria ligeiramente reduzida.

Em suma, estes resultados reforçam a necessidade de interpretar o impacto da travagem regenerativa de forma integrada, considerando tanto a longevidade como a produção acumulada. As estratégias operacionais devem ser adaptadas ao contexto, tendo em conta a química, os mecanismos de degradação da bateria, os perfis regenerativos e as exigências de serviço previstas. Um quadro abrangente de otimização deverá ainda incluir preços energéticos e custos ao longo do ciclo de vida, de modo a identificar regimes de utilização verdadeiramente ótimos no âmbito da mobilidade elétrica.

7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo avaliou de forma integrada o impacto dos perfis de profundidade de descarga (DoD) e da intensidade da travagem regenerativa (k_{br}) no envelhecimento da bateria e na autonomia de veículos elétricos. Através de simulações detalhadas e da aplicação de métodos quantitativos, como o RfCM e a equação de Miner, foi possível comparar o comportamento de diferentes perfis de utilização, tanto constantes como combinados, identificando padrões claros na degradação e recuperação de energia.

Os resultados evidenciam que o DoD é o parâmetro mais determinante na aceleração do envelhecimento da bateria. Perfis com descargas mais profundas, como 70% de DoD, provocam degradação significativa, reduzindo a vida útil em cerca de quatro anos em comparação com perfis mais conservadores. Em contrapartida, perfis de 50% de DoD asseguram maior durabilidade, enquanto perfis variáveis apresentam um desempenho equilibrado, atenuando o stress cíclico acumulado e promovendo uma distribuição mais homogênea do desgaste ao longo do tempo.

A análise do efeito da travagem regenerativa demonstrou que todos os perfis beneficiam de níveis mais elevados de k_{br} , embora a magnitude do ganho dependa do DoD aplicado. Perfis com descargas mais baixas aproveitam melhor a regeneração em níveis baixos e moderados, enquanto descargas mais profundas apresentam ganhos mais constantes em níveis elevados de travagem regenerativa. As melhorias relativas tendem a saturar para k_{br} superiores a 0,4, indicando que existe um limite de eficiência da regeneração que deve ser considerado no planeamento operacional.

Em termos de autonomia, a travagem regenerativa mostrou um impacto direto no número de quilómetros diários recuperados. Perfis de DoD elevados apresentam maior potencial de recuperação em taxas de regeneração superiores a 40%, enquanto perfis combinados e moderados mantêm padrões de recuperação mais estáveis e lineares. Estratégias moderadas de regeneração apresentam os resultados mais consistentes e energeticamente eficientes, destacando a importância de ajustar os perfis de DoD à intensidade de travagem para otimizar o desempenho global.

A análise da distância total ao longo da vida útil reforçou os resultados anteriores, mostrando que perfis de DoD intermédios, como o de 60%, proporcionam mais quilómetros acumulados para valores de k_{br} até 0,7, equilibrando produtividade e durabilidade. Em regimes de regeneração intensiva (k_{br} elevados), ciclos conservadores como 50% DoD, tornam-se mais eficientes, garantindo uma maior distância percorrida ao longo da vida da bateria. Perfis de 70% DoD, embora com vida útil mais curta, podem superar outros perfis na distância total quando otimizados para intensidade de uso, evidenciando que maiores taxas de degradação não excluem a possibilidade de maior rendimento energético acumulado em cenários de operação intensiva.

Em síntese, este estudo sublinha a necessidade de uma abordagem integrada, em que os perfis de utilização e a intensidade de travagem regenerativa são considerados de forma combinada, adaptando as estratégias às condições operacionais previstas. Perfis de DoD baixos ou moderados combinados com níveis adequados de regeneração oferecem o melhor compromisso entre durabilidade e quilómetros acumulados, sendo essenciais para maximizar o retorno energético e a eficiência operacional em veículos elétricos. A otimização no global deve também considerar fatores económicos e custos dos ciclos de vida, permitindo a definição de regimes de utilização verdadeiramente ótimos no contexto da mobilidade elétrica.

Do trabalho realizado, resultou já uma publicação em conferência internacional de referência do IEEE, intitulada: *“Enhanced EMR-Based Modelling for Lithium Battery Aging Studies in Electric Urban Buses”* [71]. Já em fase final, encontra-se também a preparação de um artigo para uma revista de referência na área da mobilidade elétrica, que serviu de base à segunda parte do estudo do presente relatório.

Quanto a trabalhos futuros, após o desenvolvimento apresentado neste relatório, um caminho natural a seguir passaria, numa primeira fase, pela inclusão no modelo da célula dos efeitos térmicos e dos fenómenos de troca de calor que ocorrem internamente no sistema. Subsequentemente, seria de particular interesse criar uma base de dados com os parâmetros típicos das diferentes químicas de células de íões de lítio utilizadas em veículos elétricos, que permita facilmente a seleção pretendida, e que posteriormente facilite o ensaio e a simulação de diferentes perfis de condução e condições de operação. Com a implementação deste sistema em pleno funcionamento, esta ferramenta pode tornar-se muito importante para gestores de frotas de autocarros, permitindo-lhes realizar investimentos de forma mais eficiente e identificar a solução mais adequada às necessidades específicas de cada frota. Deste modo, o estudo combina rigor científico e aplicabilidade prática, mostrando-se como um contributo relevante para a otimização da mobilidade elétrica e para a gestão sustentável de frotas de autocarros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Solaymani e J. Botero, «Reducing Carbon Emissions from Transport Sector: Experience and Policy Design Considerations», *Sustainability*, vol. 17, n.º 9, p. 3762, abr. 2025, doi: 10.3390/su17093762.
- [2] BloombergNEF, «Electric Vehicle Outlook 2025», 2025. Acedido: 14 de dezembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://about.bnef.com/insights/clean-transport/electric-vehicle-outlook/>
- [3] O. Lah, A. Mejia, e K. Pranawengkapti, «Urban Electric Mobility Initiative: Vehicle Technologies (Module 4.2)», Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy. Acedido: 14 de dezembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://tcc-gsr.com/wp-content/uploads/2023/09/4.2-Vehicle-Technologies.pdf>
- [4] IEA, «Global EV Outlook 2025», 2025. Acedido: 14 de dezembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>
- [5] L. Timilsina, P. R. Badr, P. H. Hoang, G. Ozkan, B. Papari, e C. S. Edrington, «Battery Degradation in Electric and Hybrid Electric Vehicles: A Survey Study», *IEEE Access*, vol. 11, pp. 42431–42462, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3271287.
- [6] Sustainable Bus Editorial Staff, «42% of the city buses registered in Europe in 2023 are zero emission», *Sustainable Bus*, 18 de março de 2024. Acedido: 8 de dezembro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.sustainable-bus.com/news/electric-bus-market-2023-registrations-man-solaris-yutong-wrightbus/>
- [7] K. Pietrzak e O. Pietrzak, «Environmental Effects of Electromobility in a Sustainable Urban Public Transport», *Sustainability*, vol. 12, n.º 3, p. 1052, fev. 2020, doi: 10.3390/su12031052.
- [8] S. S. G. Perumal, R. M. Lusby, e J. Larsen, «Electric bus planning & scheduling: A review of related problems and methodologies», *European Journal of Operational Research*, vol. 301, n.º 2, pp. 395–413, set. 2022, doi: 10.1016/j.ejor.2021.10.058.
- [9] K. Say, F. G. Brown, e Z. Csereklyei, «The economics of public transport electrification: When does infrastructure investment matter?», *Applied Energy*, vol. 360, p. 122809, abr. 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.122809.
- [10] J. A. Manzolli, J. P. F. Trovão, e C. Henggeler Antunes, «Electric bus fleet charging management: A robust optimisation framework addressing battery ageing, time-of-use tariffs, and energy consumption uncertainty», *Applied Energy*, vol. 381, p. 125137, mar. 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.125137.
- [11] J. Whitaker, G. Droge, M. Hansen, D. Mortensen, e J. Gunther, «A Network Flow Approach to Battery Electric Bus Scheduling», *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, vol. 24, n.º 9, pp. 9098–9109, set. 2023, doi: 10.1109/TITS.2023.3276269.
- [12] T. Kovačević, R. Kljajić, H. Glavaš, e M. Kljajin, «Analysis of the Impact of Electromobility on the Distribution Grid», *WEVJ*, vol. 16, n.º 7, p. 358, jun. 2025, doi: 10.3390/wevj16070358.
- [13] M. Khalid, J. Thakur, S. Mothilal Bhagavathy, e M. Topel, «Impact of public and residential smart EV charging on distribution power grid equipped with storage», *Sustainable Cities and Society*, vol. 104, p. 105272, mai. 2024, doi: 10.1016/j.scs.2024.105272.
- [14] F. Behnia, B.-A. Schuelke-Leech, e M. Mirhassani, «Optimizing sustainable urban mobility: A comprehensive review of electric bus scheduling strategies and future directions», *Sustainable Cities and Society*, vol. 108, p. 105497, ago. 2024, doi: 10.1016/j.scs.2024.105497.

- [15] C. Callegari *et al.*, «Battery electric buses in emerging markets and developing economies: A pathway for a just energy transition», *Energy for Sustainable Development*, vol. 85, p. 101678, abr. 2025, doi: 10.1016/j.esd.2025.101678.
- [16] M. Giagnorio, M. Börjesson, e T. D'Alfonso, «Introducing electric buses in urban areas: Effects on welfare, pricing, frequency, and public subsidies», *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 185, p. 104103, jul. 2024, doi: 10.1016/j.tra.2024.104103.
- [17] S. Borén, «Electric buses' sustainability effects, noise, energy use, and costs», *International Journal of Sustainable Transportation*, vol. 14, n.º 12, pp. 956–971, out. 2020, doi: 10.1080/15568318.2019.1666324.
- [18] J. A. Manzolli, J. P. Trovão, e C. H. Antunes, «A review of electric bus vehicles research topics – Methods and trends», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 159, p. 112211, mai. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112211.
- [19] K. Liu, T. Feng, T. Yamamoto, e Z. Song, «Electrification pathways for public transport systems», *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 126, p. 103997, jan. 2024, doi: 10.1016/j.trd.2023.103997.
- [20] P. G. Pereirinha, M. González, I. Carrilero, D. Anseán, J. Alonso, e J. C. Viera, «Main Trends and Challenges in Road Transportation Electrification», *Transportation Research Procedia*, vol. 33, pp. 235–242, 2018, doi: 10.1016/j.trpro.2018.10.096.
- [21] M. S. Whittingham, «History, Evolution, and Future Status of Energy Storage», *Proc. IEEE*, vol. 100, n.º Special Centennial Issue, pp. 1518–1534, mai. 2012, doi: 10.1109/JPROC.2012.2190170.
- [22] K. Mekdour, A. K. M. R. Reddy, J. I. G. Dawkins, T. M. G. Selva, e K. Zaghib, «Comparative Analysis of Cell Design: Form Factor and Electrode Architectures in Advanced Lithium-Ion Batteries», *Batteries*, vol. 11, n.º 12, p. 450, dez. 2025, doi: 10.3390/batteries11120450.
- [23] JMBS, *Our Guide to Batteries*, 3rd ed., Reprint 2017. UK: Johnson Matthey Battery Systems, 2017.
- [24] V. K. Bupesh Raja, I. Raja, e R. Kavvampally, «Advancements in Battery Technologies of Electric Vehicle», *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2129, n.º 1, p. 012011, dez. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2129/1/012011.
- [25] A. K. M. Ahasan Habib, S. M. A. Motakabber, e M. I. Ibrahimy, «A Comparative Study of Electrochemical Battery for Electric Vehicles Applications», em *2019 IEEE International Conference on Power, Electrical, and Electronics and Industrial Applications (PEEIACON)*, Dhaka, Bangladesh: IEEE, nov. 2019, pp. 43–47. doi: 10.1109/PEEIACON48840.2019.9071955.
- [26] X. Chen, W. Shen, T. T. Vo, Z. Cao, e A. Kapoor, «An overview of lithium-ion batteries for electric vehicles», em *2012 10th International Power & Energy Conference (IPEC)*, Ho Chi Minh City, Vietnam: IEEE, nov. 2012, pp. 230–235. doi: 10.1109/ASSCC.2012.6523269.
- [27] Z.-W. Gao, T. Lan, H. Yin, e Y. Liu, «Development and Commercial Application of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: A Review», *Processes*, vol. 13, n.º 3, p. 756, mar. 2025, doi: 10.3390/pr13030756.
- [28] S. Evro, A. Ajumobi, D. Mayon, e O. S. Tomomewo, «Navigating battery choices: A comparative study of lithium iron phosphate and nickel manganese cobalt battery technologies», *Future Batteries*, vol. 4, p. 100007, dez. 2024, doi: 10.1016/j.fub.2024.100007.

- [29] M. Şen, M. Özcan, e Y. R. Eker, «A review on the lithium-ion battery problems used in electric vehicles», *Next Sustainability*, vol. 3, p. 100036, 2024, doi: 10.1016/j.nxsust.2024.100036.
- [30] Nikhil Agnihotri, «What battery chemistries are used in electric vehicles?», Engineers Garage. Acedido: 22 de dezembro de 2025. [Online]. Disponível em: https://www.engineersgarage.com/ev-battery-chemistries-ncm-lfp-nca-lmo-lto-lco/?utm_source=chatgpt.com
- [31] D. Stampatori, P. P. Raimondi, e M. Noussan, «Li-Ion Batteries: A Review of a Key Technology for Transport Decarbonization», *Energies*, vol. 13, n.º 10, p. 2638, mai. 2020, doi: 10.3390/en13102638.
- [32] X. Liu, K. Li, e X. Li, «The Electrochemical Performance and Applications of Several Popular Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles - A Review», em *Advances in Green Energy Systems and Smart Grid*, vol. 925, K. Li, J. Zhang, M. Chen, Z. Yang, e Q. Niu, Eds., em Communications in Computer and Information Science, vol. 925., Singapore: Springer Singapore, 2018, pp. 201–213. doi: 10.1007/978-981-13-2381-2_19.
- [33] Johnson Matthey Battery Systems., «Our Guide to Batteries, 3rd Edition», 2015.
- [34] N. Omar *et al.*, «Evaluation of performance characteristics of various lithium-ion batteries for use in BEV application», em *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Lille, France: IEEE, set. 2010, pp. 1–6. doi: 10.1109/VPPC.2010.5729083.
- [35] Y. Mekonnen, A. Sundararajan, e A. I. Sarwat, «A review of cathode and anode materials for lithium-ion batteries», em *SoutheastCon 2016*, Norfolk, VA, USA: IEEE, mar. 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/SECON.2016.7506639.
- [36] C. R. Birkel, M. R. Roberts, E. McTurk, P. G. Bruce, e D. A. Howey, «Degradation diagnostics for lithium ion cells», *Journal of Power Sources*, vol. 341, pp. 373–386, fev. 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.12.011.
- [37] M. M. Kabir e D. E. Demirocak, «Degradation mechanisms in Li-ion batteries: a state-of-the-art review: Degradation Mechanisms in Li-ion Batteries: A State-of-the-Art Review», *Int J Energy Res*, vol. 41, n.º 14, pp. 1963–1986, nov. 2017, doi: 10.1002/er.3762.
- [38] X. Han *et al.*, «A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle», *eTransportation*, vol. 1, p. 100005, ago. 2019, doi: 10.1016/j.etrans.2019.100005.
- [39] T. Oji, Y. Zhou, S. Ci, F. Kang, X. Chen, e X. Liu, «Data-Driven Methods for Battery SOH Estimation: Survey and a Critical Analysis», *IEEE Access*, vol. 9, pp. 126903–126916, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3111927.
- [40] S. Saxena, C. Hendricks, e M. Pecht, «Cycle life testing and modeling of graphite/LiCoO₂ cells under different state of charge ranges», *Journal of Power Sources*, vol. 327, pp. 394–400, set. 2016, doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.07.057.
- [41] Y. Liu, C. Liu, Y. Liu, F. Sun, J. Qiao, e T. Xu, «Review on degradation mechanism and health state estimation methods of lithium-ion batteries», *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 10, n.º 4, pp. 578–610, ago. 2023, doi: 10.1016/j.jtte.2023.06.001.
- [42] Y. Liu, X. Lai, Y. Zheng, E. Cheng, J. Zhu, e L. Qian, «Recent advancements and perspectives in lithium-ion battery aging: Mechanism, characterization, and prediction», *Journal of Energy Storage*, vol. 122, p. 116670, jun. 2025, doi: 10.1016/j.est.2025.116670.

- [43] J. Gong, B. Xu, F. Chen, e G. Zhou, «Predictive Modeling for Electric Vehicle Battery State of Health: A Comprehensive Literature Review», *Energies*, vol. 18, n.º 2, p. 337, jan. 2025, doi: 10.3390/en18020337.
- [44] I. Laresgoiti, S. Käbitz, M. Ecker, e D. U. Sauer, «Modeling mechanical degradation in lithium ion batteries during cycling: Solid electrolyte interphase fracture», *Journal of Power Sources*, vol. 300, pp. 112–122, dez. 2015, doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.09.033.
- [45] J. De Hoog *et al.*, «Combined cycling and calendar capacity fade modeling of a Nickel-Manganese-Cobalt Oxide Cell with real-life profile validation», *Applied Energy*, vol. 200, pp. 47–61, ago. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.018.
- [46] P. Lei, Y. Xiong, C. Zhang, T. Yi, e X. Qian, «Life prediction model and performance degradation of lithium-ion battery under different cut-off voltages», *Solid State Ionics*, vol. 420, p. 116779, fev. 2025, doi: 10.1016/j.ssi.2024.116779.
- [47] M.-F. Ge, Y. Liu, X. Jiang, e J. Liu, «A review on state of health estimations and remaining useful life prognostics of lithium-ion batteries», *Measurement*, vol. 174, p. 109057, abr. 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2021.109057.
- [48] M. S. Hossain Lipu *et al.*, «Intelligent algorithms and control strategies for battery management system in electric vehicles: Progress, challenges and future outlook», *Journal of Cleaner Production*, vol. 292, p. 126044, abr. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126044.
- [49] H. A. Sakr, A. A. Eladl, e M. I. El-Afifi, «Leveraging IoT-enabled machine learning techniques to enhance electric vehicle battery state-of-health prediction», *Journal of Energy Storage*, vol. 120, p. 116409, jun. 2025, doi: 10.1016/j.est.2025.116409.
- [50] Y. Li *et al.*, «Data-driven health estimation and lifetime prediction of lithium-ion batteries: A review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 113, p. 109254, out. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109254.
- [51] N. Collath, B. Tepe, S. Englberger, A. Jossen, e H. Hesse, «Aging aware operation of lithium-ion battery energy storage systems: A review», *Journal of Energy Storage*, vol. 55, p. 105634, nov. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105634.
- [52] R. R. Richardson, M. A. Osborne, e D. A. Howey, «Gaussian process regression for forecasting battery state of health», *Journal of Power Sources*, vol. 357, pp. 209–219, jul. 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.05.004.
- [53] P. Singh, C. Chen, C. M. Tan, e S.-C. Huang, «Semi-Empirical Capacity Fading Model for SoH Estimation of Li-Ion Batteries», *Applied Sciences*, vol. 9, n.º 15, p. 3012, jul. 2019, doi: 10.3390/app9153012.
- [54] X. Jin *et al.*, «Applicability of available Li-ion battery degradation models for system and control algorithm design», *Control Engineering Practice*, vol. 71, pp. 1–9, fev. 2018, doi: 10.1016/j.conengprac.2017.10.002.
- [55] D. Anseán *et al.*, «Operando lithium plating quantification and early detection of a commercial LiFePO₄ cell cycled under dynamic driving schedule», *Journal of Power Sources*, vol. 356, pp. 36–46, jul. 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.04.072.
- [56] C. Schmitt, D. Kopljär, e K. A. Friedrich, «Detailed investigation of degradation modes and mechanisms of a cylindrical high-energy Li-ion cell cycled at different temperatures», *Journal of Energy Storage*, vol. 120, p. 116486, jun. 2025, doi: 10.1016/j.est.2025.116486.
- [57] J. Olmos, I. Gandiaga, A. Saez-de-Ibarra, X. Larrea, T. Nieva, e I. Aizpuru, «Modelling the cycling degradation of Li-ion batteries: Chemistry influenced stress factors», *Journal of Energy Storage*, vol. 40, p. 102765, ago. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102765.

- [58] A. Soto, A. Berrueta, M. Mateos, P. Sanchis, e A. Ursúa, «Impact of micro-cycles on the lifetime of lithium-ion batteries: An experimental study», *Journal of Energy Storage*, vol. 55, p. 105343, nov. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105343.
- [59] J. Huang, S. Wang, W. Xu, C. Fernandez, Y. Fan, e X. Chen, «An Improved Rainflow Algorithm Combined with Linear Criterion for the Accurate Li-ion Battery Residual Life Prediction», *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 16, n.º 7, p. 21075, 2021, doi: 10.20964/2021.07.29.
- [60] D. Fioriti, C. Scarpelli, L. Pellegrino, G. Lutzemberger, E. Micolano, e S. Salamone, «Battery lifetime of electric vehicles by novel rainflow-counting algorithm with temperature and C-rate dynamics: Effects of fast charging, user habits, vehicle-to-grid and climate zones», *Journal of Energy Storage*, vol. 59, p. 106458, mar. 2023, doi: 10.1016/j.est.2022.106458.
- [61] A. Pérez, I. San Martín, P. Sanchis, e A. Ursúa, «A novel aging modeling approach for second-life lithium-ion batteries», *eTransportation*, vol. 24, p. 100400, mai. 2025, doi: 10.1016/j.etrans.2025.100400.
- [62] A. Nuhic, T. Terzimehic, T. Soczka-Guth, M. Buchholz, e K. Dietmayer, «Health diagnosis and remaining useful life prognostics of lithium-ion batteries using data-driven methods», *Journal of Power Sources*, vol. 239, pp. 680–688, out. 2013, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.11.146.
- [63] I. Rychlik, «A new definition of the rainflow cycle counting method», *International Journal of Fatigue*, vol. 9, n.º 2, pp. 119–121, abr. 1987, doi: 10.1016/0142-1123(87)90054-5.
- [64] M. Matsuishi e T. Endo, «Fatigue of metals subjected to varying stress», *Japan Soc. Mech. Engrs.*, Jukvoka, Japan, 1968.
- [65] M. Musallam e C. M. Johnson, «An Efficient Implementation of the Rainflow Counting Algorithm for Life Consumption Estimation», *IEEE Trans. Rel.*, vol. 61, n.º 4, pp. 978–986, dez. 2012, doi: 10.1109/TR.2012.2221040.
- [66] S. Downing e D. Socie, «Simple rainflow counting algorithms», *International Journal of Fatigue*, vol. 4, n.º 1, pp. 31–40, jan. 1982, doi: 10.1016/0142-1123(82)90018-4.
- [67] Univ. Lille – France, «Energetic Macroscopic Representation». Acedido: 19 de março de 2024. [Online]. Disponível em: <https://emr-website.univ-lille.fr/>
- [68] A. Bouscayrol, J. Hautier, e B. Lemaire-Semail, «Graphic Formalisms for the Control of Multi-Physical Energetic Systems: COG and EMR», em *Systemic Design Methodologies for Electrical Energy Systems*, 1.ª ed., X. Roboam, Ed., Wiley, 2012, pp. 89–124. doi: 10.1002/9781118569863.ch3.
- [69] A. Bouscayrol e B. Lemaire-Semail, «Energetic macroscopic representation and inversion-based control», em *Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering*, Elsevier, 2023, pp. 365–375. doi: 10.1016/B978-0-12-821204-2.00117-3.
- [70] Karsan, «Karsan», Minibus elétrico - E-JEST. Acedido: 23 de março de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.karsan.com/pt/onibus-eletrico/e-jest>
- [71] M. A. M. Ferreira, P. Messier, P. G. Pereirinha, e J. P. F. Trovão, «Enhanced EMR-Based Modelling for Electric Urban Buses Performance Studies», em *2024 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Washington, DC, USA: IEEE, out. 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/VPPC63154.2024.10755503.
- [72] J. P. Trovao, M. R. Dubois, M.-A. Roux, E. Menard, e A. Desrochers, «Battery and SuperCapacitor Hybridization for a Pure Electric Three-Wheel Roadster», em *2015*

- IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Montreal, QC, Canada: IEEE, out. 2015, pp. 1–6. doi: 10.1109/VPPC.2015.7352904.
- [73] F.-A. LeBel, P. Messier, A. Sari, e J. P. F. Trovão, «Lithium-ion cell equivalent circuit model identification by galvanostatic intermittent titration technique», *Journal of Energy Storage*, vol. 54, p. 105303, out. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105303.
- [74] R. German, A. Mondoha, J. P. Trovao, e A. Bouscayrol, «Driving Range Evolution of an EV Regarding Cumulated Hours of Operation», em *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Hanoi, Vietnam: IEEE, out. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/VPPC46532.2019.8952203.
- [75] A. Nieslony, *Rainflow Counting Algorithm*. Acedido: 12 de abril de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3026-rainflow-counting-algorithm>