

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Aplicação da Economia Circular aos Veículos Elétricos

Tiago Neto Pinto Colaço



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores

Orientador: Maria Teresa Costa Pereira da Silva Ponce de Leão

25 de julho de 2022

Resumo

As alterações climáticas e a necessidade de se garantir um futuro mais sustentável é, mais que nunca, uma preocupação mundial. No entanto, o uso de recursos continua a crescer ano após ano e consequentemente as emissões de gases por efeito de estufa continuam igualmente a aumentar, observando-se assim um aumento da temperatura do planeta.

A Economia Circular apresenta ser a solução propícia para o desenvolvimento sustentável, permitindo aumentar a eficiência da gestão de recursos e minimizar a extração de matérias-primas e a produção de desperdício. Atualmente, o setor da mobilidade é o principal responsável pelas emissões de gases por efeito de estufa, pelo que, de modo a serem cumpridas as metas impostas para 2030 e 2050 pelas Nações Unidas, uma mudança na sua cadeia de valor é de elevada importância e urgência.

Deste modo, o presente documento apresenta um estudo relativamente a todo o processo de implementação e aplicação da Economia Circular a nível mundial. Além disso, como caso de estudo será avaliado o ciclo de vida de um veículo elétrico — comparando-o sempre com o de um veículo de combustão interna — onde serão identificadas e detalhadas todas as vantagens e desvantagens da sua adoção. Por conseguinte, será igualmente apresentada uma análise relativamente ao tempo em que um veículo elétrico irá produzir menos emissões que um veículo de combustão para diferentes situações e cenários. Por último, serão identificadas medidas circulares a aplicar com vista a reduzir o desperdício nas variadas aplicações industriais (com foco na indústria automobilística).

Key-Words: Acordo de Paris, Agenda 2030, Baterias, Ciclo de Vida, Desenvolvimento Sustentável, Economia Circular, Gases por Efeito de Estufa, Matérias-primas Críticas, Mix Energético, Pacto Ecológico Europeu, Reciclagem, REPowerEU, Veículos de Combustão, Veículos Elétricos, *Well-to-Wheel*.

Abstract

Climate change and the need for a more sustainable future is now, more than ever, a global concern. However, resource consumption continues to rise year after year, causing an increase in greenhouse gas emissions and, as a result, an increase in the planet's average temperature.

The Circular Economy appears to be the right solution for sustainable development, allowing to improve the efficiency of resource management systems and minimize the extraction of raw materials and the production of waste. Because the transportation sector is currently the primary source of greenhouse gas emissions, a shift in its value chain is critical and urgent in order to meet the targets imposed for 2030 and 2050 by the United Nations.

Therefore, this document presents a study regarding the entire process of implementation and application of the Circular Economy worldwide. Furthermore, the life cycle of an electric vehicle will be evaluated as a case study – comparing it with the life cycle of an internal combustion vehicle — where all the advantages and disadvantages of its adoption will be identified and detailed. Therefore, an analysis regarding the time when an electric vehicle will produce fewer emissions than a combustion vehicle for different situations and scenarios will also be presented . Finally, circular measures will be suggested in order to reduce waste in various industrial applications (with a focus on the automotive industry).

Key-Words: 2030 Agenda, Batteries, Circular Economy, Combustion Vehicles, Critical Raw Materials, Electric Vehicles, Energy Mix, European Green Deal, Greenhouse Gases, Life Cycle, Paris Agreement, Recycling, REPowerEU, Sustainable Development, *Well-to-Wheel*.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha orientadora, Professora Doutora Maria Teresa Costa Pereira da Silva Ponce de Leão. Obrigado por todos os conselhos, críticas e partilha de conhecimento que muito contribuíram para o sucesso deste trabalho.

Gostaria de agradecer aos meus amigos que ao longo destes últimos cinco anos tive o prazer de conhecer e criar memórias magníficas. Em especial agradeço aos meus companheiros de curso André Melim, Diogo Faria, Ricardo Alves e Luís Baetas, por sempre contribuírem para o meu enriquecimento pessoal e profissional, assim como pela companhia nas incontáveis noites de estudo. Não podia deixar de agradecer igualmente à Joana Ribeiro, Marta Silva e Inês Nogueira por todo o apoio incondicional.

Por fim, mas não menos importante, queria agradecer aos meus pais e ao meu irmão, por todo o apoio que deram ao longo do percurso académico e por toda a ajuda na superação dos obstáculos que ao longo dessa caminhada foram surgindo. A eles dedico este trabalho.

Tiago Colaço

*“Progress is impossible without change,
and those who cannot change their minds cannot change anything”*

George Bernard Shaw

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação e enquadramento	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura da Dissertação	3
2	Economia Circular	5
2.1	Panorama Climático Atual	6
2.2	Necessidade Sociais	8
2.3	Transição para uma Economia Circular	9
2.4	Implementação da Economia Circular	11
2.5	Planos que promovem a Economia Circular	13
2.5.1	Pacto Ecológico Europeu	14
2.5.2	100 cidades com impacto neutro no clima até 2030	15
2.5.3	REPowerEU	15
2.5.4	Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal	17
2.5.5	Plano de Recuperação e Resiliência	18
2.6	Conclusões e Considerações	19
3	Caso de Estudo: Ciclo de Vida de um Veículo Elétrico	21
3.1	Fase 1: Extração de matérias-primas	24
3.1.1	Materiais constituintes dos veículos elétricos	24
3.1.2	Matérias-primas críticas	24
3.1.3	Impactos Ambientais	28
3.2	Fase 2: Produção	28
3.2.1	Produção do veículo	28
3.2.2	Produção da bateria	29
3.2.3	Impactos Ambientais	31
3.2.4	Fatores que afetam os impactos ambientais	32
3.3	Fase 3: Uso	33
3.3.1	Fatores-chave	33
3.3.2	Emissões e impactos ambientais	34
3.4	Fase 4: Fim de Vida	37
3.4.1	Panorama atual do processo de fim de vida	38
3.4.2	Reciclagem das baterias	39
3.4.3	Necessidades do futuro	40
3.5	Conclusões e Considerações	41

4	Comparação do ciclo de vida de um VE e um VCI	43
4.1	Objetivos e características da análise	43
4.2	Metodologia	45
4.3	<i>Data Source</i>	48
4.3.1	Variáveis da fase de produção	48
4.3.2	Variáveis da fase de uso	49
4.4	Resultados	51
4.5	Discussão de resultados	51
5	Análises Complementares	55
5.1	Baterias alternativas	55
5.2	Conversão de veículos	57
5.3	Impactos do carregamento na rede elétrica	58
5.4	Papel das entidades governamentais na mobilidade	61
5.5	Conclusões e Considerações	64
6	Medidas de atuação	65
6.1	Medidas de atuação aplicáveis à mobilidade	65
6.2	Medidas de atuação gerais aplicáveis à indústria	68
7	Conclusões e Trabalho Futuro	71
7.1	Satisfação dos Objetivos	71
7.2	Trabalho Futuro	72
	Referências	73

Lista de Figuras

2.1	Descrição de um sistema circular	5
2.2	Aumento de temperatura média global entre 1880-2020	7
2.3	Projeção das emissões globais com e sem LULUCF	7
2.4	Distribuição das emissões pelas necessidades sociais	8
2.5	Esquema simplificado da EC aplicada a um processo industrial	9
2.6	Emissões de cada perfil por cada necessidade social	12
2.7	Áreas políticas abrangidas pelo Pacto Ecológico Europeu	14
3.1	Princípio de funcionamento dos VEs	22
3.2	Ciclo de vida de um VE	23
3.3	Importância económica vs risco de fornecimento de matérias-primas	25
3.4	Países que representam o maior fornecimento de CRMs para a UE	26
3.5	Taxa de reciclagem de CRMs	26
3.6	Previsão da procura de CRMs na UE para indústria de VEs	27
3.7	Comparação entre baterias de VEs	29
3.8	Distribuição da produção a nível mundial	30
3.9	Energia <i>per capita</i> de combustíveis fósseis, nuclear e fontes renováveis em 2021	30
3.10	Emissões de GEE durante a fase de produção: VEs vs. VCIs	31
3.11	Emissões estimadas durante a fase de uso (WTT+TTW)	34
3.12	Emissões de três veículos de diferentes graus de eletrificação em três diferentes situações de trânsito	35
3.13	Comparação do nível de ruído de VCIs e VEs	36
3.14	Perfil de carregamento diário	36
3.15	Previsão de baterias de lítio em três cenários de procura	40
3.16	Carros elétricos registados na UE-27, Islândia, Noruega e no Reino Unido	40
4.1	Esquema simplificado da análise WTW e do ciclo de vida	46
4.2	<i>Breakeven point</i> ambiental para cada cenário	51
4.3	Emissões compensadas pelos VEs	52
4.4	Análise comparativa das emissões ao longo do ciclo de vida de um VCI e VE para os diferentes casos (considerando o cenário 1)	53
4.5	Análise comparativa das emissões ao longo do ciclo de vida de um VCI e VE para os diferentes casos (considerando o cenário 2)	53
4.6	Análise comparativa das emissões ao longo do ciclo de vida de um VCI e VE para os diferentes casos (considerando o cenário 3)	54
5.1	Aumento de carga para um <i>feeder</i> que alimenta 150 residências com 25% de VEs	59
5.2	Diagrama de blocos simplificado da estrutura V2G	61
5.3	Redução do custo e das emissões de CO ₂ antes e depois incorporação de V2G	61

5.4	Síntese dos incentivos governamentais nos principais mercados	63
6.1	Projeção de potência instalada na EU	68

Lista de Tabelas

2.1	Quadro resumo das estratégias e objetivos da EC	10
3.1	Principais matérias-primas dos VEs	24
3.2	Lista completa das (30) CRMs de acordo com a atualização de 2020	25
3.3	Emissões de GEE da produção de baterias de lítio com diferentes cátodos	31
3.4	Impacto do tamanho e bateria do veículo	32
3.5	Propriedades de diferentes tipos de baterias de lítio	33
3.6	Postos de carregamento de VEs por 100 km (+ quota de mercado) em 2020	37
4.1	Distância média percorrida na UE-27	44
4.2	Resumo das características dos estudos relativamente à fase de produção	48
4.3	Capacidade e emissões de GEE da produção exclusiva de baterias na China	49
4.4	Emissões totais durante a fase de produção para os diferentes cenários	49
4.5	Resumo das características dos estudos relativamente à fase de uso	50
4.6	Equivalência das classes de veículos	50
4.7	Emissões totais durante a fase de uso	50
4.8	Resultados de T para cada caso nos diferentes cenários	51
5.1	Principais incentivos aplicados na Noruega no período 1990-2021	62

Abreviaturas e Símbolos

ACEA	Associação Europeia de Fabricantes de Automóveis
CDN	Contributos Determinados Nacionais
CO ₂	Dióxido de Carbono
CRM	<i>Critical Raw Materials</i>
EC	Economia Circular
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
GEE	Gases com Efeitos de Estufa
GNL	Gás Natural Liquefeito
ICCT	<i>International Council on Clean Transportation</i>
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IMT	Instituto da Mobilidade e dos Transportes, IP
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LULUCF	<i>Land use, land-use change, and forestry</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
NCAP	<i>European New Car Assessment Programme</i>
NO _x	Óxido Nítrico
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PAEC	Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal
PM	Promécio
PRR	Plano de Recuperação e Resiliência
REE	<i>Rare Earth Elements</i>
SO ₂	Dióxido de Enxofre
T&E	<i>Transport and Environment Group</i>
TTW	<i>Thank-to-Wheel</i>
UE	União Europeia
VCI	Veículo de Combustão Interna
VE	Veículo Elétrico
VEB	Veículo Elétrico a Bateria
VEH	Veículo Elétrico Híbrido
VEHP	Veículo Elétrico Híbrido Plug-In
WTT	<i>Well-to-Thank</i>
WTW	<i>Well-to-Wheel</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação e enquadramento

As alterações climáticas estão longe de ser unicamente um problema ambiental, representando igualmente uma emergência humanitária e política. As discussões relativamente à necessidade de se realizar uma transição energética e procurar um futuro mais sustentável ganham cada vez mais força. O foco principal da sustentabilidade é a inevitabilidade de reduzir as emissões de gases por efeito de estufa.

Em dezembro de 2015, foi estabelecido o Acordo de Paris que reuniu 196 países para uma das mais importantes e ambiciosas reuniões climáticas globais. Aqui, foi definido que o principal objetivo é reduzir as emissões globais a níveis que impeçam que a temperatura média do planeta aumente mais de 2 °C relativamente aos níveis pré-industriais e procurar em conseguir limitá-lo a 1,5 °C até 2050. Neste acordo também é visado em melhorar a capacidade de cooperação mundial e ajudar os países menos desenvolvidos a lidar com os impactos das mudanças climáticas. No mesmo ano foram criados os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável pelas Nações Unidas. Neste plano existem 17 objetivos de desenvolvimento sustentável interconectados, ou seja, uma ação numa dada área afetará os resultados nas outras e, com este progresso, irá ajudar a equilibrar a sustentabilidade social, económica e ambiental. De forma semelhante, em 2019 foi estabelecido um plano ambicioso pela União Europeia: o Pacto Ecológico Europeu. Este plano visa transacionar a economia da Europa para um modelo económico mais sustentável. Além disso, pretende transformar os desafios climáticos e ambientais em oportunidades em todas as áreas políticas para tornar a Europa no primeiro local neutro em termos de clima até 2050, com um corte de 50% nas emissões de dióxido de carbono até 2030.

No entanto, em 2020 a temperatura média global atingiu o valor de 1,1 °C, quebrando novos recordes climáticos. Por outro lado, é projetado que os objetivos impostos para 2030 não serão alcançados, verificando assim que as medidas implementadas até ao momento não são suficientes. Com um tempo de atuação cada vez mais curto, é necessário tomar ações mais extremas.

A par da eficiência energética, da descarbonização através da eletrificação com renováveis e da utilização de novos vetores como o gás e calor a partir de fontes renováveis, a Economia Circular

surge como mais uma ferramenta fundamental para ajudar a concretizar os objetivos pretendidos. A implementação de uma economia circular irá melhorar a gestão dos recursos utilizados através da sua redução, reutilização e reciclagem. Consequentemente, irá ajudar a travar as alterações climáticas, converter a economia atual para uma economia limpa, tornando igualmente esta transição justa e abrangente para todos e com uma visão mais centrada no planeta. O princípio da economia circular é “fazer mais com menos”, quebrando o atual padrão de “extração-transformação-utilização-descarte” dos recursos. Porém, a transição de uma economia linear para circular é uma tarefa complexa, dado que depende de diversos fatores, muitos dos quais são dependentes entre si. Por outro lado, apesar de todos os esforços terem um objetivo comum, a implementação de uma economia circular diferirá para cada país, dependendo das suas necessidades sociais e económicas.

1.2 Objetivos

A transição de uma economia linear para uma economia circular é um processo complexo, no qual não existe uma solução única para a sua implementação, ou seja, para diferentes aplicações industriais será necessário adotar ações distintas de modo a tornar os processos em questão mais verdes e económicos.

A mobilidade é atualmente o setor responsável por grande parte das emissões totais de gases por efeito de estufa. Nesta perspetiva, a adoção de veículos elétricos apresenta ser o caminho mais promissor para reduzir as emissões do setor. Porém, existem aspetos negativos como, por exemplo, os impactos da extração, uso e descarte de lítio, minério essencial das atuais baterias utilizadas nos veículos.

Deste modo, foi utilizado como caso de estudo o ciclo de vida de um veículo elétrico, com o objetivo de, em cada etapa da sua cadeia de valor fosse possível identificar medidas de atuação com vista à redução de desperdício. Posteriormente, a metodologia aplicada ao caso de estudo foi extrapolada, de modo de serem identificadas medidas e ações passíveis de serem aplicadas a qualquer setor industrial.

Pretende-se ainda responder às seguintes questões:

- Os veículos elétricos contribuem para a descarbonização? Em que etapas é necessário atuar? Quais as barreiras a ultrapassar e qual o papel dos governos?
- A conversão de um veículo de combustão interna para um veículo elétrico é vantajosa?
- Dado que produção das baterias de lítio caracteriza-se por ser um processo que gera elevadas quantidades de gases por efeito de estufa, existe alguma(s) alternativa(s)?

Tentaremos ainda abordar as seguintes questões:

- Existem soluções/tecnologias que previnam situações de congestionamento da linha de distribuição provocados pelo carregamento dos veículos?
- Qual o impacto carregamento dos veículos poderão provocar na rede elétrica?

1.3 Estrutura da Dissertação

O presente documento encontra-se dividido em 7 capítulos. No primeiro capítulo, é efetuada uma breve introdução ao tema, sendo igualmente apresentada a motivação, os objetivos e a estrutura da dissertação.

No capítulo 2 é realizado o enquadramento e a revisão do estado da arte relativamente à mitigação das alterações climáticas e a neutralidade carbónica. Além disso, também foi efetuado um estudo detalhado relativamente à economia circular e a sua implementação a nível mundial. O trabalho desenvolvido neste capítulo serve como base a todo o estudo efetuado posteriormente.

No capítulo 3 é introduzido o caso de estudo: ciclo de vida de um veículo elétrico. A cadeia de valor do caso de estudo foi dividida em quatro fases, com intuito de estudar, perceber e avaliar os problemas associados a cada uma delas. As conclusões provenientes deste capítulo irão contribuir para, mais tarde, propor possíveis medidas de atuação com vista a aumentar a circularidade de todo processo em análise.

Por sua vez, no capítulo 4 é avaliado em quanto tempo é que as emissões totais de um veículo elétrico, ao longo do todo o seu ciclo de vida, irá compensar as emissões de um veículo de combustão interna, tendo em consideração diferentes hipóteses. Previamente à realização desta análise, é descrito de que forma foram obtidos os dados, assim como uma breve apresentação da metodologia utilizada.

No capítulo 5 são realizadas algumas análises complementares de temas ligados à mobilidade elétrica. De forma semelhante ao capítulo 3, as conclusões retiradas destas análises irão contribuir para propor possíveis medidas de atuação de modo a implementar uma economia mais circular no caso de estudo.

Já no capítulo 6 encontra-se todas as medidas identificadas, e respetivas justificações perante as conclusões retiradas nos pontos anteriores. Este capítulo encontra-se dividido em duas partes: na primeira são apresentadas todas as medidas que podem ser aplicadas exclusivamente ao caso de estudo, já na segunda parte são detalhadas um pequeno conjunto de ações aplicáveis a qualquer processo industrial.

Por fim, o capítulo 7 é feito um balanço geral do caso de estudo, apresentam-se as principais conclusões, a satisfação de resultados e ainda possíveis trabalhos a realizar no futuro.

Capítulo 2

Economia Circular

Com o aumento e frequência das alterações climáticas, o principal objetivo dos países unidos, através da ONU, é limitar o aumento temperatura média global a o 1.5°C acima dos valores médios pré-industriais até 2050. Em consonância, existe uma série de outros objetivos interconectados que abrangem todos os setores da sociedade e da economia.

A Economia Circular apresenta ser a solução ideal que visa aumentar eficiência da gestão de recursos e minimizar a extração de matérias-primas e de produção de desperdício (figura 2.1, quebrando assim o atual sistema linear de "extrair, produzir e descartar").

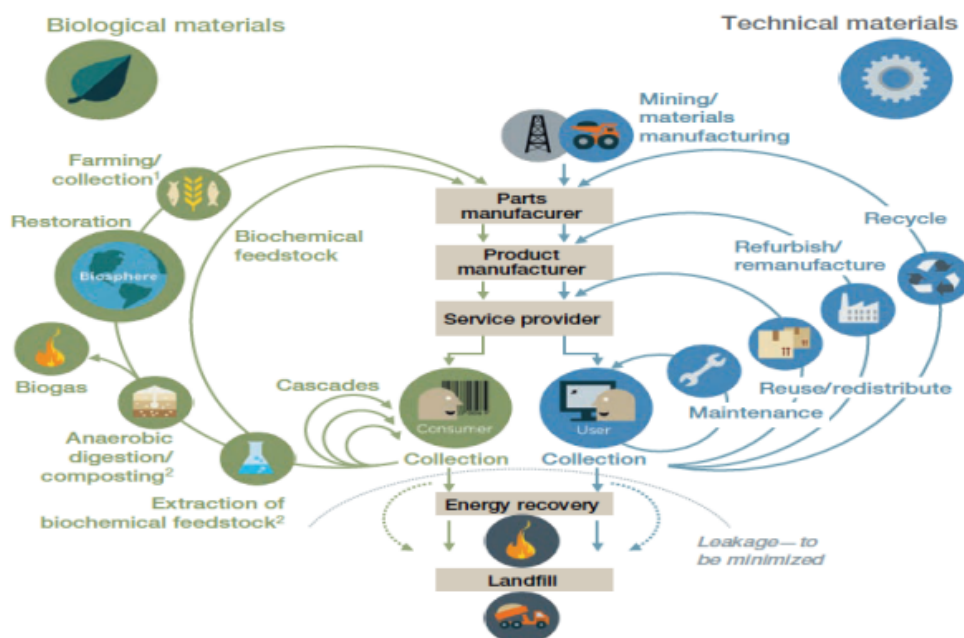


Figura 2.1: Descrição de um sistema circular [1]

Os subcapítulos posteriores pretendem realizar um estado da arte relativamente à Economia Circular e o porquê da sua necessidade, respondendo assim às seguintes questões:

- Os atuais esforços das nações são suficientes para responder aos objetivos impostos para 2030 e 2050?
- Quais os setores em que se torna mais urgente aplicar medidas "circulares"?
- Como transacionar de um sistema linear para um sistema circular?
- A aplicação de medidas circulares a nível nacional serão semelhantes para cada país?
- Que apoios e incentivos atualmente contribuem para a implementação de uma economia mais circular?

2.1 Panorama Climático Atual

Em 2015 os líderes mundiais de 196 países chegaram a um acordo relativamente a novas medidas e objetivos para combater as alterações climáticas e tornar a economia e a sociedade com um impacto neutro no clima até 2050, acordo este que seria posteriormente designado de “Acordo de Paris”. O plano de ação definido no Acordo de Paris inclui as seguintes medidas:

- Manter o aumento da temperatura média anual abaixo dos 2°C em relação aos níveis pré-industriais e limitar o aumento de temperatura em 1,5 °C até 2050;
- Cada país define os seus próprios planos de ação nacionais, designados por CDN (Contributos Determinados a nível Nacional), que devem ser readaptados a cada cinco anos;
- Todos os países devem apresentar os seus relatórios relativamente ao seu desempenho ao público e a outros governos, assegurando assim transparência universal;
- Os Estados-Membros da UE, assim como outros países desenvolvidos, devem prestar financiamento a países em desenvolvimento de forma a mitigar as emissões e criarem uma maior resiliência desses países aos efeitos das alterações climáticas. [2]

No mesmo ano foram ainda definidos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) numa cimeira da ONU em Nova Iorque, conhecida como a “Agenda de 2030”. Estes objetivos têm em vista erradicar a pobreza e apoiar o desenvolvimento económico, social e ambiental à escala mundial até 2030, colaborando assim com o Acordo de Paris [3].

No entanto, estima-se que todos os anos entram na economia mundial cerca de 100 bilhões de toneladas de materiais, porém, apenas 8.6% são reciclados na economia, havendo assim predominância de uma economia linear, cujo princípio de uso de recursos recai sob uma forma de “extração-produção-descarte”. De tal forma, no ano de 2020 a temperatura média global atingiu 1,1°C, quebrando novos recordes climáticos. Apesar dos CDNs e dos ODS implementados, é expectável que no final deste século a temperatura aumente em cerca de 3,2°C e, segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), um aumento de 1,5°C irá aumentar em grande escala a intensidade e a frequência dos impactos climáticos. Deste modo, para uma situação em

que se verifique um aumento de 3°C, é previsto que haja consequências meteorológicas extremas, como o caso de cheias e inundações, incêndios florestais e um aumento na insegurança alimentar às populações [4]. A figura 2.2 representa uma estimativa da evolução do aumento da temperatura média anual considerando a média de 1991 a 2020.

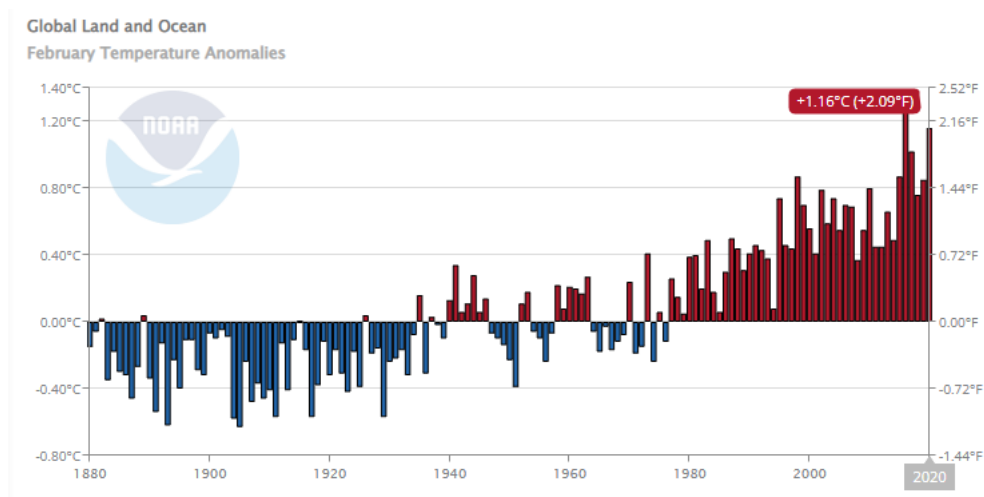


Figura 2.2: Aumento de temperatura média global entre 1880-2020 [5]

Por sua vez, as emissões de gases por efeito de estufa (GEE) têm tido um decréscimo lento ano após ano. Por exceção, em 2020 devido à pandemia de COVID-19 houve uma diminuição significativa relativamente ao ano anterior em cerca de 10%, dado que a maior parte da população mundial foi obrigada a realizar confinamento durante longos períodos de tempo. No entanto, é projetado que, se as medidas atuais se mantiverem, os objetivos para 2030 não serão alcançados (figura 2.3). Com um tempo de atuação cada vez mais curto, é necessário tomar ações mais extremas [4].

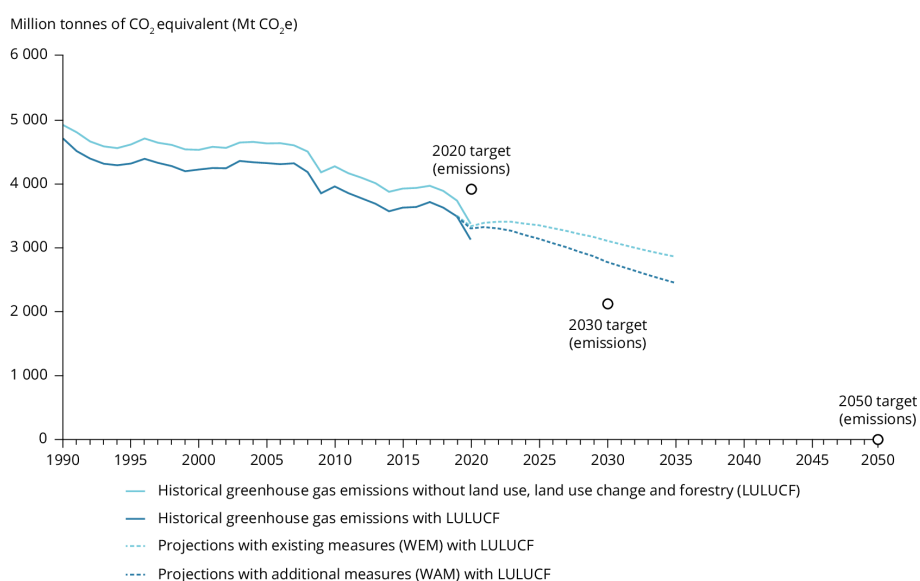


Figura 2.3: Projeção das emissões globais com e sem LULUCF ¹[6]

Neste sentido, em 2021 teve lugar a Conferência das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas em Glasgow, mais conhecida como COP26. Este encontro teve como finalidade assegurar um novo acordo entre todos os signatários do Acordo de Paris, estabelecendo novos CDNs para reduzir as emissões. Entre as novas iniciativas aprovadas e as iniciativas readaptadas, destacam-se:

- Fortalecimento dos compromissos para fornecer financiamento aos países em desenvolvimento de modo a os ajudar a combater as mudanças climáticas;
- Adoção do "Compromisso Mundial sobre o Metano";
- Revisão das regras sobre os aspetos operacionais do Acordo de Paris, posteriormente designadas de "Regras de Katowice". [7]

2.2 Necessidade Sociais

Para haver justiça ambiental é necessário haver justiça social. De modo que as metas sejam alcançadas, é indispensável que o plano de ação seja igualmente centrado na gestão de recursos, na população e no planeta. Desta forma, existem sete necessidades essenciais que devem ser garantidas a todos: habitação, nutrição, mobilidade, comunicação, serviços, consumíveis e saúde. Porém, muitas destas necessidades são responsáveis pela produção elevada de GEE, pelo que existe igualmente a imperatividade de se reduzir as emissões dos setores correspondentes.

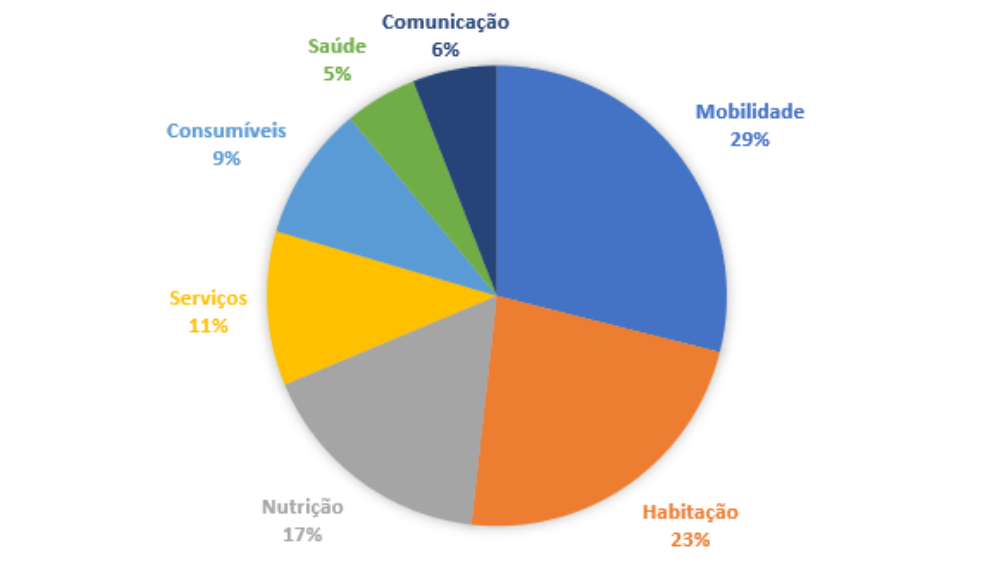


Figura 2.4: Distribuição das emissões pelas necessidades sociais [4]

¹LULUCF é utilizado para reportar todos os fluxos entre o uso do solo (crescimento e mortalidade da biomassa, corte de madeira nas florestas, impactos das alterações das práticas agrícolas nos solos cultivados, artificialização do solo, etc.) e a atmosfera. Os métodos de cálculo dessas emissões são definidos pelo IPCC.

Segundo os dados mais recentes, as atividades inerentes às necessidades de habitação, mobilidade e nutrição são as que apresentam uma maior percentagem de emissões, cerca de 70% no seu total. Deste valor, 29% corresponde unicamente à mobilidade, essencialmente devido à produção de transportes e à queima de combustíveis fósseis provenientes do seu uso. Por sua vez, 23% das emissões são provocadas pela construção de habitações, bem como o uso de energia para iluminação e aquecimento das mesmas. Os restantes 17% deste grupo são relativos à necessidade de nutrição, isto é, aos processos da cadeia de valor na produção de alimentos (cultivação, processos industriais, etc.).

As necessidades de comunicação, serviços, consumíveis e saúde, representam os restantes 30% das emissões, resultantes da atividade em questão, como, por exemplo, a produção de um dado consumível ou na utilização de energia nos serviços educacionais e comerciais [4].

Em suma, enquanto se tenta assegurar que estas necessidades sociais sejam acessíveis a toda a população mundial, há que haver igualmente um esforço em se reduzir as suas emissões de GEE, principalmente, nas atividades associadas às necessidades de habitação, mobilidade e nutrição.

2.3 Transição para uma Economia Circular

Com as questões observadas nos pontos anteriores, verifica-se que, mais do que nunca, há uma necessidade de gerir melhor os recursos e limitar o seu consumo. Com efeito, a implementação de uma Economia Circular (EC) apresenta ser a melhor alternativa para gerir os recursos e conseguir quebrar a crença atual que, para obter um alto crescimento económico é necessário haver elevado consumo de recursos.

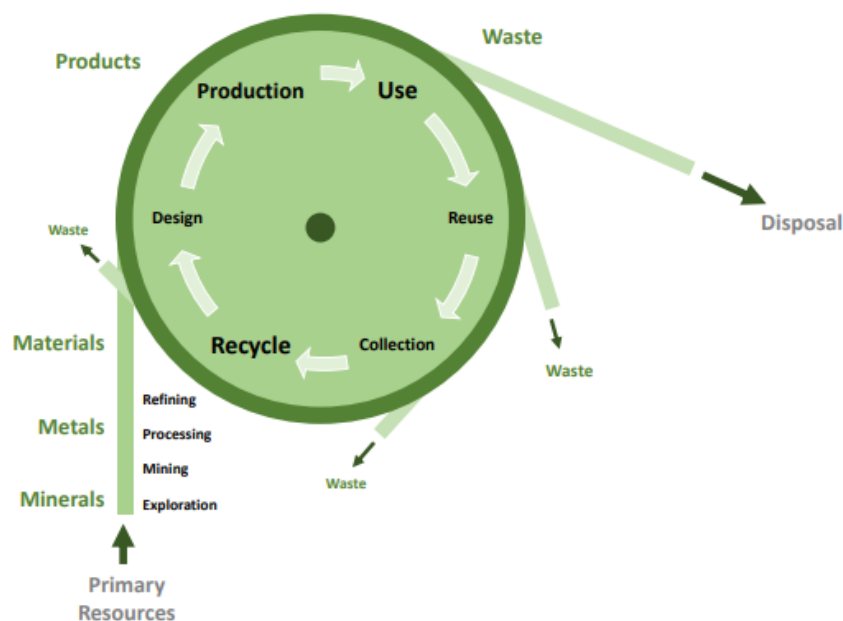


Figura 2.5: Esquema simplificado da EC aplicada a um processo industrial [1]

A premissa da EC é “fazer mais com menos e de forma mais eficiente”, assentando no princípio de redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais, com redução do uso de recursos. Além da eficiência da gestão de recursos, a EC permite também diminuir o impacto no uso de recursos-virgens, diminuir a poluição e promover a regeneração dos ecossistemas (figura 2.5). Comparando com o sistema atual, a EC apresenta uma visão mais centrada no planeta e nas pessoas.

Realizar uma transição circular não é tarefa fácil dada a complexidade de todos os sistemas envolvidos. Por norma é necessário responder à seguinte questão: “De que forma os recursos serão colocados no seu destino, de forma a obter bons resultados sociais e ambientais através de um sistema de abastecimento?”. A título de exemplo, diferentes categorias de transporte (rodoviário, ferroviário, etc.), podem gerar resultados sociais semelhantes, mas resultados ambientais muito diferentes dada a diferença no tipo e quantidade de material que cada um exige. Não existe uma resposta única e universal e, de forma a reduzir esta complexidade e inspirando no trabalho de Hasse et al. [8], foram definidos dois objetivos e quatro estratégias (Tabela 2.1) que a EC pretende estabelecer e tomar como ponto de partida.

Tabela 2.1: Quadro resumo das estratégias e objetivos da EC

Objetivos:	
1.	Minimizar a extração de recursos da litosfera (camada mais externa da terra) e regenerar a produção e extração de biomassa.
2.	Minimizar o desperdício e perda de materiais, isto é, todos os materiais devem ser recuperados, idealmente sem degradação e perda de qualidade; Evitar emissões para a atmosfera e a dispersão de resíduos para a água ou a terra.
Estratégias:	
1.	<i>Narrow Flow</i> - Usar menos: Reduzir a quantidade de material usado ou das emissões de GEE através de medidas como: aumento das taxas de utilização /compra de materiais, modelos de aluguer compartilhados, produtos ou edifícios multifuncionais, aumento da eficiência energética e etc.
2.	<i>Slow Flows</i> - Usar por mais tempo: o uso de recursos é otimizado à medida que a vida útil e funcional dos bens é estendida. Na prática: uso de material durável, ações de reparo, remanufatura, recondicionamento, renovação e remodelação.
3.	<i>Regenerate Flows</i> - Tornar mais “verde”: Substituição de combustíveis fósseis, poluentes e materiais tóxicos por fontes regenerativas (material regenerativo, energia renovável, agricultura regenerativa), aumentado e preservando os ecossistemas naturais.
4.	<i>Cycle Flows</i> - Reutilização: Otimização da reutilização de materiais ou produtos no final da vida útil, facilitando um fluxo circular dos recursos (implementação de uma cadeia de valor circular) através de: design para reciclabilidade (técnica e biológica), design para desmontagem, reciclagem, transformação dos resíduos em energia.

Se as estratégias forem implementadas, serão exigidos menos recursos e materiais para satisfazer as necessidades sociais. Consequentemente, os materiais utilizados terão tempo de vida útil

maior e poderão ser reaproveitados de forma mais eficaz e com um efeito menos pejorativo no meio ambiente.

Com o intuito de reforçar a EC a nível mundial, ao longo dos últimos anos têm surgido diversos planos e incentivos, que surge reforçado no Pacto Ecológico Europeu ou ainda o recente REPowerEU. Estes planos serão aprofundados e detalhados posteriormente. Contudo, dada as diferenças socioeconómicas dos diferentes países há que, numa primeira instância, avaliar quais as prioridades de cada um deles e quais as ações em comum que devem ser aplicadas de modo a promover uma EC.

2.4 Implementação da Economia Circular

O orçamento global tem-se priorizado em aumentar o consumo dos países mais ricos, fraccassando em retirar parte da população mundial da pobreza. No entanto, a ironia intensifica-se considerando que os países menos desenvolvidos e/ou com setores económicos mais pobres e vulneráveis, que apesar de terem uma menor responsabilidade no panorama atual das emissões, serão os mais frágeis aos impactos da degradação do clima. Para efeitos ilustrativos, os países mais ricos (10%) são responsáveis por cerca de 48% das emissões de CO₂, enquanto os mais pobres, correspondendo a 50% da população mundial, são responsáveis por apenas 7% das emissões.[4]

Deste modo, é possível atribuir um de três perfis diferentes a cada país, considerando o seu desenvolvimento social e económico:

- *Build Countries* — Países com dificuldade de atender às suas necessidades básicas, como a educação e a saúde, e com baixo Índice de Desenvolvimento Humano (IDH). Apresentam uma economia orientada essencialmente para a biomassa e são ricos em recursos, porém são importadores de combustíveis fósseis e de produtos acabados e semiacabados. Neste perfil destacam-se essencialmente países africanos (Nigéria, Etiópia...) e asiáticos (Índia, Filipinas...);
- *Grow Countries* — Apresentam um setor industrial em expansão e lideram o caminho quando se trata de construção e crescimento económico. Apresentam igualmente a maior taxa de extração de minerais não metálicos (68%), sendo considerados como os “bancos” de recursos da economia global. A sua rápida industrialização e expansão da classe média ocorreram simultaneamente com a melhoria dos padrões de vida. Destacam-se os países da América Latina, o Leste Europeu ou ainda Ásia Central;
- *Shift Countries* — Países no centro da transição para uma economia circular. Apesar de apresentarem uma minoria da população global, produzem 43% das emissões. São igualmente responsáveis por um terço (31%) de toda a extração dos recursos globais. O seu consumo de recursos é dez vezes superior do que os *Build Countries*. [4]

Apesar das divergências entre as nações, é possível distinguir quais as intervenções da EC que serão mais adequadas, considerando as necessidades comuns, como por exemplo:

- Dar preferência à produção de biomassa sustentável;
- Mudar os modelos de negócio nos diversos setores;
- Tornar a mobilidade limpa;
- Melhorar a gestão do desperdício;
- Incentivar a incorporação e evolução da tecnologia nos diversos setores;

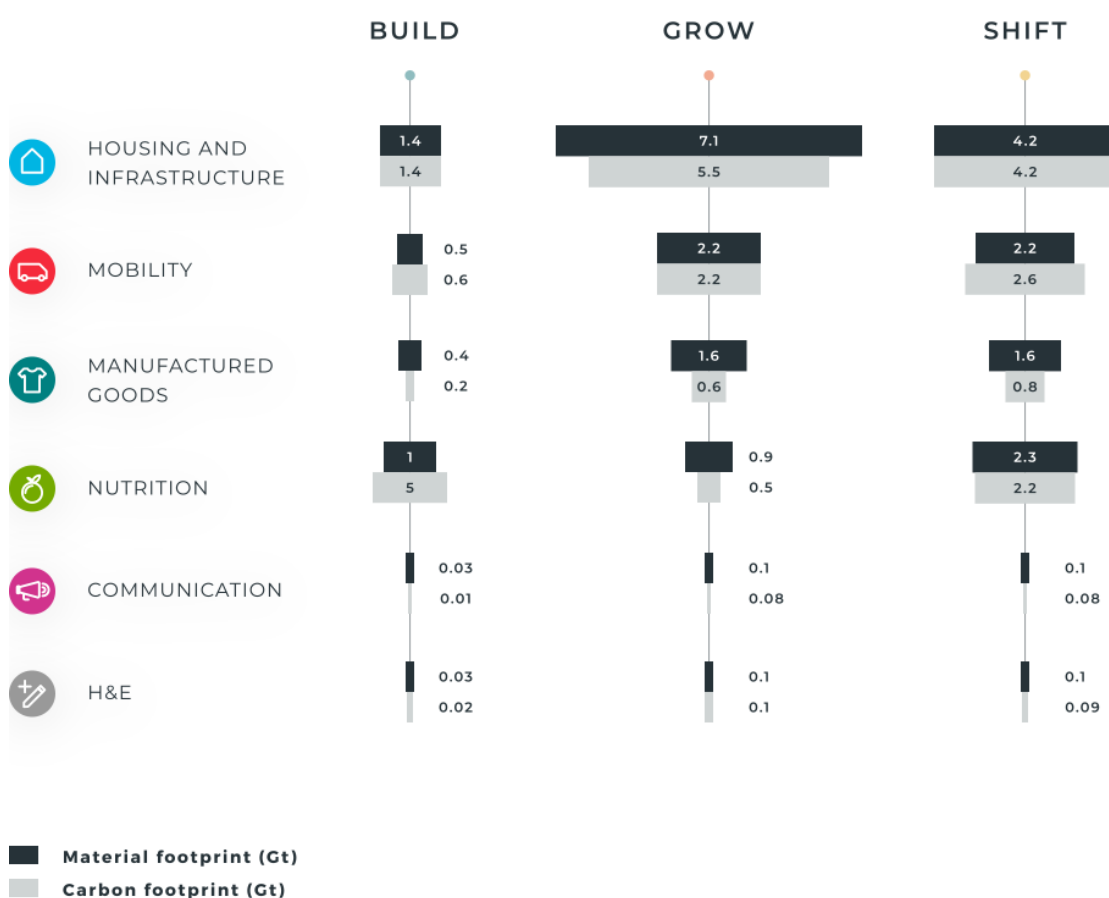


Figura 2.6: Emissões de cada perfil por cada necessidade social [4]

Todavia cada perfil terá de ter medidas próprias e exclusivas entre si, que devem ser refletidas nos CDNs. No caso dos *Build Countries*, dado que se encontram no início do seu crescimento económico, social e urbano, encontram-se numa posição favorável de aplicar medidas e legislações nos mais variados setores de modo a não cometer os mesmos erros que os *Grow Countries* e *Shift Countries* cometeram no passado. Medidas das quais se destacam a implementação e regulação do planeamento urbano, assim como legislações contra a desflorestação e proteção do património natural. Será igualmente de todo o interesse em que sejam definidas leis mais severas para que as

multinacionais (geralmente de *Shift Countries*) assumam a responsabilidade dos impactos nas cadeias de valor mundiais, com foco na exportação de resíduos para os países menos desenvolvidos. Considerando que, grande parte destes países apresentam elevada instabilidade e corrupção política, é necessário estabelecer ferramentas que permitam uma maior transparência e colaboração mundial. Por sua vez, os países mais desenvolvidos devem prestar auxílio e ajuda humanitária de modo a facilitar o crescimento sustentável.

De forma semelhante aos *Build Countries*, é de todo o interesse que em *Grow Countries* seja aplicada legislação rigorosa em diversos setores, incluindo uma reformulação do planejamento urbano e do setor agrícola, de exploração de materiais não metálicos e medidas de punição contra a desflorestação e queimadas ilegais. Além disso, encontram-se numa posição favorável de serem estabelecidos contratos públicos para uma reutilização eficiente dos materiais, assim como de exploração e desenvolvimento de novas tecnologias, sendo estes fatores-chave para a transição circular.

Considerando que *Shift Countries* têm um crescimento mais lento em diversos setores, dada a sua elevada maturidade, a prioridade para a transição de uma economia mais sustentável e circular imerge em alcançar, por legislação e políticas, o que os mercados não conseguiram até então, como, por exemplo: abolir os subsídios de combustíveis fósseis, impor requisitos rigorosos de eficiência energética, medidas mais sustentáveis na área de construção civil e regulamentar o uso de fertilizantes e pesticidas na silvicultura. Outra prioridade será mudar as atitudes, percepções e crenças da população relativas ao desenvolvimento sustentável, tanto a nível nacional como internacional. À semelhança de *Grow Countries*, deve haver um investimento nos contratos públicos e no desenvolvimento de novas tecnologias de forma a facilitar a transição para uma EC, assim como ações de apoio aos países mais necessitados.

Como previamente referido, em 2020 apenas 8,6% da economia mundial é circular, havendo assim uma predominância de uma economia linear. Porém, tem-se verificado uma tendência de circularidade decrescente dado que em 2018 este valor rondava os 9,1%. A boa notícia é que para atingir os objetivos apresentados no subcapítulo 2.1, bastará aumentar a circularidade em cerca de 8,4%, quase o dobro da quota atual. O tempo para agir é cada vez mais curto, mas os eventos ocorridos em 2020 mostrou que, por mais que a implementação de uma economia circular e a mitigação do clima seja um problema complexo e difícil, a cooperação internacional por um objetivo comum não é impossível e consegue superar todas as expectativas [4].

2.5 Planos que promovem a Economia Circular

Com a EC a ocupar cada vez mais um papel fundamental para atingir os objetivos impostos na Agenda de 2030 e no Acordo de Paris, ao longo dos últimos anos têm surgido diversos planos de ação a nível europeu e nacional que, direta ou indiretamente, promovem a aplicação de medidas circulares. Estes planos sugerem como via de acelerar a intervenção nas alterações climáticas e simultaneamente fazer crescer uma economia debilitada pela pandemia, mas garantindo que essa alavanca para a economia é verde. Para além dos CDNs já mencionados, destacam-se igualmente:

Pacto Ecológico Europeu, a Missão das 100 cidades com impacto neutro no clima até 2030 e o Plano de Recuperação e Resiliência (PRR). Mais recentemente o REPowerEU veio reforçar as medidas e torna mais ambiciosos os esforços com via de combater a dependência europeia do gás Russo.

Estes planos não apresentam apenas medidas específicas, mas igualmente objetivos que devem ser cumpridos por todos os Estados-Membros, assim como incentivos financeiros que iram ajudar a cumprir tais objetivos. Com os incentivos, cada país através de uma entidade competente irão criar as suas próprias medidas tendo em conta o seu estatuto socioeconómico.

2.5.1 Pacto Ecológico Europeu

Em 2020, a Comissão Europeia aprovou um novo conjunto de iniciativas políticas: o Pacto Ecológico Europeu. Este plano ambicioso tem como objetivo principal tornar a Europa como o primeiro continente com emissões neutras até 2050. O Pacto Ecológico Europeu visa impulsionar o uso eficiente de recursos, transacionar para uma economia limpa e circular, deter as mudanças climáticas, reverter a perda de biodiversidade e reduzir a poluição, abrangendo assim várias áreas políticas e diversos setores (figura 2.7), entre os quais, o setor energético, de transporte, agricultura e indústria [9].

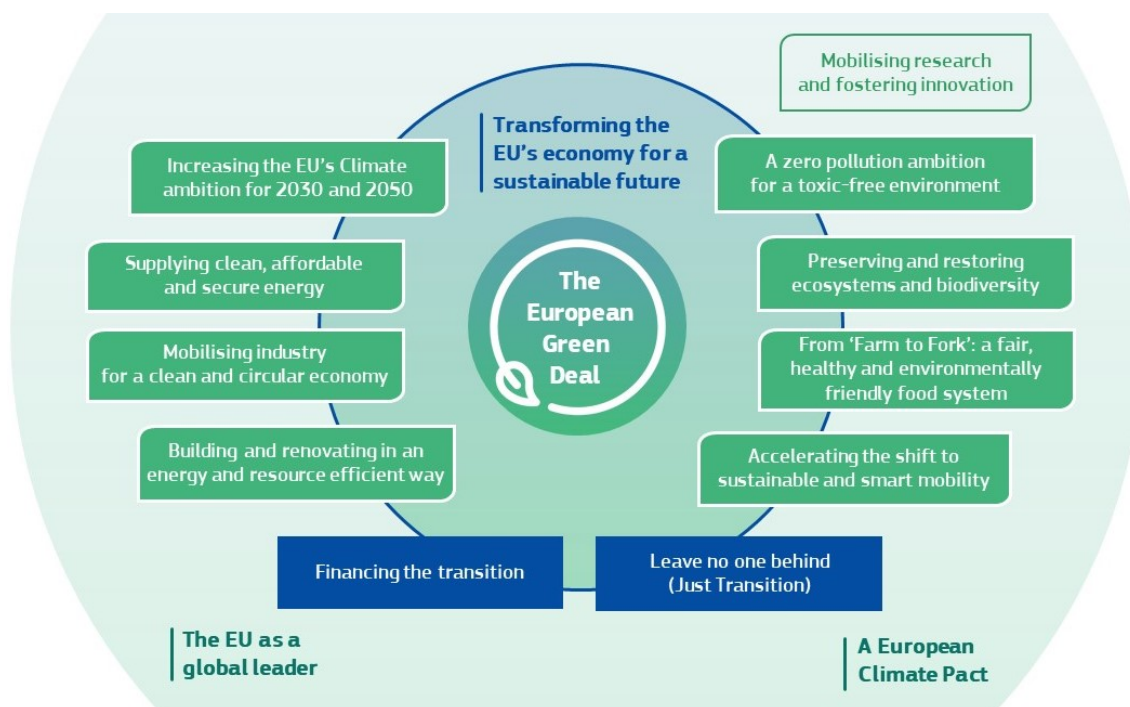


Figura 2.7: Áreas políticas abrangidas pelo Pacto Ecológico Europeu [9]

Uma das áreas presentes neste plano é o CEAP II — *Circular Economy Action Plan II*. Este pacote foi adotado de modo a aumentar a competitividade global, promover o crescimento económico sustentável e gerar novos empregos. As medidas presentes neste pacote abrangem todo o ciclo de vida dos produtos, desde a produção e consumo, até à gestão de resíduos e do mercado

de matérias-primas secundárias. Com o objetivo de manter os recursos nos ciclos económicos durante o maior tempo possível, as principais cadeias de valor abordadas neste plano são dos recursos com maior potencial de circularidade, entre os quais os plásticos, os veículos e as baterias, têxteis e alimentos [10].

Este plano é muitas vezes designado como o “pai” dos planos sustentáveis, dado que, todos os planos criados posteriormente tiveram-no como referência (inclusive os que serão mencionados neste capítulo). Além disso, os planos já existentes foram readaptados de modo a se interconectarem com o Pacto Ecológico Europeu [11, 12].

2.5.2 100 cidades com impacto neutro no clima até 2030

O programa desenvolvido pela UE “Horizonte Europa” tem uma nova missão intitulada “100 cidades com impacto neutro no clima até 2030”. Esta missão, lançada em 2021, apoiará 100 cidades europeias na sua transformação sistémica para a neutralidade climática, fazendo estas cidades serem as pioneiras da inovação urbana.

Em termos quantitativos, as áreas urbanas consomem cerca de 65% da energia produzida mundialmente, sendo responsáveis por mais de 70% das emissões de CO₂. Nas cidades existe a possibilidade de serem aplicadas estratégias de descarbonização nos mais variados setores, incluindo no setor energético, industrial, de transporte e de reabilitação de edifícios. Neste plano é indicado que, através da cooperação da Comissão Europeia, dos municípios, das autoridades nacionais e até mesmo dos cidadãos, será urgente atuar em duas vertentes: na reabilitação energética dos edifícios e na mobilidade sustentável.

Esta missão do “Horizonte Europa” encontra-se totalmente ancorada com o Pacto Ecológico Europeu e, durante o período 2022–2023, serão investidos cerca de 360 milhões de euros para iniciar o caminho rumo à neutralidade climática até 2030. Além do objetivo da descarbonização, há ainda a intenção de tornar as cidades mais circulares, principalmente através da atuação no setor da indústria. Existem três cidades portuguesas selecionadas para este programa: Porto, Lisboa e Guimarães [13].

2.5.3 REPowerEU

Mais recentemente, a 8 de março de 2022, a Comissão Europeia apresentou uma nova iniciativa: REPowerEU. Como referido trata-se de resposta à invasão Russa na Ucrânia, sendo que este plano visa alcançar a independência dos combustíveis fósseis russos até 2030, principalmente do gás. A presidente da Comissão Europeia, Ursula von der Leyen, afirmou que “temos [a UE] de nos tornar independentes do petróleo e do gás russo. Não podemos depender de um fornecedor que nos ameça explicitamente.” Em termos quantitativos, as importações de gás provenientes da Rússia representam cerca de 45% do total do valor das importações para a UE. Além de reduzir a dependência da UE dos combustíveis fósseis russos, usados como armas económicas e políticas e que custam aos contribuintes europeus cerca de 100 bilhões de euros por ano, o plano também visa combater a crise climática.

Os objetivos serão enfrentados através de quatro principais ações:

- **Poupança de energia** — Face à crise climática atual, esta é a forma mais rápida e económica. Ao se conseguir reduzir o consumo de energia (por exemplo, através do aumento da eficiência dos edifícios), irá diminuir significativamente as faturas das empresas e dos agregados familiares a curto e a longo prazo, assim como as importações de combustíveis fósseis russos. A par com o aumento de renováveis no mix energético europeu, irá permitir haver uma melhor gestão e reduzir o consumo dos recursos (promovendo uma EC). Deste modo, a Comissão Europeia propôs um reforço das medidas de eficiência energética a longo prazo, com um aumento de 9% para 13% da meta de eficiência energética vinculado no pacote "*Fit for 55*"² presente na legislação do Pacto Ecológico Europeu;
- **Diversificação das importações de energia** — Com apoio dos Estados-Membros, a Comissão Europeia pretende criar uma plataforma energética da UE para a aquisição conjunta voluntária de gás, GNL e hidrogénio. Deste modo, serão criadas reservas mais diversificadas de permitirá atenuar o aumento dos preços de energia e melhorar a gestão de recursos;
- **Substituição dos combustíveis fósseis e aceleração da transição da Europa para as energias limpas** — De modo a colocar um fim mais rápido à dependência de combustíveis fósseis russos e, a prazo, reduzir as importações e baixar os preços de eletricidade, serão introduzidas em grande escala as energias renováveis para a produção de eletricidade na indústria, nos edifícios e nos transportes. A Comissão Europeia propõe aumentar a meta da Diretiva Energias Renováveis para 45% até 2030, fixada em 40% na proposta de 2021. Esta ação será maioritariamente através da instalação de energia solar fotovoltaica (nas coberturas dos edifícios), da difusão da energia eólica (destacando-se eólica *offshore*) e da importação de hidrogénio verde. Além disso, de modo a aumentar a eficiência no setor dos transportes e acelerar a transição para veículos com emissões zero, será futuramente apresentado um pacote designado de *Greening of Freight Package*. De salientar que este pacote irá abranger o transporte marítimo e de aviação conforme as regras do *Emissions Trade System* (ETS), que até ao momento não era considerado. A Comissão irá igualmente ponderar uma iniciativa legislativa para aumentar a quota de veículos elétricos;
- **Investimento inteligente** — Com os objetivos propostos, o investimento do REPowerEU será utilizado de forma gradual até 2027. Deste modo, o investimento será realizado por etapas considerando a prioridade dos objetivos. Assim, numa fase inicial o investimento irá priorizar o reforço das infraestruturas, mais concretamente da Rede Transeuropeia de Energia (RTE-E). Com este reforço é estimado que a UE irá poupar anualmente, até 2030, cerca de 80 mil milhões de euros em despesas de importação de gás, 12 mil milhões em despesas de importação de petróleo e 1,7 mil milhões em despesas de importação de carvão.

²"Fit for 55" é um pacote presente no Pacto Ecológico Europeu, em que apresenta um conjunto de propostas destinadas a rever/atualizar a legislação da UE. O nome provém da meta da UE de reduzir as emissões líquidas de GEE em pelo menos 55% até 2030.

Apesar de as metas terem um carácter europeu, a execução de muitas medidas continuará a ser responsabilidade de cada Estado-Membro, em que para cada um serão exigidos reformas e investimentos específicos. Deste modo, parte do orçamento do REPowerEU será utilizado para dar suporte aos planos de ação e resiliência de cada país. Estes planos já criados devido à pandemia de COVID-19, terão de ser atualizados tendo em conta as novas diretivas presentes no REPowerEU.

Estas ações irão revolucionar a estrutura do sistema energético da UE, porém para que tal se verifique é necessária uma coordenação eficaz entre as medidas europeias em matéria de regulamentação e a evolução das infraestruturas, bem como investimentos e reformas nacionais e uma diplomacia energética conjunta [14, 15, 16].

2.5.4 Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal

Influenciado pela estratégia europeia, em dezembro de 2017, Portugal criou uma iniciativa nacional para a EC através do plano “Liderar a Transição — Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal” (PAEC), aplicado entre 2017–2020. É previsto que seja realizada uma atualização do PAEC, de modo a se interligar com o Pacto Ecológico Europeu, porém tal ainda não foi concretizado.

O PAEC não estabelece regras específicas dado que o seu principal objetivo é contribuir para a concretização dos objetivos especificados nos diferentes planos e estratégias, isto é, contribuir para a implementação dos objetivos do Acordo de Paris e da Agenda de 2030. Neste plano são, no entanto, definidos três “objetivos macro” que são igualmente acompanhados por indicadores a quantificar para ser possível monitorizar os progressos:

- Valorizar o território (Indicador — reduzir o consumo de energia primária);
- Promover a eficiência do uso de recursos (Indicador — aumentar a incorporação de resíduos na economia);
- Contribuir para a sustentabilidade (Indicador — aumentar a eficiência hídrica).

A nível “micro”, este plano atribui parte da responsabilidade aos municípios, para que o foco seja essencialmente em tornar as cidades e empresas mais circulares e com cooperação/simbiose industrial.

Apesar da introdução deste plano, nem tudo são boas notícias. A produção de resíduos em Portugal tem tendência a aumentar, a qual não é compensada pelos níveis de reciclagem observados. Em 2019, a produção de resíduos foi muito inferior à média europeia, porém a cota de reciclagem portuguesa é muito baixa, cerca de 28,9%, em contraste com os 47,7% da média europeia. Por outro lado, a utilização de “material circular” em Portugal (2,3%) foi igualmente abaixo da média europeia (11,8%) [17].

2.5.5 Plano de Recuperação e Resiliência

A pandemia de COVID-19 provocou graves impactos na economia mundial e, deste modo, o Conselho Europeu criou um instrumento comunitário estratégico a ser executado até 2026: “Next Generation EU”. Enquadrado neste instrumento de carácter temporário, encontra-se o “Plano de Recuperação e Resiliência” (PRR). O PRR é um programa nacional que visa implementar um conjunto de investimentos e reformas que permitirá o país retomar o crescimento económico [18].

Este plano encontra-se organizado em três pilares: Resiliência, Transição Climática e Transição Digital. A Transição climática encontra-se diretamente ligada ao Pacto Ecológico Europeu e à Lei Europeia do Clima, dado o compromisso de Portugal em alcançar a neutralidade carbónica até 2050. Do montante global do PRR, cerca de 18% será utilizado para reduzir as emissões de carbono nos setores mais relevantes (mobilidade e indústria) e na incorporação das energias renováveis. Apesar de não haver uma estratégia dedicada exclusivamente à EC, esta encontra-se representada em duas componentes:

- Componente C11: Descarbonização da Indústria — Os investimentos e as reformas contribuem para acelerar a transição para uma economia neutra em carbono e, ao mesmo tempo, para promover a competitividade da indústria e das empresas, por via da sua descarbonização, redução do consumo de energia e da promoção de fontes endógenas de energia;
- Componente C12: Bioeconomia Sustentável — As reformas pretendem desenvolver a bioindústria circular e sustentável, através de inovação na cadeia de valor e nos processos; [18]

Além disso, no PRR ainda está inserido a “Estratégia Comum de Desenvolvimento Transfronteiriço Espanha-Portugal” que explora oportunidades conjuntas entre os dois países, entre as quais:

- Hidrogénio verde;
- Exploração de recursos minerais estratégicos e planeamento do seu consumo;
- Cadeia de valor do veículo elétrico, com foco em estudos de melhoria da cadeia de valor das baterias;
- Redes 5G;
- Empreendedorismo digital.

Apesar de não ser diretamente referenciada, é notável que a EC se encontra presente nesta estratégia. De referir que, devido à adoção do novo plano “REPowerEU”, o PRR terá futuramente de ser readaptado de modo a seguir as novas diretrizes [16]. Além disso, este plano poderá vir a ser alargado a outras áreas de interesse, entre as quais a energia eólica *offshore* e as energias marinhas [18, 19].

2.6 Conclusões e Considerações

Os dados mais recentes relativamente ao aumento da temperatura média global e das projeções das emissões de GEE, permitem concluir que, as atuais ações de minimização dos impactos ambientais não são suficientes para atender aos objetivos estabelecidos pelas Nações Unidas para 2030. De modo a contrariar esta tendência, ao longo dos últimos anos têm surgido uma série de planos e incentivos, como, por exemplo, o Pacto Ecológico Europeu, o Plano de Recuperação e Resiliência e, mais recentemente, o REPowerEU. Nestes planos é visível que, a transição da atual economia linear para uma economia mais verde e circular é uma prioridade.

A implementação da Economia Verde, e em particular a sua vertente de Economia Circular (EC), a um sistema económico e industrial é de facto a solução ideal para mitigar as alterações climáticas e promover um futuro mais sustentável. Através da instauração de medidas e processos de produção tecnologicamente inovadores, a EC irá permitir reduzir a extração e o consumo de recursos virgens, promovendo sempre a reconversão e a reutilização dos resíduos, incentivando igualmente a utilização de energias renováveis em toda a cadeia de valor do sistema em questão. Contudo, não existe uma solução única para transacionar de um modelo económico linear para um modelo mais circular visto que, cada aplicação industrial difere entre si e, por norma, encontram-se dependentes de outros sistemas complexos. De igual forma, cada país terá medidas circulares próprias e exclusivas visto que cada território apresenta prioridades socioeconómicas diferentes. Em suma, cada sistema deve ser estudado em detalhe com intuito de se conhecer quais os seus problemas e de que modo poderão ser aplicadas ações de forma a impulsionar a EC.

Foi igualmente possível averiguar que, atualmente, o setor da mobilidade apresenta ser o que produz mais emissões ao longo da sua atividade. Assim, dada a importância de se reduzir as emissões neste setor, como caso de estudo, será avaliado o ciclo de vida de um veículo elétrico e, posteriormente, serão determinadas as ações de circularidade que poderão ser aplicadas.

Capítulo 3

Caso de Estudo: Ciclo de Vida de um Veículo Elétrico

O uso de transportes e a sua produção apresenta ser um dos maiores problemas mundiais que afeta, direta e indiretamente, o meio ambiente e a vida humana. Como verificado no capítulo anterior, o setor da mobilidade é responsável por cerca de 29% das emissões de GEE a nível mundial e, segundo o *United States Environmental Protection Agency* (EPA), 90% dessas emissões deve-se ao uso de combustíveis fósseis (gasolina e diesel), associados a veículos de passageiros ligeiros [20]. Sem uma boa rede de transportes será impossível executar todas as atividades humanas existentes e, com um crescimento acentuado da população, da urbanização e do setor económico, a procura de recursos para este setor é igualmente cada vez mais exigente.

Assim, considerando este setor como o mais poluente entre os demais, e um dos mais relevantes para atividade humana, é então de todo o interesse que este ramo sofra uma revolução em toda a sua cadeia de valor. Apesar de tecnicamente o uso de filtros e de conversores catalíticos permitir reduzir as emissões de CO₂, esta solução não é definitiva nem viável para responder a todos os objetivos propostos relativos às emissões de GEE, e muito menos reduzir o uso de recursos.

Deste modo, um dos caminhos mais promissores para reduzir as emissões de GEE na mobilidade passa por se transacionar para veículos alimentados por energias renováveis com baixo teor de carbono ou por biocombustíveis. Nesta perspetiva, a adoção de veículos elétricos (VEs) apresenta, na teoria, ser uma boa alternativa relativamente aos atuais veículos de combustão interna (VCIs), havendo inclusive incentivos governamentais, tanto a nível nacional (alguns dos quais incluídos no NDCs), como internacional.

O termo "VE" abrange um conjunto de diferentes tipos de veículos incluindo: elétrico a bateria (VEB), Híbrido Convencional (VEH), Híbrido *Plug-in* (VEHP) e Elétrico a célula de combustível.

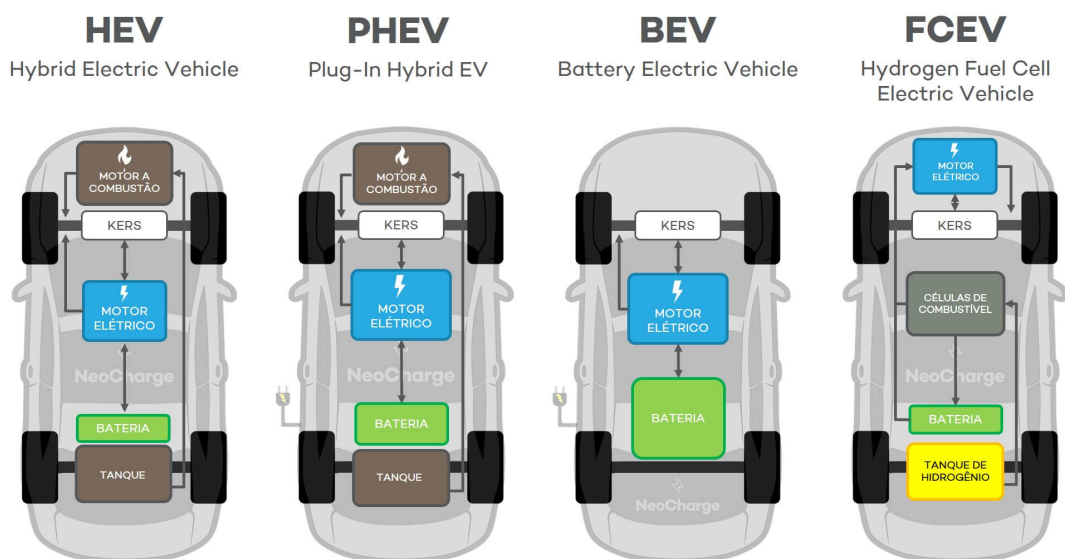


Figura 3.1: Princípio de funcionamento dos VEs [21]

Como verificado pela figura anterior, qualquer tipo de VEs depende fortemente de baterias recarregáveis e, atualmente a preferência recai no uso de baterias de lítio. O principal fator que leva a se optar por esta bateria deve-se ao facto de, Comparando com as outras tecnologias existentes, as baterias de lítio apresentam uma maior relação entre peso e potência de carregamento. Contudo, verifica-se um aumento cada vez mais significativo na adoção de VEs e, conseqüentemente, na procura e necessidade de grandes unidades de armazenamento, provocando assim um aumento intensivo da extração de lítio para a produção de baterias. Todavia, a extração de lítio produz elevadas emissões, aspeto que é geralmente ignorado. Por outro lado, ainda pouco se sabe quais os verdadeiros impactos da extração, uso e descarte de lítio, tornando complicado avaliar e comparar os impactos ambientais dos VEs com os dos VCIs. Aparte dos problemas relativos às emissões, existem ainda questões relacionadas com a localização geográfica e ambiente geopolítico das reservas de lítio que torna este tema ainda mais complexo.

Ao longo dos últimos anos tem-se verificado um crescimento lento de estudos e publicações relativas a VEs. O problema intensifica-se sob o facto de não haver, na maioria dos casos, cooperação entre as entidades que realizam tais estudos. Por outro lado, muitos deles debruçam-se sobre fases diferentes da cadeia de valor, dificultando a avaliação de possíveis situações de "causa-efeito".

Nos subcapítulos seguintes será alvo de estudo todo o ciclo de vida dos VEs. Neste contexto, o ciclo de vida será dividido em quatro fases, como representado na figura 3.2.

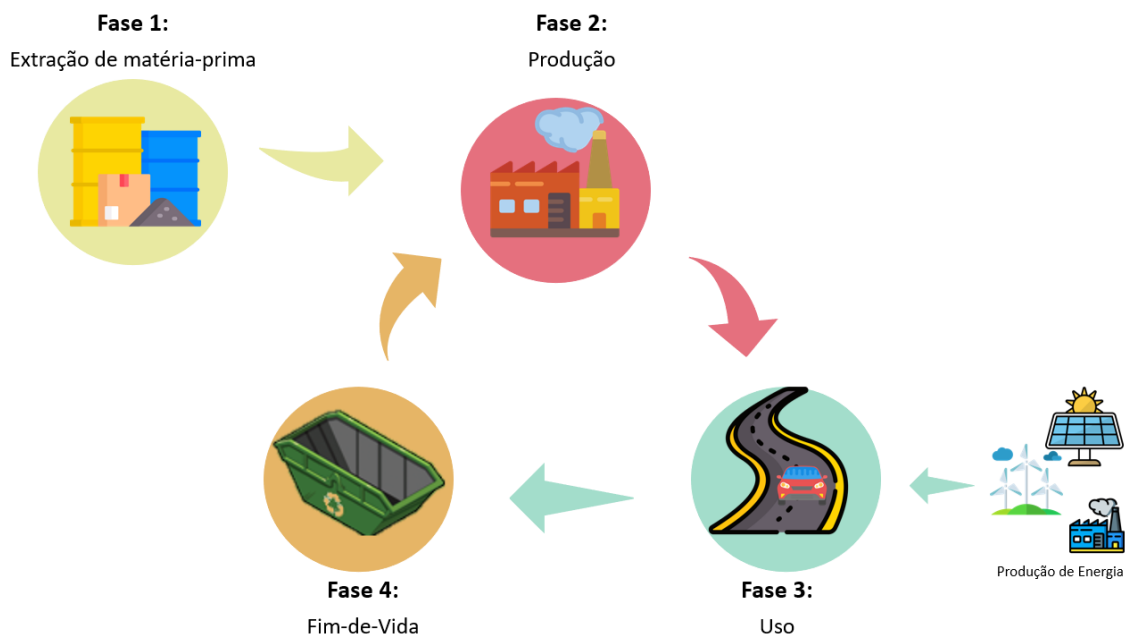


Figura 3.2: Ciclo de vida de um VE

Após a realização do estudo de cada uma das fases do ciclo de vida do VE, serão identificadas medidas que direta ou indiretamente irão contribuir para o aumento da EC no setor. Neste sentido, os pontos-chave deste estudo inicial será responder algumas questões, tais como:

- A produção de VEs é mais poluente que de VCIs?
- A produção de baterias de VEs causa muitas emissões? Se sim, os VEs são uma boa alternativa aos atuais de combustão?
- É possível substituir o uso de matérias-primas críticas na constituição das baterias e dos veículos?
- A extração de lítio emite muitas emissões para o meio ambiente?
- Que medidas podem ser aplicadas para tornar os VEs e a produção das baterias mais sustentáveis?
- Sendo necessária energia elétrica para carregamento das baterias, que impactos pode ter um VE em países com diferentes perfis?

Por simplificação, ao longo deste documento foi admitido que o termo "VE" se refere a um veículo elétrico a bateria, e o termo "VCI" a um veículo de combustão interna a gasolina, exceto em caso de indicação em contrário.

3.1 Fase 1: Extração de matérias-primas

3.1.1 Materiais constituintes dos veículos elétricos

A produção de veículos requer uma quantidade elevada de matérias-primas, tanto para elétricos como para de combustão. Comparando os VEs com os VCIs, as principais diferenças de uso de matérias-primas surgem na bateria, nos componentes de eletrônica de potência e no motor elétrico dos VEs. De acordo com o grupo T&E (*Transport and Environment*), um VE necessita em média quatro vezes mais de metais (tais como o cobre, alumínio e ferro) que um VCI, destacando-se igualmente as "matérias-primas críticas"(CRMs) [22].

Atualmente, os materiais necessários para a construção dos corpos dos VEs e dos sistemas auxiliares, são, na sua grande maioria, os mesmos que são usados para VCIs e em quantidades semelhantes. Porém, em alguns casos, sendo fundamental aumentar a autonomia e alcance dos VEs, é necessário recorrer a materiais mais leves como, por exemplo, o alumínio e fibra de carbono, aumentando significativamente o uso de materiais. A este processo designa-se por *lightweighting*.

Tabela 3.1: Principais matérias-primas dos VEs

Parte do veículo	Matérias-primas
Corpo do veículo	Aço ; Alumínio; Plástico; Fibra de Carbono
Eletrônica de Potência	Cobre; Alumínio;
Bateria (de Lítio)	Grafite; Lítio;; Cobalto, Níquel; Alumínio; Ferro; Cobre; Aço;
Motor Elétrico	Neodímio; Disprósio; Preseodímio; Cobre; Ferro; Alumínio

Nota: CRMs identificadas a verde

Em 2021, Simon Michaux [1] publicou um relatório sobre a EC aplicada à gestão de recursos. Neste relatório foi descrito que a tecnologia automóvel evolui muito rapidamente, tornando cada vez mais complexa e cara. Deste modo, e com a necessidade de se continuar a obter melhores desempenhos dos veículos (tanto de VCIs como de VEs), existe um esforço crescente em haver melhores infraestruturas e matérias-primas com um maior grau de pureza. Aliando com o objetivo da UE de se realizar a substituição completa de VCIs por VEs até 2050, é muito pouco provável que, até então, se realize a substituição das matérias-primas dos veículos por outras alternativas. O autor afirma ainda que “(...) é impossível substituir um sistema industrial [automobilístico] complexo que levou mais de um século para ser devidamente construído, por outro em poucas décadas”. É ainda referido que a esperança para esta fase recai na reciclagem das matérias-primas. Este tema será retratado futuramente, no capítulo 3.4.

3.1.2 Matérias-primas críticas

Perante a “Iniciativa de matérias-primas” de 2008, em 2011 foi desenvolvida, como ação prioritária, uma lista de “matérias-primas críticas” (CRMs). Perante os desenvolvimentos tecnológicos, de mercado e de produção, a Comissão Europeia pretende atualizar esta lista a cada 3 anos.

Os CRMs são definidos de acordo com dois critérios: a sua importância económica para a indústria europeia e o seu risco de fornecimento, isto é, o risco de interrupção de fornecimento para a Europa (figura 3.3) [23]. A título de exemplo, o cobalto, que apresenta elevada importância económica, não é produzido na Europa, estando assim dependente da importação de países que sejam produtores (como, por exemplo, a República Democrática do Congo). No entanto, devida a diversos aspetos, incluindo incertezas políticas, o cobalto é considerado como um material crítico [24].

A última atualização desta lista foi realizada em 2020, em que a comissão europeia classificou 30 matérias-primas como críticas para a sociedade e indústria europeia.

Tabela 3.2: Lista completa das (30) CRMs de acordo com a atualização de 2020 [23]

Antimónio	Carvão de coque	Magnésio	Escândio	Elementos de terras raras pesados (HREE)
Barita	Espatoflúor	Grafite Natural	Silício-metal	Elementos de terras raras leves (LREE)
Berílio	Gálio	Borracha Natural	Tântolo	Bauxita
Bismuto	Gernânio	Nióbio	Tungsténio	Lítio
Borato	Háfnio	Fosfato Natural	Vanádio	Titânio
Cobalto	Índio	Fósforo	Metais do grupo da platina	Estrôncio

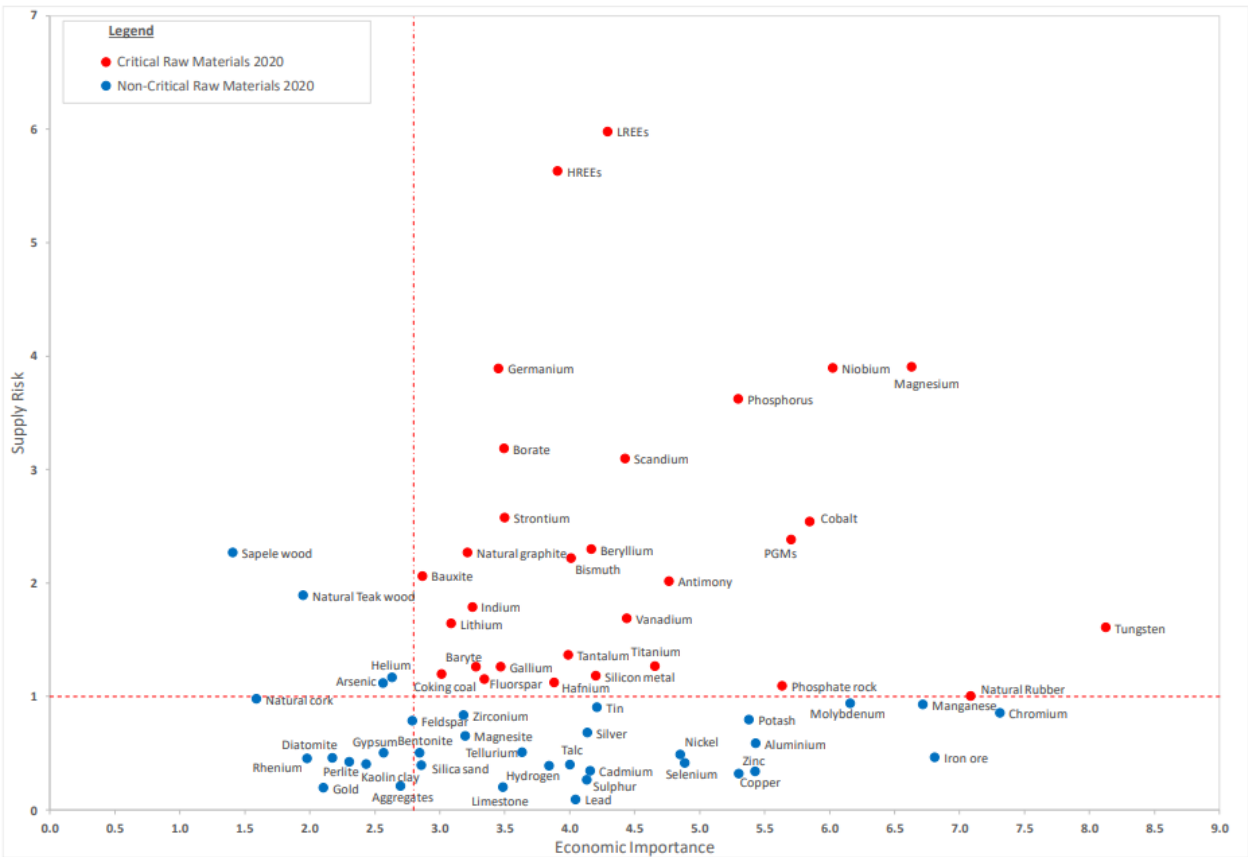


Figura 3.3: Importância económica vs risco de fornecimento de matérias-primas [25]

Por análise da figura 3.4, verifica-se que uma grande parte das CRMs são produzidas fora da UE. Por exemplo, a China fornece 98% do fornecimento da UE de elementos de terras-raras

(REE), a Turquia fornece 98% do fornecimento de borato e a África do Sul fornece 71% das necessidades de platina da UE. A Europa apenas consegue ser autossuficiente nos materiais de háfnio e estrôncio [23]. Porém, há um número significativo de reservas de CRMs na UE, entre as quais de lítio em Portugal, que não se encontram a ser exploradas de momento.

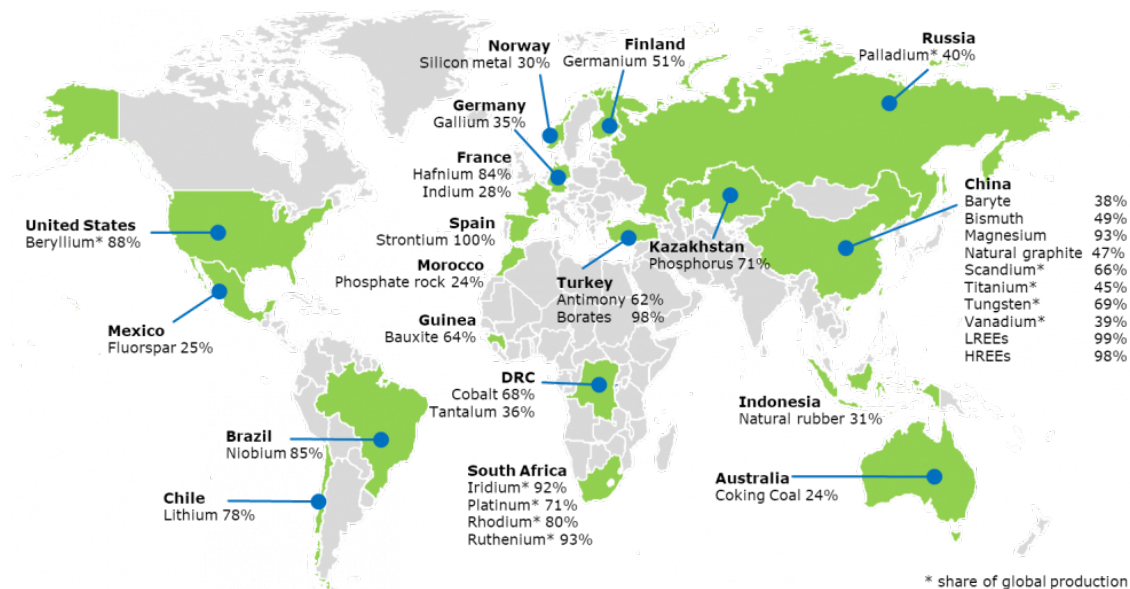


Figura 3.4: Países que representam o maior fornecimento de CRMs para a UE [23]

Os riscos associados à concentração da produção são, em muitos casos, agravados pelas baixas taxas de reciclagem. Apenas um conjunto de materiais são atualmente reciclados em quantidades consideráveis (figura 3.5).

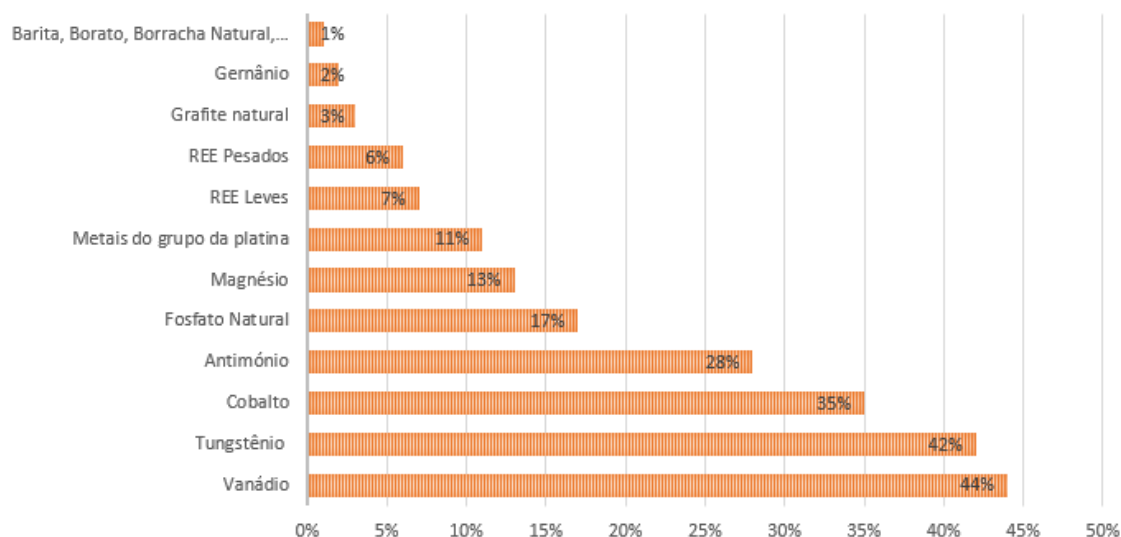


Figura 3.5: Taxa de reciclagem de CRMs [26]

Existem tendências claras que, num futuro próximo, a procura de CRMs aumentará drasticamente. Muitas das novas tecnologias, como células fotovoltaicas, turbinas eólicas e biocombus-

tíveis, exigem grandes quantidades de, por exemplo, cobalto e de REE. É igualmente estimado que esta procura de CRMs aumente aproximadamente 250% nos próximos dez anos, essencialmente devido à introdução de duas tecnologias: turbinas eólicas e VEs. Até 2030 é previsto que as vendas de VEs possa atingir a marca dos 50 milhões por ano. Deste modo, para se obter CRMs suficientes, principalmente REE (neodímio e praseodímio), cobalto e lítio, será necessário proceder à extração de quantidades cada vez maiores (figura 3.6). Caso haja uma quebra no fornecimento destes materiais poderá provocar graves impactos económicos, influenciando substancialmente o preço das baterias assim como a atratividade dos VEs [24].

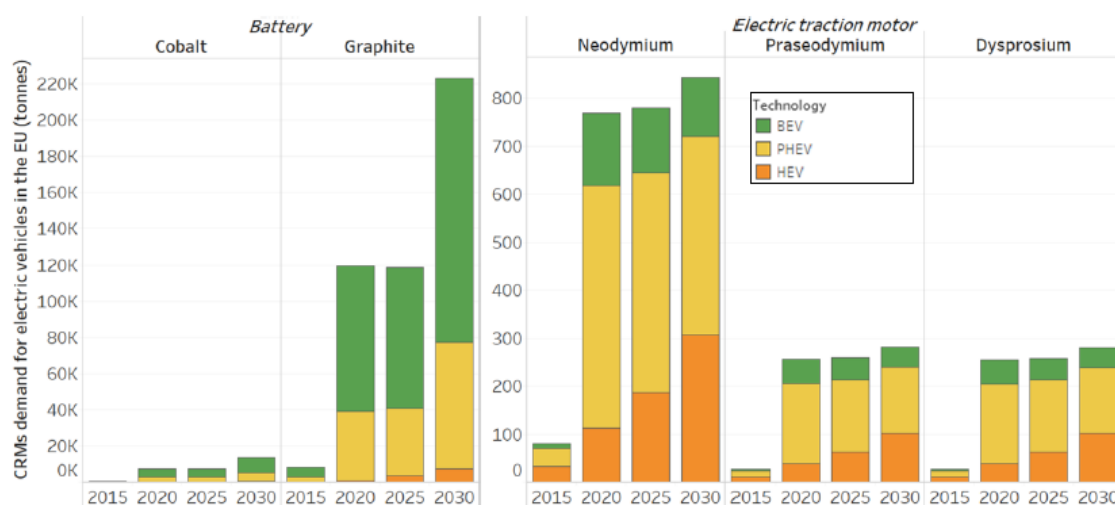


Figura 3.6: Previsão da procura de CRMs na UE para indústria de VEs [27]

Deste modo, a disponibilidade de matérias-primas representa ser muito crucial para a indústria e para a economia, sendo assim uma questão prioritária para a UE. Por conseguinte, a Comissão Europeia encontra-se atualmente a implementar uma série de medidas para garantir um abastecimento seguro de matérias-primas, de forma sustentável e economicamente razoável. As medidas a serem implementadas seguem essencialmente dois objetivos:

- **Aumentar a reciclagem de CRMs** — Atualmente apenas um conjunto de CRMs são reciclados e em pouca quantidade. A comissão Europeia pretende no futuro conseguir mudar este aspeto através de financiamento e evolução tecnológica;
- **Aumentar a extração de CRMs em solo europeu** — É projetado que só em 2100 a reciclagem poderá responder a pelo menos metade da quantidade de REE que a Europa irá necessitar. Deste modo, a Comissão Europeia considera que o mais seguro, do ponto de vista de abastecimento, é o aumento da extração e da produção na Europa. A extração em solo europeu poderá garantir, gradualmente, o fornecimento de certas CRMs, limitando a atual extração antiética e ilegal, que se verifica principalmente em África [23, 24].

3.1.3 Impactos Ambientais

Os estudos desenvolvidos atualmente relativamente aos impactos ambientais da extração de matérias-primas, encontram-se por norma agrupados aos impactos ambientais da produção dos VEs, dado que todos os materiais extraídos são usados nessa fase. Deste modo, será alvo de uma comparação mais detalhada entre VEs e VCIs no ponto 3.2.

O processo de extração de matérias-primas necessita de grandes volumes de água, energia e por vezes outros tipos de substâncias, contribuindo assim para um aumento das emissões de GEE. Este problema intensificasse caso seja necessário recorrer a processos de *lightweighting*, visto que a extração de materiais leves requerem igualmente de processos extra para o acabamento final, aumentando as emissões devido ao uso de energia que estes processos necessitam.

Hawkins et. all. [28] estima que a extração de CRMs aumente entre 2,2 a 3,3 vezes mais o risco de se libertar materiais tóxicos para a água e de contaminação dos solos, afetando em grande escala os ecossistemas e a cadeia alimentar dos seres vivos. Além disso, a extração de CRMs ocorrem maioritariamente em países em que as precauções com a segurança e a saúde humana são pouco rigorosas, e que por vezes se verifica contaminação das fontes de água potável da comunidade local, aumentando assim a exposição a substância perigosas e radioativas, e doenças respiratórias [22].

3.2 Fase 2: Produção

3.2.1 Produção do veículo

Como mencionado anteriormente, os constituintes de um VE são, de modo geral, iguais a um VCI, diferenciando no facto de necessitar de uma bateria e de componentes de eletrónica de potência.

A produção dos diversos componentes dos veículos (incluindo as baterias) apresenta uma distribuição dispersa, isto é, cada componente é fabricado individualmente numa unidade fabril específica e, posteriormente, outra unidade fabril será responsável por comprar os diversos componentes e proceder à sua montagem [29].

A produção do corpo do veículo, e de alguns sistemas auxiliares, não difere em muito da produção dos veículos de combustão. No entanto, de acordo com um estudo do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), considerando que atualmente VEs necessitam de elevadas quantidades de alumínio e, sendo este muito difícil de reciclar para uso automobilístico, as emissões são ligeiramente superiores aos do VCIs, caso se considere um veículo de tamanho médio[29]. De realçar que, caso os veículos sofram o processo de *lightweighting*, a sua produção será ainda mais poluente. Porém, é estimado que as emissões do processo de fabrico para ambos os tipos veículos rondam as 6–10 toneladas de CO₂ por veículo de tamanho médio/largo. Por sua vez, para veículos de maior dimensão, as emissões podem chegar às 15 toneladas por veículo (figura 3.10) [29, 30].

Atualmente alguns fabricantes readaptam certos componentes dos VCIs com objetivo de baixar os custos de desenvolvimento, economizar tempo e até mesmo aproveitar as linhas de produção

já existentes, permitindo assim considerar que os impactos ambientais de produção são semelhantes para VEs e VCIs.

No entanto, a produção da bateria necessita de processos de fabrico específicos, processos estes que requerem uma enorme quantidade de energia e, consequentemente, aumentam as emissões de GEE entre 15 a 30%, dependendo do tamanho do veículo [31, 32].

3.2.2 Produção da bateria

Atualmente existe uma vasta gama de baterias para os VEs disponíveis no mercado, destacando-se: baterias de lítio (Li), baterias de hidreto metálico de níquel (NiMH), baterias de chumbo (SLA) e supercondensador. Todavia, a preferência recai nas baterias de lítio dado que estas baterias possuem uma alta densidade de energia, baixa sensibilidade à variação de temperatura (robustez) e maior resistência a “falha de carregamento” (sem *memory effect*), além de apresentarem uma maior proporção entre peso e potência de carregamento [33].

	Lithium Ion	Nickel-Metal	Lead-Acid	Ultracapacitors
Easy Access / Inexpensive	✓	✗	✓	✗
Energy Efficient	✓	✓	✓	✓
Temp. Performance	✓	✗	✗	✓
Weight	✓	✓	✓	✓
Life Cycle	✓	✗	✓	✗

Figura 3.7: Comparação entre baterias de VEs [34]

Considerando que a bateria pode constituir até 25% da massa total do veículo e, a sua produção envolve processos que necessitam de elevada quantidade de energia, a localização da sua produção é importante do ponto de vista ambiental.

Por análise da figura 3.8, verifica-se que, entre 2010 e 2019, a Europa, os Estados Unidos e a China são responsáveis por cerca de 93% da produção e 97% das vendas de VEs. Nos Estados Unidos e na Europa é notável que a produção de baterias não é suficiente para responder à sua produção de VEs, pelo que, a maior parte das baterias necessitam de ser importadas. Por oposição, o Japão e a Coreia do Sul são dois dos maiores exportadores de lítio e, desta forma, são igualmente os maiores produtores e exportadores de baterias. Este comércio global de baterias é significativo do ponto de vista de desenvolvimento sustentável, dado que um veículo produzido/usado na Europa depende de processos que ocorrem em outras regiões do mundo, fora do quadro legislativo da UE. Além disso, existe ainda outro aspeto a considerar na produção de baterias: o mix energético [36].

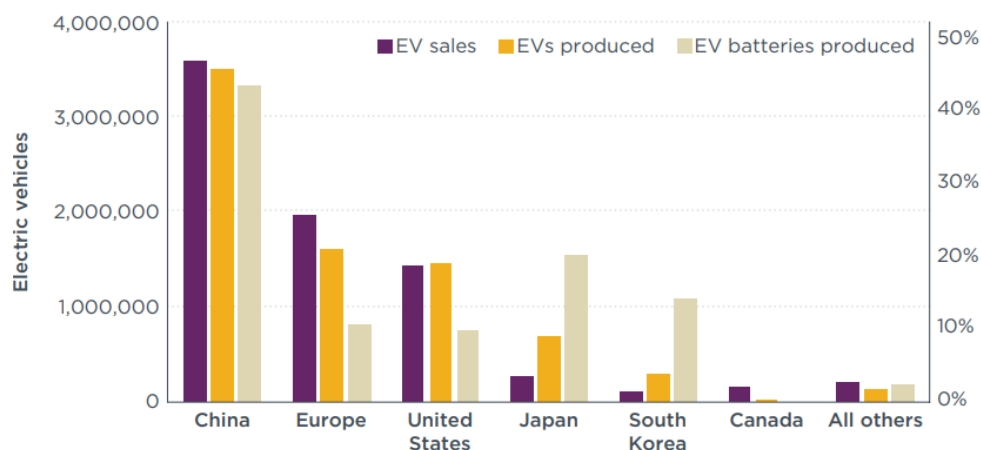


Figura 3.8: Distribuição da produção a nível mundial [35]

Dado que o Japão e a Coreia do Sul apresentam um mix energético maioritariamente baseado em combustíveis fósseis, seria todo vantajoso que a produção das baterias de lítio ocorresse em outros países, como o caso de Portugal, que sejam igualmente exploradores de lítio e apresentem um mix energético com uma maior concentração de energias renováveis (figura 3.9).

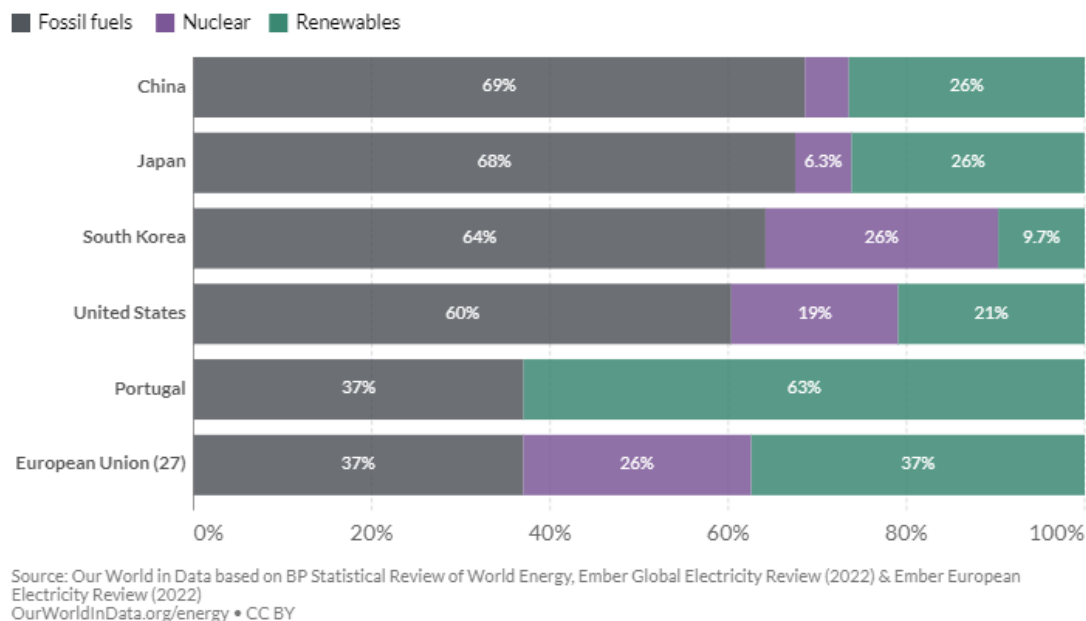


Figura 3.9: Energia *per capita* de combustíveis fósseis, nuclear e fontes renováveis em 2021 [37]

Em termos de emissões provenientes da produção da bateria, existe dois fatores-chave que devem ser considerados: o local de produção e o material do cátodo. A tabela 3.3 mostra a intensidade de carbono da produção de baterias com diferentes materiais catódicos em diferentes regiões, considerando um estudo realizado por Georg Bieker em 2021 [38].

Os dados da tabela 3.3 foram ponderados pelas respetivas participações de baterias produzidas

ou importadas da Europa, Estados Unidos, China, Coreia do Sul e Japão em 2019. Neste estudo, o autor indica ainda que, considerando um cenário pessimista, a intensidade carbónica da bateria média utilizada em automóveis novos na Europa e nos Estados Unidos corresponde a 60 kg CO₂ eq./kWh, enquanto são considerados 68 kg CO₂ eq./kWh para automóveis novos na China e na Índia.

Tabela 3.3: Emissões de GEE da produção de baterias de lítio com diferentes cátodos [38]

kg CO ₂ eq./kWh	Europa	Estados Unidos	China	Coreia do Sul	Japão
NMC111-graphite	56	60	77	69	73
NMC622-graphite	54	57	69	64	68
NMC811-graphite	53	55	68	63	67
NCA-graphite	57	59	72	67	70
LFP-graphite	34-39	37-42	51-56	46-50	50-55

3.2.3 Impactos Ambientais

De acordo com Ellingsen et al. [30, 32], as emissões de CO₂ para cada categoria de veículo, podem ser aproximadas considerando o gráfico da figura 3.10. De realçar que foi utilizado como referência o mix energético europeu e um cenário pessimista relativamente à produção do corpo dos veículos, ou seja, foi suposto existir pouca reciclagem de componentes.

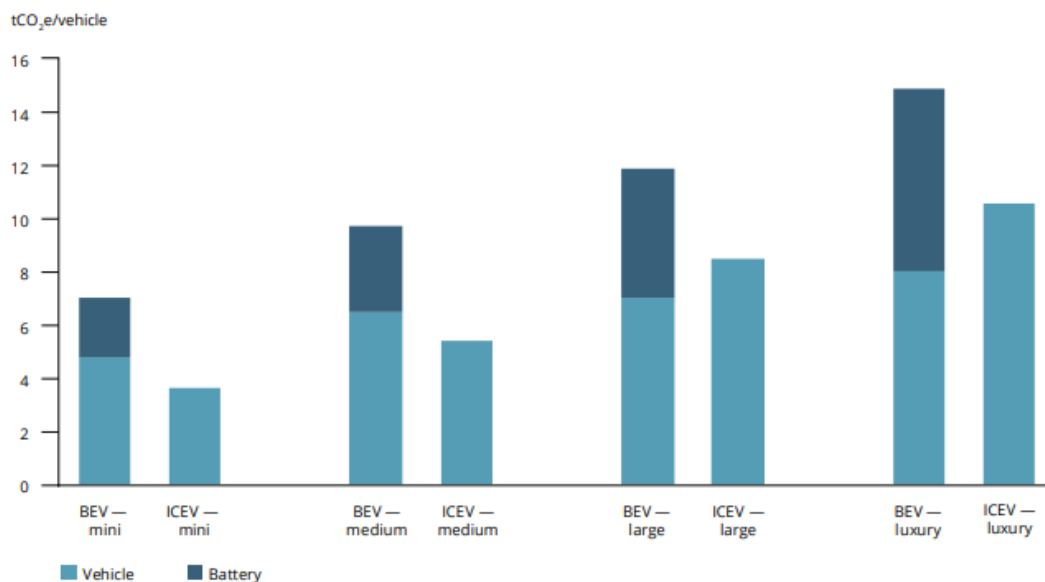


Figura 3.10: Emissões de GEE durante a fase de produção: VEs vs. VCIs [39]

Além disso, como o uso de energia para a fabricação dos componentes e a montagem de veículos são as principais fontes de poluição do ar, estes processos emitem em grande escala dióxido de enxofre (SO₂) e óxido nítrico (NO_x), responsáveis por acidificação do solo e vários impactos na saúde humana, assim como libertação do elemento químico promécio (PM), sendo este um poluente muito prejudicial na qualidade do ar atmosférico.

Um estudo realizado por Rangaraju et al. [40], sugere que as emissões destes poluentes são relativamente superiores na produção dos VEs (incluindo a extração de matérias-primas e da produção da bateria) do que em VCIs, porém, muito inferiores quando considerado todo o ciclo de vida, devido ao uso constante de combustíveis fósseis nos veículos de combustão. É de mencionar que, o valor das emissões destes poluentes na fase de produção depende essencialmente do mix energético considerado e do tamanho do veículo produzido, pelo que se torna complicado de quantificar um valor global para comparação.

Este estudo vem em seguimento de um estudo realizado por Hawkins et al. [28] que considera que as emissões ao longo do ciclo de vida dos VCIs podem ser compensados total ou parcialmente com o uso de conversores catalíticos, baixando para valores semelhantes aos obtidos para VEs. Porém, o processo de fabrico destes conversores necessita de elevadas quantidades de energia, dada a variedade de elementos químicos utilizados que pertencem ao grupo dos metais. Além disso, os impactos ambientais e os impactos na saúde pública são ainda incertos, tornando a alternativa dos conversores catalíticos pouco viável. Ainda neste estudo é referenciado o facto de os altos impactos observados na produção das baterias de lítio se deve, em grande escala, à localização da produção em países com mix energético rico em combustíveis fósseis.

3.2.4 Fatores que afetam os impactos ambientais

Apesar de a maioria dos estudos realizados permitam chegar a conclusões semelhantes relativamente aos impactos da produção de VEs, os resultados obtidos são, no entanto, incertos, considerando que os resultados dependem de uma variedade de fatores e suposições.

Os fatores-chave que se deve ter em consideração são:

- **Tamanho do veículo e da bateria:** A produção de um carro de modelo "mini" emite cerca de 7 toneladas de CO₂, enquanto que um modelo de luxo emite cerca de 14,9 toneladas, ou seja, mais do dobro que o primeiro [29, 30]. Isto deve-se ao facto de um modelo de luxo, que possui um tamanho superior, necessitar de uma maior quantidade de matéria-prima e, consequentemente, um maior consumo de energia elétrica para a sua produção. Por sua vez, quanto maior o tamanho do veículo é igualmente necessário aumentar a capacidade da bateria de forma a melhorar a autonomia do mesmo, provocando assim um aumento significativo dos impactos ambientais.

Tabela 3.4: Impacto do tamanho e bateria do veículo [30]

Type of EV	Typical Vehicle Weight (kg)	Battery Size (kWh)	Energy Requirement (Wh/km)
Mini Car	1.100	17,7	146
Medium Car	1.500	24,4-30,0	170
Large Car	1.750	42,1	185
Luxuary Car	2.100	59,9	207

- **Tipo de bateria:** Os impactos também variam de acordo com a configuração química da bateria, dado que algumas baterias requerem processos de produção mais intensivos de

energia. De acordo com Battery University [41] a densidade de energia e os ciclos de carregamento-descarregamento das principais tecnologias de lítio, podem se resumir aos valores presentes na tabela 3.5:

Tabela 3.5: Propriedades de diferentes tipos de baterias de lítio [41]

Cathode Material	Energy Density (Wh/kg)	Charge-discharge Cycles
LCO	150-200	500-1.000
LMO	100-150	300-700
LiNMC	150-220	1000-2.000
LiFePO4	90-120	1.000-2.000
LiNCA	200-260	500

Teoricamente, uma densidade energética elevada significa que menos material será necessário para fornecer uma determinada autonomia ao veículo, reduzindo assim os impactos ambientais. Por outro lado, um maior ciclo de carga-descarga pode reduzir o impacto ambiental da bateria durante a produção, quando avaliada a unidade de energia fornecida por quilómetro percorrido. É expectável que, no futuro, a densidade de energia e a vida útil das baterias de lítio continuem a melhorar consoante o desenvolvimento tecnológico, sendo ainda possível a implementação de novos tipos de baterias químicas.

- **Mix Energético:** As emissões de VEs resultam em grande parte devido à energia necessária para alimentar os processos. A título de exemplo, 35%-45% das emissões de GEE na produção de baterias na China, deve-se ao uso intensivo de eletricidade. As emissões dependem do mix de produção energético disponível no local e no momento da fabricação do veículo/bateria. Estima-se que a produção de baterias na China seja três vezes mais emissora de poluentes que nos Estados Unidos, dada a elevada concentração de produção através de combustíveis fósseis [42]. Considerando uma situação hipotética em que toda a produção de eletricidade é proveniente de eólica, estima-se que tal resultaria numa queda de 50% nas emissões de GEE na fase de produção, em comparação com o atual mix energético da UE [30, 32].

3.3 Fase 3: Uso

3.3.1 Fatores-chave

Na fase de uso, os VEs não imitem poluentes atmosféricos ou GEE pelo tubo de escape durante a sua utilização, dado que não há queima de combustíveis fósseis como se verifica nos VCIs. Por sua vez, as emissões podem se manifestar, por exemplo, através da poluição sonora ou do desgaste dos pneus devido ao contacto com a estradas, emitindo alguma quantidade de PM.

Ao contrário dos VCIs, um estudo relativo à fase de uso dos VEs é complicada dado que existem diversos fatores que podem afetar os resultados, destacando-se:

- Características do veículo;

- Localização e modo de condução;
- Fontes de carregamento da bateria / mix energético do local;
- Padrões de carregamento

Deste modo, os estudos realizados até ao momento são efetuados recorrendo a suposições das características anteriores. Porém, todos estes estudos permitem concluir que as emissões por quilómetro dos VEs são mais baixas que as emissões por quilómetro dos VEH e dos VCIs.

3.3.2 Emissões e impactos ambientais

Um estudo realizado por Nordelöf et al. [43] estima que, baseando-se no mix energético europeu, as emissões de um VE médio variam entre 60 e 76 gCO₂/km. Estas emissões correspondem a cerca 68% a 75% abaixo das emissões de um VCI (cerca de 240 gCO₂/km).

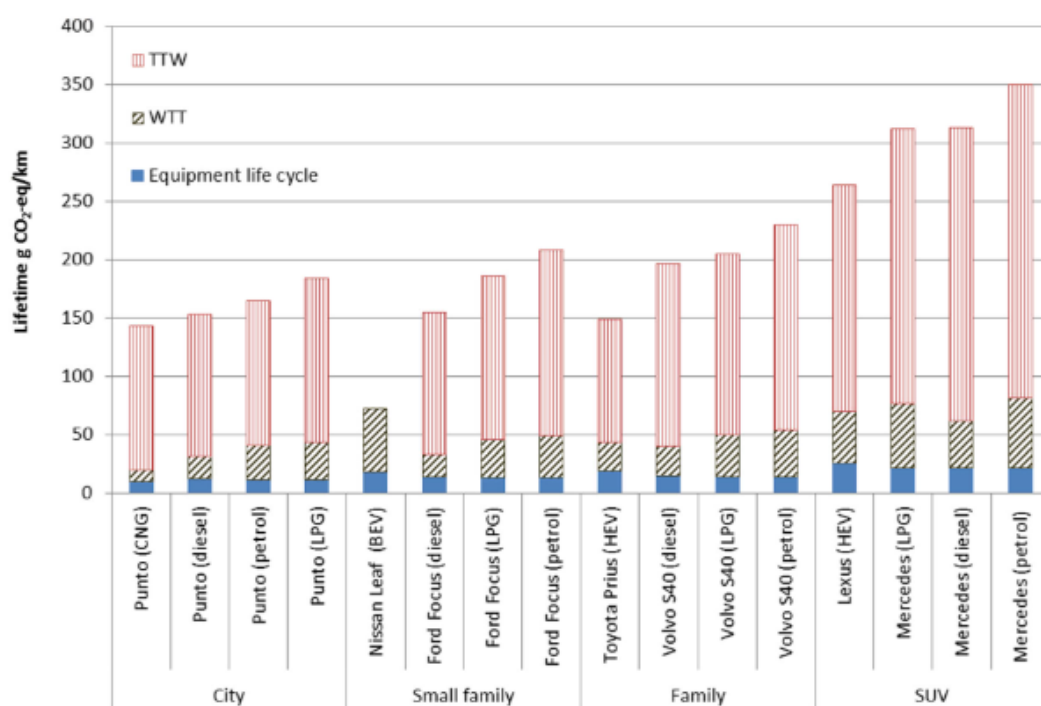


Figura 3.11: Emissões estimadas durante a fase de uso (WTT+TTW)[43]

Como verificado, VEH e VEHP também apresentam emissões mais baixas que VCIs, podendo chegar até cerca de 48%. No gráfico da figura 3.12 é demonstrada as emissões para diferentes níveis de eletrificação dos veículos em três situações de tráfego, verificando-se assim a importância da localização para a avaliação dos resultados obtidos.

Uma das principais razões para o valor baixo das emissões dos VEs deve-se ao facto de estes veículos conseguirem converter entre 70-90% da energia armazenada na bateria em movimento, ao contrário dos VCIs cujo valor ronda os 40% [40].

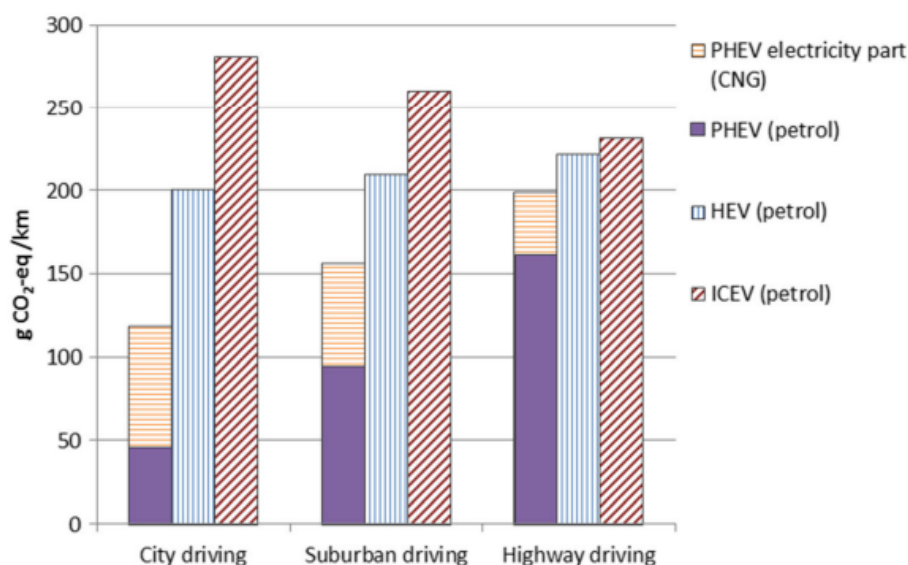


Figura 3.12: Emissões de três veículos de diferentes graus de eletrificação em três diferentes situações de trânsito [43]

É importante denotar que os biocombustíveis assumem um papel muito importante e fundamental no futuro para reduzir as emissões do setor da mobilidade. Os biocombustíveis ao serem misturados com a gasolina e o diesel (atualmente tal já se verifica, porém, em pequena escala) e, assumindo que o biocombustível é produzido de forma sustentável, resultará numa redução das emissões de GEE dos VCIs, podendo levar a valores semelhantes dos atuais VEHPs e VEHs [43, 40].

Um dos aspetos que por muitas vezes é ignorado nesta fase é a poluição atmosférica devido às fontes de produção de energia elétrica para o carregamento das baterias. Assim, tal como as emissões de GEE, a quantidade de emissões de NO_x, SO₂ e PM dependem do consumo de energia do veículo e do mix energético do local.

Um estudo realizado na China verificou que, dada a sua alta proporção de eletricidade proveniente de carvão, as emissões de NO_x, SO₂ e PM de um VE são superiores cerca de duas, três e quatro vezes, respetivamente, as de um VCI nesta fase [42]. Por outro lado, um estudo semelhante realizado na Bélgica comprovou que o uso de VEs têm um baixo impacto nas emissões de poluentes atmosféricos (e até mesmo nos impactos na saúde pública) relativamente aos VCIs. Esta conclusão contraditória entre as duas entidades deve-se ao facto de na Bélgica a produção de eletricidade ser maioritariamente proveniente de duas centrais nucleares [44]. Por conseguinte, conclui-se que em locais onde a geração de eletricidade é baseada em fontes não-renováveis, existe a possibilidade que a substituição de VCIs por VEs pode não se tornar viável dado que, as concentrações de NO_x, SO₂ e PM podem ser aumentadas.

A poluição sonora também é uma vertente importante a ter em consideração nos VEs, principalmente nas zonas urbanas. Sendo que as velocidades nas zonas urbanas rondam os 15-50 km/h, por análise do gráfico 3.13 averigua-se que o uso de VEs pode ser vantajoso, reduzindo a poluição

sonora em grande parte desse intervalo de velocidades. Porém, para velocidades mais elevadas, a poluição sonora de VEs e VCIs é, de grosso modo, semelhante. De referir que o gráfico provém de um estudo realizado em 2015, sendo que, a evolução tecnológica permitiu que atualmente os valores de poluição sonora dos VEs sejam mais baixos, porém, as conclusões mantêm-se.

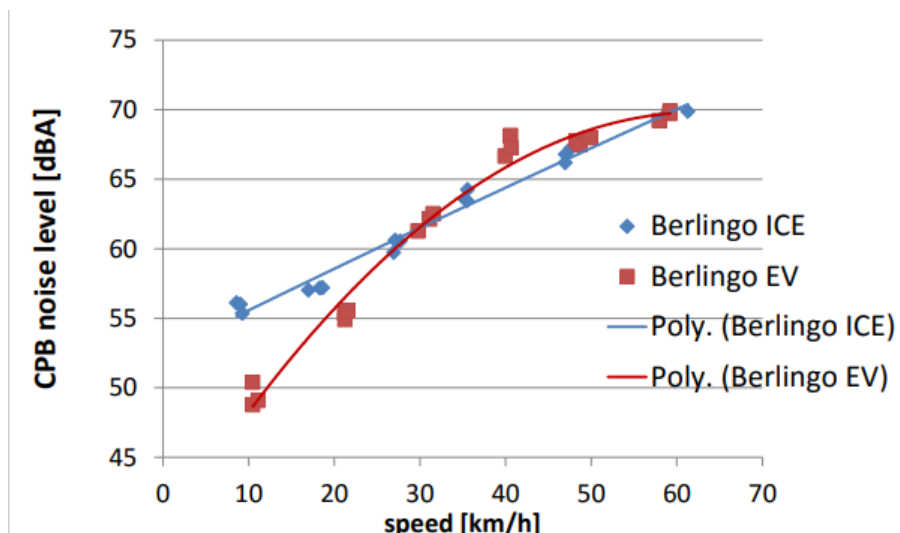


Figura 3.13: Comparação do nível de ruído de VCIs e VEs [45]

Os padrões de carregamento dos utilizadores é um fator igualmente muito importante nos impactos ambientais dos VEs, sendo por norma negligenciados.

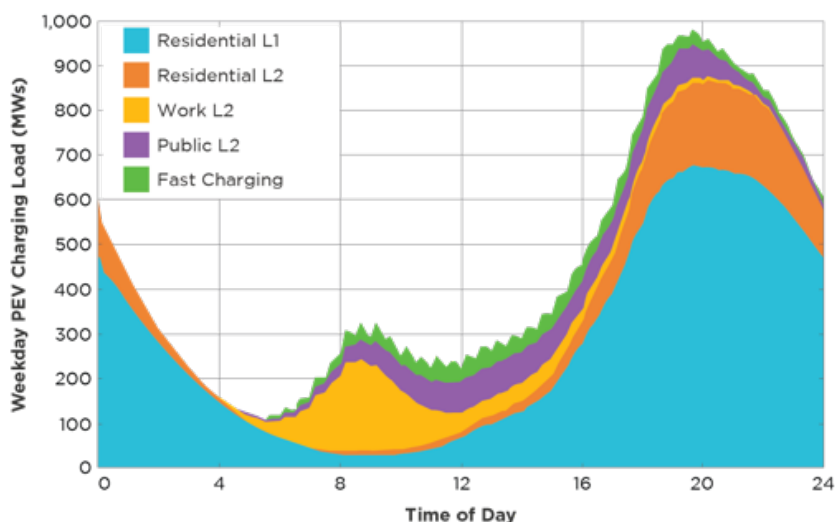


Figura 3.14: Perfil de carregamento diário [46]

Um estudo realizado pela *California Energy Commission* em conjunto com o *National Renewable Energy Laboratory* em 2021 é um dos primeiros relatórios a mostrar que a maioria dos carregamentos de VEs ocorre em casa durante o período noturno [46]. Em concordância com Ahmad et. al [47], este facto deve-se essencialmente a dois fatores:

- Nesse período do dia a energia é mais barata, podendo coincidir com uma maior geração de eletricidade através de fontes não renováveis. Por conseguinte, irá aumentar as emissões de GEE;
- De acordo com o ICCT, de modo geral, existe uma falta de infraestruturas de carregamento no local de trabalho e, quando existe, em pouca quantidade. Deste modo, os utilizadores são obrigados a carregar os seus veículos em casa.

De acordo com Associação Europeia de Fabricantes de Automóveis (ACEA), em 2021 apenas quatro países possuíam mais de 100 carregadores por cada 100 km, enquanto que 10 países da UE não têm nenhum carregador. Os cidadãos da Grécia, Polónia e da Roménia, por exemplo, necessitam de viajar mais de 200 km para encontrarem um carregador. Em muitas das situações, a falta de postos de carregamento num dado local seja o principal motivo para que a quota de mercado de VEs seja muito baixa.

Tabela 3.6: Postos de carregamento de VEs por 100 km (+ quota de mercado) em 2020 [48]

#	Estado-Membro	Postos de Carregamentos por cada 100 km	Quota de mercado de VEs (%)	#	Estado-Membro	Postos de Carregamentos por cada 100 km	Quota de mercado de VEs (%)
1	Países Baixos	47,5	25,0	15	Eslovénia	1,6	3,1
2	Luxemburgo	34,5	11,4	16	Espanha	1,1	4,8
3	Alemanha	19,4	13,5	17	Irlanda	1,0	7,4
4	Portugal	14,9	13,5	18	República Checa	0,9	2,5
5	Áustria	6,1	9,5	19	Bulgária	0,8	-
6	Bélgica	5,5	10,7	20	Estónia	0,7	1,8
7	Itália	5,1	4,3	21	Hungria	0,6	4,7
8	Suécia	5,0	32,2	22	Chipre	0,5	0,5
9	Dinamarca	4,4	16,4	23	Letónia	0,5	2,7
10	França	4,1	11,2	24	Roménia	0,5	2,2
11	Malta	3,4	-	25	Polónia	0,4	1,9
12	Finlândia	3,3	18,1	26	Grécia	0,2	2,6
13	Croácia	2,3	1,9	27	Lituânia	0,2	1,1
14	Eslováquia	2,0	1,9				

O diretor-geral da ACEA, Eric-Mark Huitema, afirma: “Embora apreciemos a introdução de metas obrigatórias muito necessárias para os pontos de carga e reabastecimento em cada Estado-Membro, elas precisarão ser fortalecidas significativamente se quisermos cumprir as metas climáticas” [48].

3.4 Fase 4: Fim de Vida

Esta última fase do ciclo de vida dos VEs é, entre todas as outras, a que tem menor impacto de emissões totais. Contudo, esta fase apresenta um papel fundamental e importante na redução dos impactos ambientais das outras fases do ciclo de vida. Se se avaliar numa perspetiva de EC, a reutilização das baterias e a reciclagem de materiais irá apresentar diversos benefícios em termos de eficiência na gestão de recursos e na disponibilidade de matéria-prima, assim como, na redução de custos de toda a cadeia de valor.

3.4.1 Panorama atual do processo de fim de vida

Em 2000, o Parlamento Europeu implementou a Diretiva 2000/53/CE [49] relativa aos veículos em fim de vida, que exige que os fabricantes dos veículos assumam responsabilidade pelos seus veículos e respetivos componentes após o uso. Sob esta responsabilidade, os fabricantes são obrigados financeira ou fisicamente pela devolução dos seus produtos, com o objetivo final de reutilização, reciclagem/remanufactura, ou, alternativamente, obrigados a delegar a responsabilidade a entidades terceiras. Esta mesma diretiva define três processos que devem ser implementados pelos fabricantes:

- **Reutilização:** Operação em que qualquer componente do veículo em fim de vida será usado para a mesma finalidade para a qual foi originalmente fabricado;
- **Recuperação:** Operações que incluem a recuperação de metais e compostos metálicos, materiais inorgânicos e entre outros;
- **Reciclagem:** Operação de reprocessamento de materiais residuais, para o propósito original ou um propósito diferente.

Ainda nesta diretiva é indicado que, até 2015, 95% dos veículos em fim de vida (em termos de peso do veículo) tiveram de ser reutilizados e recuperados, e 85% reciclados (tendo como objetivo 95% até 2050). Estas metas foram implementadas por cada Estado-Membro da UE através de regulamentos nacionais. No entanto, a questão que deve ser feita é se estas metas ambiciosas são realmente viáveis do ponto de vista tecnológico, uma vez que o desempenho de um sistema de reciclagem é, em última análise, ditado pela física e química da tecnologia de reciclagem, ao mesmo tempo que depende da maturidade dessa mesma tecnologia. Assim, a proposta da UE deve ser imperativamente apoiada por um modelo físico e matemático, o que atualmente não é o caso. Nesta perspetiva, Reuter et. al. [50] considerou diversos cenários de forma a avaliar a viabilidade das quotas propostas da UE, no qual permitiu retirar as seguintes conclusões:

- Com a tecnologia atual a cota de 95% (reciclagem de material + recuperação de energia) é muito difícil ou mesmo impossível de realizar para os veículos atuais, e provavelmente para os veículos futuros;
- A cota de 85% de reciclagem (reciclagem de materiais + recuperação de energia) pode ser alcançada nos projetos atuais, o que é significativo para a indústria automobilística. No entanto, quotas de reciclagem superiores a 85% serão difíceis de alcançar ao abrigo da atual legislação da UE;
- De forma a se obter quotas superiores teria de haver harmonia de diversos fatores, tais como: nova legislação, maturação das tecnologias atuais, energia 100% limpa, comportamento flexível do consumidor e do design de produto, entre outros.

De forma semelhante, a Diretiva de Baterias e respetivos resíduos 2006/66/CE [51], visa minimizar o impacto das baterias e dos resíduos associados no meio ambiente, estabelecendo requisitos sobre como as diferentes baterias devem ser recicladas. Esta diretiva atribui a responsabilidade de recuperar e reciclar as baterias aos responsáveis por as colocar no mercado.

Atualmente, a Diretiva não promove a reciclagem dos metais CRM ou aqueles que sobrecarregam mais o meio ambiente [30, 32]. Havendo uma preocupação maioritariamente económica no processo de reciclagem e, como o valor da bateria é impulsionado pelo preço do cobalto e do níquel, os atuais processos de reciclagem são focados na recuperação desses metais. Outros metais, como cobre e ferro, normalmente também são recuperados no decorrer dos atuais processos industriais de reciclagem [33].

3.4.2 Reciclagem das baterias

Como referido no subcapítulo anterior, o processo de reciclagem das baterias foca-se na recuperação do cobalto e do níquel e não do lítio. A falta de recuperação do lítio deve-se essencialmente a dois motivos:

- Na maioria dos casos é mais barato eliminar as baterias velhas, e extrair material virgem para a produção de novas, ou seja, reciclar completamente as baterias de lítio ainda não é economicamente viável. Os processos mais utilizados atualmente (hidrometalurgia e pirometalurgia) são processos lentos e requerem elevadas quantidades de energia [33].
- Considerando que as baterias têm um tempo de vida útil de cerca de 10 anos, atualmente ainda existe pouca quantidade de baterias para serem recicladas, é expectável que, quando houver mais unidades de baterias antigas disponíveis, o preço venha a diminuir e a maturidade tecnológica dos processos de extração será maior que a observada atualmente. Infelizmente, neste momento, o cliente tem que pagar se quiser que a bateria do carro antigo seja reciclada [52].

De acordo com Thomas Wagner [33], supondo uma vida útil da bateria de 10 anos e que 40% ou 100% de todas as baterias de lítio produzidas sejam recicladas, a procura de lítio no futuro poderá ser reduzida em 10,2% ou 25,5%, respetivamente, até 2030. De notar que, nem mesmo com a suposição da reciclagem a 100% irá impedir que o consumo de lítio ultrapasse os recursos disponíveis globalmente. No artigo publicado em maio de 2021, T&E prevê a procura de baterias de lítio presentes na figura 3.15.

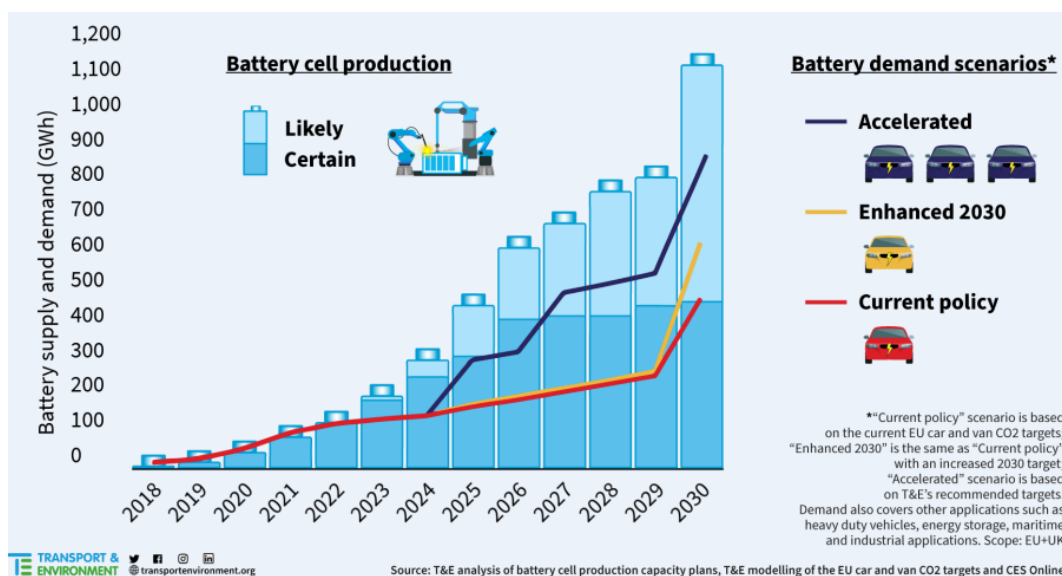


Figura 3.15: Previsão de baterias de lítio em três cenários de procura [53]

3.4.3 Necessidades do futuro

Os VEs — veículos elétricos a bateria (VEBs) e veículos elétricos híbridos *plug-in* (VEHPs) — estão a aumentar gradualmente no mercado da UE. Nos últimos anos há um aumento constante no número de novos registos de carros elétricos, de 700 unidades em 2010 para cerca de 550.000 unidades em 2019. Em 2020, os registos de carros elétricos aumentaram, representando 11% dos carros de passageiros recém-registrados. Desses 11 %, os VEBs representaram 6% do total de registos de carros novos, enquanto os VEHPs os restantes 5% (figura 3.16) [54].

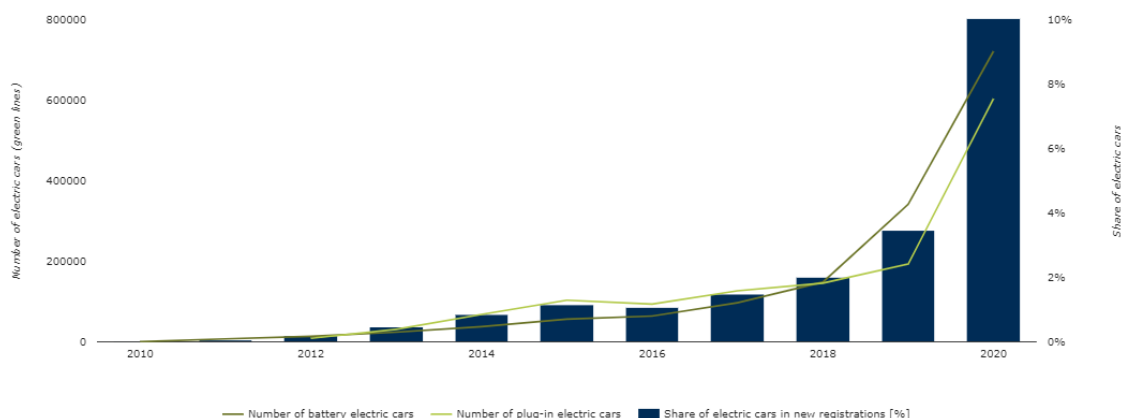


Figura 3.16: Carros elétricos registados na UE-27, Islândia, Noruega e no Reino Unido [54]

Com o aumento do número de VEs, também haverá um aumento do número de baterias de lítio que, no final de vida dos veículos, serão devolvidas aos fabricantes e necessitarão de serem processadas. Embora este aumento apresente uma preocupação relativamente à procura de lítio e à sua disponibilidade, é difícil avaliar as necessidades futuras devido a incertezas, tais como a

quantidade de lítio usada por bateria, a proporção de veículos elétricos no futuro e a taxa de reciclagem de das baterias de lítio no futuro. Este aumento apresentará uma preocupação semelhante relativamente às CRMs. No entanto, é unânime que há necessidade de aumentar a maturidade tecnológica dos sistemas de reciclagem de forma a ser possível responder às necessidades futuras.

3.5 Conclusões e Considerações

Após a análise do ciclo de vida de um VE podemos concluir que, a longo prazo, é expectável que um VE irá produzir significativamente menos emissões de GEE do que um VCI. Esta situação deve-se ao facto de que, durante a fase de uso dos veículos, os VCI queimam constantemente combustíveis fósseis, enquanto que as emissões dos VEs só se verifica durante o processo de geração de eletricidade para o carregamento da bateria. Nos próximos capítulos iremos tentar demonstrar a veracidade desta afirmação.

Porém, existem dois aspetos que ainda podem ser melhorados de modo a ainda reforçar e a fortalecer a mobilidade elétrica: a produção dos veículos e a reciclagem dos componentes no processo pós-fim de vida. A produção dos VEs gera elevadas emissões, essencialmente devido à produção das baterias. As baterias possuem na sua composição um conjunto de CRMs, as quais necessitam de elevadas quantidades de energia para o processo da sua extração. Por sua vez, a reciclagem dos veículos (e das baterias) acontece em pouca escala e, na maioria das situações, não é economicamente viável. Deste modo, era de todo o interesse que se realizem alguns esforços para alterar estes dois cenários através da aplicação de medidas circulares.

Por fim, foi possível constatar que o mix energético é um fator-chave para a mobilidade elétrica. Um veículo produzido e carregado num território cuja geração de eletricidade é proveniente de fontes renováveis, irá produzir menos emissões do que num território cuja energia elétrica é produzida à base de combustíveis fósseis. Porém, de forma a avaliar quantitativamente esta questão, no capítulo 4 foi realizada uma análise comparativa do ciclo de vida de um VE e de um VCI considerando mix energéticos diferentes.

Capítulo 4

Comparação do ciclo de vida de um VE e um VCI

Até ao momento foi possível averiguar que a produção de um VE emite mais GEE que um VCI devido à produção da bateria. Porém, o panorama altera-se quando considerada a fase de uso dos veículos. Deste modo, os subcapítulos seguintes pretendem avaliar/determinar em quanto tempo é que as emissões de um VE serão compensadas, ou seja, em quanto tempo a substituição de um VCI por um VE será benéfica.

4.1 Objetivos e características da análise

O objetivo principal desta análise será determinar o *breakeven point* ambiental (T) de um VE, isto é, em quanto tempo é que as emissões totais de um VE irão compensar as emissões de um VCI de características semelhantes, tendo em consideração todo ciclo de vida. Em concordância com os estudos realizados até ao momento, esta análise incide na comparação de um VCI e de um VE de tamanho médio classe B (de acordo com a classificação da NCAP — *European New Car Assessment Programme*) e com peso aproximado de 1.500kg.

Como já mencionado, o local onde o veículo elétrico será produzido/usado apresenta ser um dos fatores-chave devido ao mix energético. É de prever que, países com mix energético maioritariamente à base de combustíveis fósseis apresentem um T superior a um país que gere a sua eletricidade através de recursos renováveis. Deste modo, para esta análise foram considerados três locais: Noruega (*best case scenario*), a UE-27 e a China (*worst case scenario*). As suas características encontram-se destacadas nos seguintes pontos:

- **Caso 1: Noruega** — Cerca de 92% da produção de eletricidade norueguesa em 2021 foi proveniente de energia hidroelétrica. Assim, durante a fase de uso, as emissões resultantes apresentaram um valor muito baixo [55];
- **Caso 2: União Europeia-27** — As fontes renováveis forneceram cerca de dois terços (66%) da produção de eletricidade na UE-27 no ano de 2021 [56];

- **Caso 3: China** — Por oposição aos casos anteriores, o mix energético chinês é maioritariamente à base de combustíveis fósseis (cerca de 61% em 2021), apresentando assim emissões muito mais elevadas que os casos anteriores [55];

Há que relembrar um aspeto muito importante referido no capítulo 3.2.2: segundo o ICCT, a Europa e os Estados Unidos necessitam de importar em grande escala baterias de outros países como o Japão, a Coreia do Sul e a China (figura 3.8). Deste modo, o comércio global de baterias é significativo do ponto de vista de desenvolvimento sustentável, dado que um veículo produzido/usado na Europa depende de processos que ocorrem em outras regiões do mundo cujo mix energético é baseado maioritariamente em fontes não renováveis e fora do quadro legislativo da UE (figura 3.9).

Deste modo, foram analisadas as seguintes hipóteses para cada caso anteriormente identificado:

- Caso 1: veículo usado na Noruega, cujo o corpo do veículo foi produzido na Europa e a bateria na China;
- Caso 2: veículo usado na União Europeia-27, cujo o corpo do veículo foi produzido na Europa e a bateria na China;
- Caso 3: veículo produzido (corpo e bateria) e usado na China.

Com base nos dados mais recentes relativamente às estimativas da distância média percorrida por ano, verifica-se que em 2019 a média europeia correspondia a cerca de 11.413 km. Assim, considerando que existe um nível de incerteza, foi assumido para esta análise que os veículos percorrem em média cerca de 12.000 km por ano. Apesar de o caso 3 não ser num país europeu, foi mantida a consideração da distância de forma a ser viável a comparação entre os diferentes casos.

Tabela 4.1: Distância média percorrida na UE-27 [57]

Ano	2010	2011	2012	2013	2014
Distância média percorrida (km)	12.161	11.935	11.626	11.532	11.674
Ano	2015	2016	2017	2018	2019
Distância média percorrida (km)	11.676	11.716	11.545	11.547	11.413

Há ainda que definir o tempo de vida útil dos VEs. O tempo de vida útil de um veículo poderá ser apresentado através do número total de quilómetros que pode percorrer ou em anos. Neste sentido, Hawkins et al. assume que um VE terá um tempo de vida útil de 150.000 km e que este valor é o utilizado pela indústria automóvel no ano em questão (2012). Porém, o mesmo acaba por concluir que, dependendo da bateria e das condições de utilização, esse valor poderá se encontrar no intervalo de [150.000 , 300.000] km [58, 59].

Por sua vez, o grupo T&E afirma que um veículo terá um tempo de vida útil de 150.000 km, podendo este valor se estender no máximo até 200.000km, considerando os dados disponíveis até 2014 [60]. Com o avanço tecnológico na indústria automóvel (principalmente na tecnologia relacionada com os VEs), é razoável que este tempo seja superior aos indicados anteriormente e, por esta razão, um estudo realizado por Wilken et al. em 2020 considerou um tempo de vida útil de 240.000km [61]. Assim, para esta análise será considerado que um VE terá um tempo de vida útil de 180.000km e, dado que foi assumido que um veículo percorre em média 12.000km por ano, conclui-se que um VE possuiu um tempo de vida útil de 15 anos.

Suposições sobre a duração da bateria também devem ser efetuadas. Um estudo realizado pela Universidade de Berkeley afirma que, em média a bateria de um VE de tamanho médio tem um tempo de vida útil de 10 anos, podendo este valor atingir a marca dos 15 anos [62]. Por sua vez, Keil et al. estima que as baterias durem pelo menos 10 anos e que tenham uma duração máxima igual ao do VE [63]. No mesmo sentido, o *Renault Group* garante que as suas baterias tenham um tempo de vida útil igualmente de 10 anos e que, após esse período, estas ainda tenham grande capacidade de armazenamento até pelo menos mais 10 anos, podendo eventualmente continuarem a ser usadas no veículo ou então serem usadas numa segunda aplicação (por exemplo, em sistemas de armazenamento) [64]. Em conclusão, de forma a se manter a coerência com os estudos apresentados, nesta análise foi considerado que a vida útil de uma bateria é de 10 anos.

4.2 Metodologia

Para se obter e avaliar o T é necessário quantificar as emissões de produção dos veículos e as emissões durante a fase de uso dos mesmos. Para tal, as emissões relativamente à produção dos corpos dos veículos, como da produção das baterias dos VEs, foram obtidos através da revisão de literatura de estudos já realizados sobre o ciclo de vida dos veículos, tendo em consideração as características mencionadas no ponto anterior.

As emissões relacionadas com a fase de uso dos veículos podem ser quantificadas através de diversos tipos de abordagem. Para este estudo foi utilizada uma abordagem *Well-to-Whell* (WTW) representada pela figura 4.1, dado que se consegue obter medidas que melhor se aproximam da realidade.

A análise WTW, inicialmente criada com base em VCIs, permite realizar comparações entre veículos que usam diferentes fontes de energia. O WTW é dividido entre:

- *Well-to-Tank* (WTT) — Para VCIs refere-se a todos os processos necessários para ser possível transformar o petróleo extraído em gasolina/diesel, enquanto que para VEs corresponde a quaisquer impactos da produção de eletricidade que ocorra até ao momento do carregamento da bateria.
- *Tank-to-Whell* (TTW) — Refere-se ao processo de combustão no motor para o caso dos VCIs, e aos impactos diretos da condução do VE.

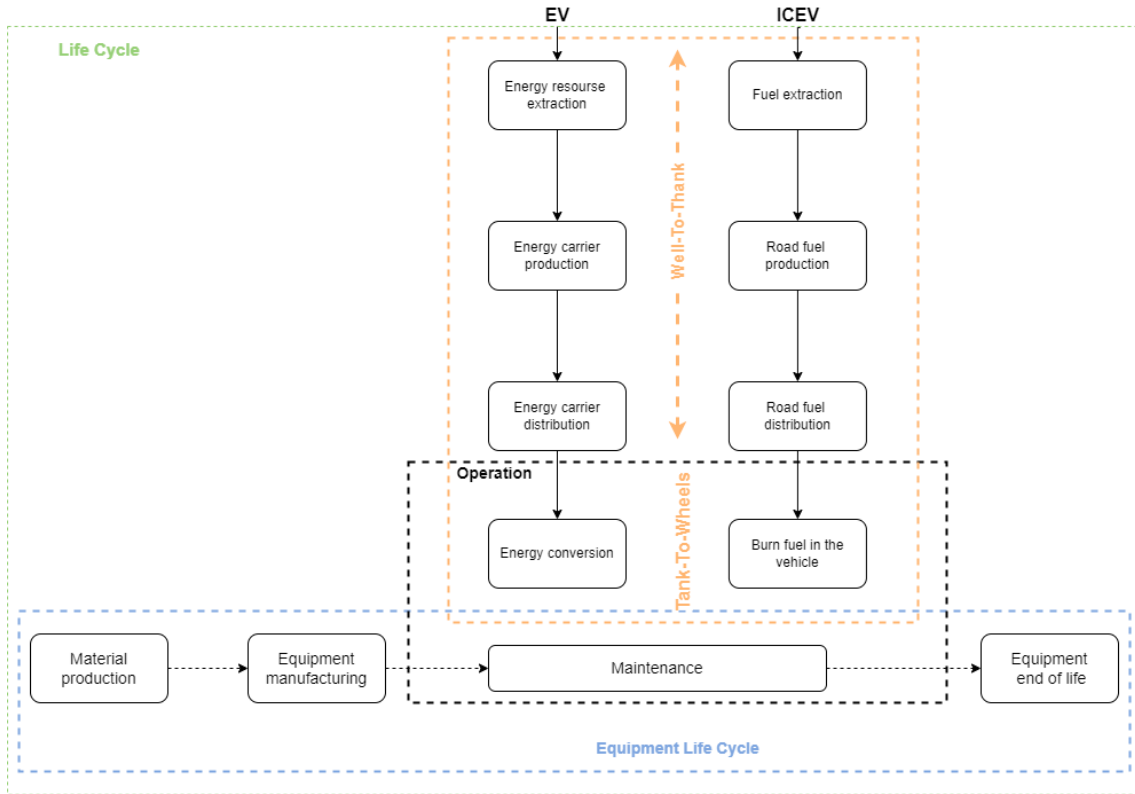


Figura 4.1: Esquema simplificado da análise WTW e do ciclo de vida [43, 65]

No entanto, os VEs não emitem CO_2 na operação do veículo, portanto, as emissões do tipo TTW são nulas. Deste modo, para VEs apenas existem emissões do tipo WTT provenientes da produção de eletricidade para o carregamento da bateria.

O T será dado através da resolução da seguinte igualdade:

$$\Leftrightarrow E. Prod.VCI + E. Uso_{VCI} \times T = E. Prod.VE + E. Uso_{VE} \times T \quad (4.1)$$

$$\Leftrightarrow T = \frac{E. Prod.VE - E. Prod.VCI}{E. Uso_{VCI} - E. Uso_{VE}} \quad (4.2)$$

Em que:

- T : *Breakeven point* ambiental [anos];
- $E. Prod.VCI$: Emissões totais provenientes da produção de um VCI [$\text{tonCO}_2 - eq$];
- $E. Prod.VE$: Emissões totais provenientes da produção de um VE [$\text{tonCO}_2 - eq$];
- $E. Uso_{VCI}$: Emissões totais durante a fase de uso de um VCI [$\text{tonCO}_2 - eq$];
- $E. Uso_{VE}$: Emissões totais durante a fase de uso de um VE [$\text{tonCO}_2 - eq$];

Para facilitar esta análise foram realizadas algumas simplificações:

- Nos estudos analisados, frequentemente não são distinguidos os impactos associados à extração e processamento de matéria-prima e aqueles associados às etapas posteriores de fabricação e montagem de veículos. Em vez disso, tendem a ser aglomerados, abrangendo todos os processos que ocorrem antes do uso do veículo. Consequentemente, neste capítulo, aquando comparações quantitativas de impactos ambientais entre VEs e VCIs, as emissões referentes à fase de extração de matéria-prima encontrar-se-ão acopladas às emissões da fase de produção para cada tipo de veículo ($E. Prod.VCI$ e $E. Prod.VE$), salvo indicação em contrário;
- As emissões da fase de fim de vida e as emissões relativas a possíveis ações de manutenção do veículo não serão incluídas na análise. Estas representam uma pequena parcela das emissões do ciclo de vida e podem ser excluídas sem muitas implicações. Além disso, como referido anteriormente, é estimado que as emissões da fase de fim de vida sejam aproximadamente iguais para VCIs e VEs, ou seja, ir-se-iam anular entre si caso fossem incluídas na equação 4.1.
- Foi assumido que a energia utilizada para a extração dos materiais e o processo produtivo (em fábrica) são equivalentes para os VEs e os VCIs, pelo que não foram consideradas nesta análise.
- Foi admitido que as baterias são constituídas por material totalmente virgem. Este é um aspeto importante quando se considerar que será necessário substituir a bateria. Esta questão deve-se ao facto de atualmente a reciclagem de baterias ainda não ser significativa, devido essencialmente a dois motivos:
 - As baterias têm um tempo de vida útil de pelo menos 10 anos e, apenas em 2014 é que adoção de VEs a nível mundial começou a ser considerável, ou seja, atualmente não existe uma quantidade expressiva de baterias que necessitem de ser recicladas;
 - O processo de reciclagem das baterias é dispendioso e, numa perspetiva exclusivamente económica, é mais barato produzir baterias inteiramente novas.
- Não foram consideradas as eventuais diferenças de condução e/ou de tráfego em cada caso avaliado.

Por fim, para cada caso foi ainda determinado o ponto de equilíbrio para três cenários diferentes:

- **Cenário 1:** Cenário base. Irá comparar um VCI e um VE ambos de tamanho médio e apenas com a bateria de lítio proveniente do fabrico. Este apresenta ser o caso ideal, porém, pouco provável;
- **Cenário 2:** Considerando que o tempo de vida útil de um VE é de 15 anos e de uma bateria de lítio de 10 anos, é expectável que seja necessário substituir pelo menos uma vez a bateria. Cenário provável tendo em consideração os tempos de vida útil admitidos.

- **Cenário 3:** Semelhante ao cenário 2, porém, a bateria será substituída uma segunda vez, devido, por exemplo, a uma avaria;

4.3 Data Source

Este capítulo pretende identificar e quantificar todas as variáveis do modelo matemático descrito anteriormente. As variáveis foram determinadas recorrendo a estudos já realizados, tendo em conta as imposições referidas nos capítulos 4.1 e 4.2, bem como os dados mais recentes. Com as metas impostas para 2030, o mix energético europeu e chinês encontra-se em constante mudança, assim, são poucos os estudos que se dedicam a quantificar as emissões de cada fase do ciclo de vida dos VEs e dos VCIs. Este aspeto foi considerado na análise dos artigos.

4.3.1 Variáveis da fase de produção

As variáveis de produção presentes na tabela 4.2 foram determinadas através da análise de dois artigos desenvolvidos por Ellingsen et al. e Hao et al..

Tabela 4.2: Resumo das características dos estudos relativamente à fase de produção

Caso	Autores do Artigo	Ano de publicação	Local de produção do veículo	Tipo de veículo	Distância ciclo assumida (km)	E. Prod. VCI	E. Prod. VE
1	Ellingsen et al. [66]	2017	Corpo - Europa	Médio	180 000	3.9 - 5.3	6.3 - 7.1
2			Bateria - N/A	1 500kg		kgCO ₂ -eq./kg	kgCO ₂ -eq./kg
3	Hao et al. [67]	2016	Corpo - China Bateria - China	Médio Classe C (Europa)	-	9.172 tonCO ₂ -eq.	14.642 tonCO ₂ -eq.

De notar que na tabela 4.2 as emissões referentes à produção de VEs são superiores relativamente à produção de VCIs. Como referenciado no ponto 3.1.1, um VE necessita em média quatro vezes mais de metais (tais como o cobre, alumínio e ferro) do que um VCI, assim como de CRMs. Após a extração de CRMs, o produto necessita de processos extra, como, por exemplo, a sua separação de outras matérias-primas e/ou aprimoramento do produto final. Na sua maioria estes processos necessitam de grandes volumes de água, de energia e de outras substâncias químicas (amoníaco, ácido nítrico...), contribuindo assim para o aumento significativo das emissões da produção dos VEs e dos impactos ambientais. Deste modo, o local, o momento da extração e os processos utilizados são os principais fatores que afetam estas emissões [28, 68, 69].

Em termos quantitativos, um relatório da *Volkswagen* considera que as emissões da produção de um VE sejam entre 25 a 50% superiores às de um VCI, enquanto um relatório da *European Enviroment Agency*, baseado mix energético europeu, indica que as emissões da produção de um VE sejam entre 33 a 44% superiores. Para os casos 1 e 2 verifica-se que os VEs emitem mais 34% de CO₂ que os VCIs, estando assim em concordância com os valores apresentados anteriormente. Por outro lado, um outro estudo, que comparou as emissões de VEs e VCIs fabricados na China, averiguou que os VEs emitem mais 60% de CO₂ durante a fase produção do que os VCIs, como constatado para o caso 3. Neste estudo é ainda referido que as emissões poderiam ser reduzidas em cerca 66% caso fosse adotado o sistema de fabrico americano/europeu [32, 67, 70].

Ellingsen et al. indica que o intervalo de valores apresentado para o VE depende do local onde, principalmente, a bateria de lítio será produzida. Dado que, para o caso 1 e 2 se pretende que a bateria seja produzida na China, foi assumido os valores extremos do intervalo para o VE. De forma a se manter a coerência entre dados, foi igualmente considerado o valor extremo para o VCI. Dado que foi assumido que um veículo tem um peso de 1.500kg, verifica-se para os casos 1 e 2:

$$E. Prod. VCI = 5,3 \times 1.500 = 7,950 \text{ tonCO}_2eq \quad (4.3)$$

$$E. Prod. VE = 7,1 \times 1.500 = 10,650 \text{ tonCO}_2eq \quad (4.4)$$

Nos casos 2 e 3 será necessário proceder à substituição da bateria. De acordo com o ICCT a relação entre as emissões de GEE referentes à produção exclusiva de baterias para um VE e a sua capacidade média, encontra-se representada na tabela seguinte:

Tabela 4.3: Capacidade e emissões de GEE da produção exclusiva de baterias na China [38]

Tipo de Veículo	Emissões kgCO ₂ -eq./kWh	Capacidade kWh	Emissões totais tonCO ₂ -eq.
Médio	68	37,2	2,5
Luxo		52,9	3,6
SUV		52,3	3,5

Assim, quando necessário proceder à substituição da bateria, irá haver um aumento de 2,5 tonCO₂ eq na fase de produção.

Deste modo, para cada cenário verificam-se as seguintes variáveis de produção:

Tabela 4.4: Emissões totais durante a fase de produção para os diferentes cenários

Caso/Cenário		E. Prod. VCI tonCO ₂ -eq.	E, Prod. VE tonCO ₂ -eq.
Caso 1	Cenário 1	7,950	10,650
	Cenário 2		10,650+2,5=13,150
	Cenário 3		10,650+(2x2,5)=15,650
Caso 2	Cenário 1		10,650
	Cenário 2		10,650+2,5=13,150
	Cenário 3		10,650+(2x2,5)=15,650
Caso 3	Cenário 1	9,172	14,642
	Cenário 2		14,642+2,5=17,142
	Cenário 3		14,642+(2x2,5)=19,642

4.3.2 Variáveis da fase de uso

Relativamente às variáveis da fase de uso para o caso 1, foi utilizado um estudo realizado por Turid Barkald [71]. A vantagem deste estudo é que apresenta as mesmas suposições que

são adotadas nesta análise, porém, devido ao facto de a produção de eletricidade na Noruega ser próxima de 100% renovável, o autor decidiu assumir que as emissões durante a fase de uso de um VE são nulas.

Tabela 4.5: Resumo das características dos estudos relativamente à fase de uso

Caso	Artigo	Ano de publicação	Classe do veículo de referência	Distância anual assumida (km)	E. Uso VE (gCO ₂ -eq./km)
Caso 1	Turid Barkald [71]	2020	Classe C (Europa)	12.000	0
Caso 2	Märtz et al. [72]	2021	Classe C (Europa)	15.000	64,575
Caso 3	Qinyu Qiao [73]	2019	Classe A (China)	15.000	104,400

Num estudo realizado por Märtz et al. [72], para o caso da UE-27 (caso 2) é expectável que os VEs consumam cerca de 0,205 kWh/km e, por sua vez, que a produção de um kWh seja responsável pela produção de cerca de 315 gCO₂, obtendo assim o valor de 64,575 gCO₂/km.

As nomenclaturas das classificações dos veículos diferem na Europa e na China, porém, de acordo com Nunes et al. [74] e Hao et al. [75], o equivalente a um veículo Classe A na China é um veículo Classe C na Europa (tabela 4.6), tendo em consideração as especificações da NCAP. Deste modo, é viável utilizar os valores do caso 3 para esta análise.

Tabela 4.6: Equivalência das classes de veículos

Europe (NCAP)	USA (NHTSA/EPA)	China (CATARC)
B	Subcompact	A0
C	Compact	A
D	Mid-Size	B
E	Large	C/D

Ao contrário de um VE, as emissões de um VCI não dependem do local onde está a ser utilizado e, como as diferenças do modo de condução e de tráfego não estão a ser consideradas, as emissões durante a fase de uso irão se manter iguais para os três casos. Deste modo, Märtz et al. [72] prevê que um VCI produza 297 gCO₂/km e, como foi assumida uma distância de 12.000 km, verifica-se:

Tabela 4.7: Emissões totais durante a fase de uso

Caso	E. Uso VCI (tonCO ₂ -eq.)	E. Uso VE (tonCO ₂ -eq.)
Caso 1	3,564	0,000
Caso 2		0,775
Caso 3		1,253

4.4 Resultados

Com as variáveis determinadas no ponto anterior e aplicando diretamente a equação 4.2, obtêm-se os resultados apresentados na tabela e figura seguinte.

Tabela 4.8: Resultados de T para cada caso nos diferentes cenários

Cenário	<i>Breakeven point ambiental - T (anos)</i>		
	Caso 1 (Noruega)	Caso 2 (UE-27)	Caso 3 (China)
Cenário 1	0,76	0,97	2,37
Cenário 2	1,46	1,86	3,45
Cenário 3	2,16	2,76	4,53

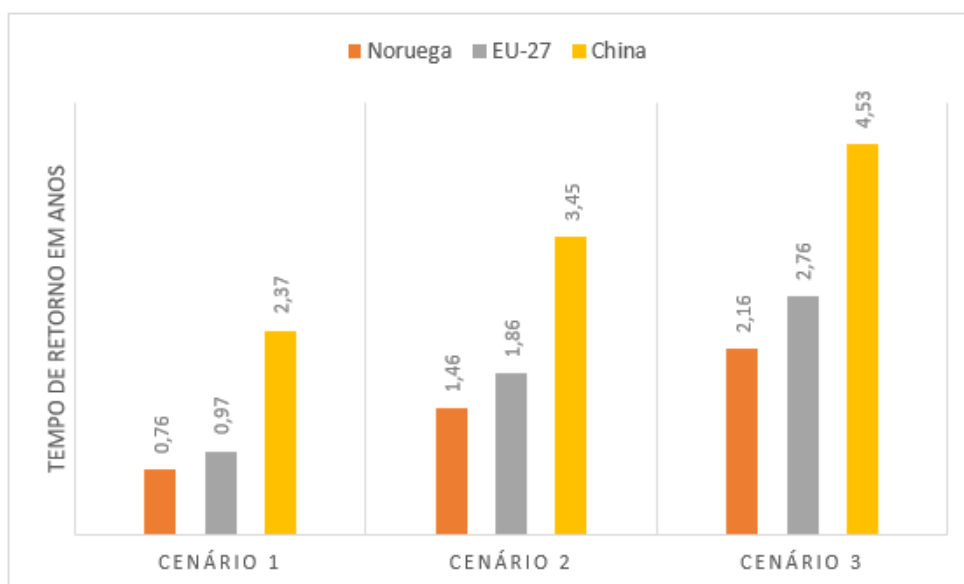


Figura 4.2: Breakeven point ambiental para cada cenário

4.5 Discussão de resultados

Por análise dos resultados apresentados anteriormente, verifica-se que, como seria de esperar o caso 1 (Noruega) apresenta os melhores resultados entre os demais. Esta análise permitiu averiguar a importância do mix energético do local de produção e/ou uso do veículo:

- Quando comparado exclusivamente entre cenários, para mesmo caso, permite avaliar a importância do mix energético durante a extração de matéria-prima/produção. Para o caso 1 e 2 (em que se considerou que as emissões das produções são iguais), verifica-se que aquando a substituição da bateria (cenário 2), o breakeven point ambiental aumenta cerca de 93% comparativamente ao cenário base (cenário 1). Por sua vez, para o caso 3, este aumento é de 46%. Dado que a bateria foi produzida na China, local onde o mix energético é baseado

em combustíveis fósseis, permite concluir que o mix energético é de facto um fator-chave na fase de extração de matéria-prima/produção, dado que aumenta para quase o dobro o *breakeven point* ambiental dos veículos na Europa.

- Comparando os casos 1 e 2, para o mesmo cenário, permite analisar a relevância do mix energético durante a fase de uso. A mudança de um local com cerca de 100% de energia renovável para um local com cerca de 66%, irá aumentar o tempo do ponto de equilíbrio em cerca de 28%.
- Por sua vez, comparando o caso 3 (local com elevada concentração de combustíveis fósseis) com os casos 1 e 2 (locais com elevada concentração de energia renovável), para o mesmo cenário (por exemplo, o cenário 2), verifica-se que o tempo do ponto equilíbrio aumenta 136% e 85% respetivamente.

Como foi ponderado que o tempo de vida útil de um veículo é de 15 anos e de uma bateria de 10 anos, o cenário 2 — que modeliza uma substituição da bateria — pode ser considerado como o cenário mais realista. Deste modo, permite concluir que um VE na Europa estará a produzir menos emissões que um VCI em menos de dois anos, ao fim de um pouco mais de 22.370 km. Mas quando considerado um local com mix energético baseado em fontes não renováveis (Caso 3), será atingido um ponto de equilíbrio ao fim de um pouco mais de três anos e meio (aproximadamente 54.360 km). Por sua vez, a Noruega, que detém todas as condições ideais para a produção de eletricidade, possui um ponto de equilíbrio ao fim de pouco mais 17.500 km.

Considerando um caso hipotético em que o mix energético dos três casos se mantivessem inalterados, seria de prever que, ao fim de 15 anos na Noruega tivessem sido compensadas cerca de 48,26 tonCO₂ por cada VE, 36,64 tonCO₂ na UE-27 e 26,70 tonCO₂ na China (figura 4.3).

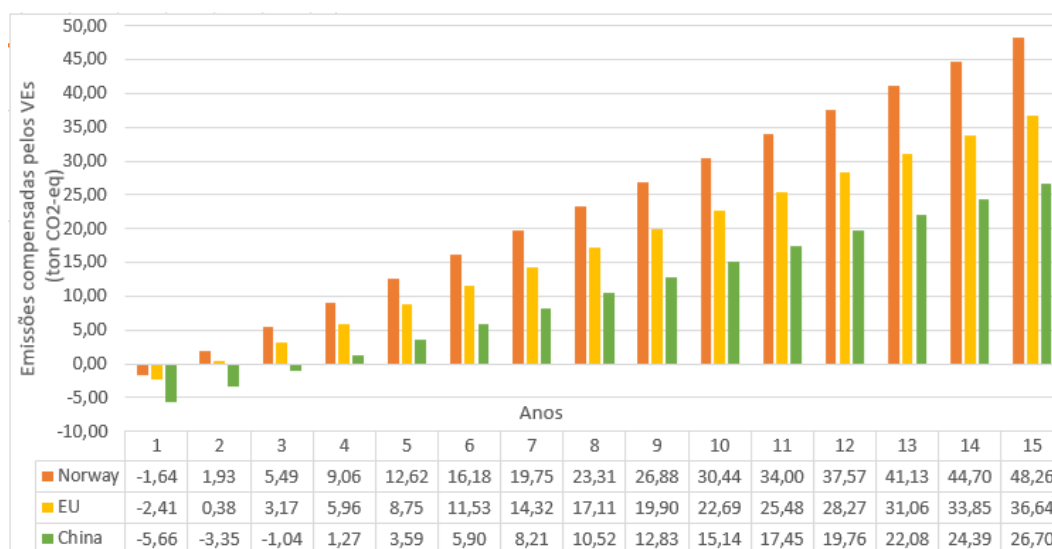


Figura 4.3: Emissões compensadas pelos VEs

Porém, com o aumento da concentração das fontes renováveis no mix energético de cada país, é expectável que, para os casos 2 e 3, as emissões totais compensadas ao fim de 15 anos, evoluem para valores mais próximos aos observados para o caso da Noruega desta análise.

Há ainda que realçar a importância que a reciclagem poderá apresentar. Esta análise seguiu uma perspetiva pessimista: as baterias foram produzidas na China e com material totalmente virgem. Caso se realizasse reciclagem "em massa" das baterias, as emissões durante a fase de produção iriam baixar significativamente e, consequentemente, o *breakeven point* ambiental. Porém, considerando que os processos de reciclagem são processos que necessitam de uma grande quantidade de energia, a diminuição do *breakeven point* ambiental só seria significativa caso a concentração de energias renováveis fosse igualmente expressiva no mix energético. Este é um aspeto muito relevante de modo a aumentar a circularidade de todo o processo.

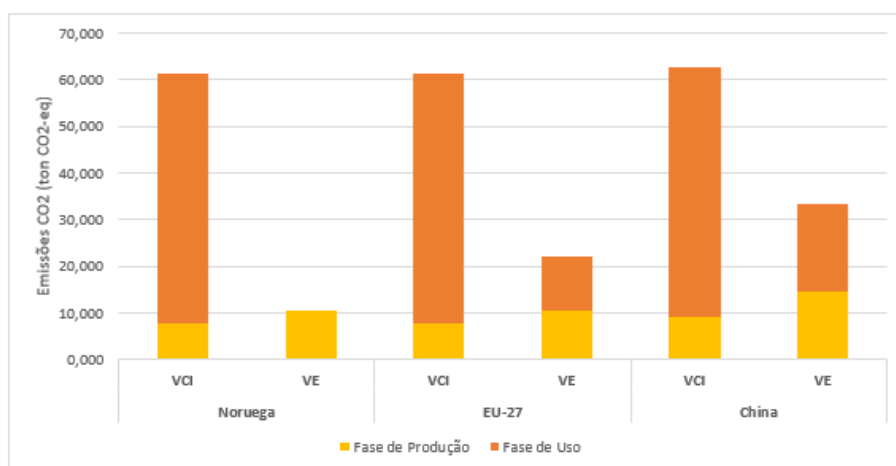


Figura 4.4: Análise comparativa das emissões ao longo do ciclo de vida de um VCI e VE para os diferentes casos (considerando o cenário 1)

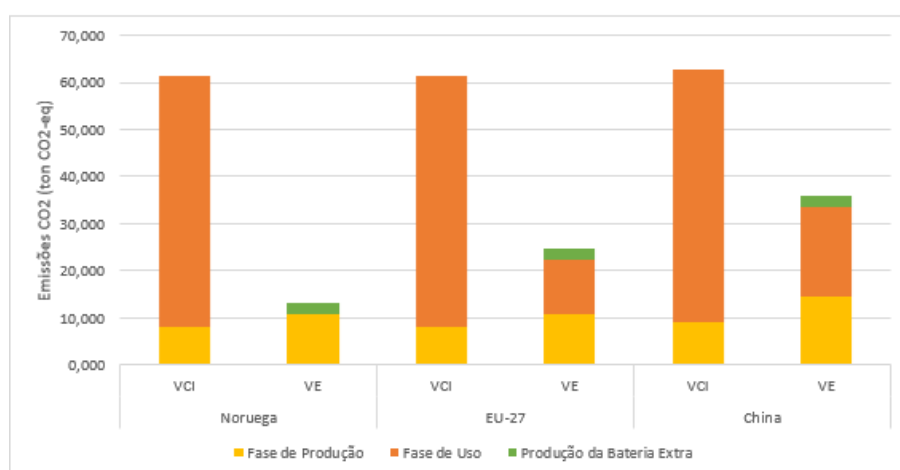


Figura 4.5: Análise comparativa das emissões ao longo do ciclo de vida de um VCI e VE para os diferentes casos (considerando o cenário 2)

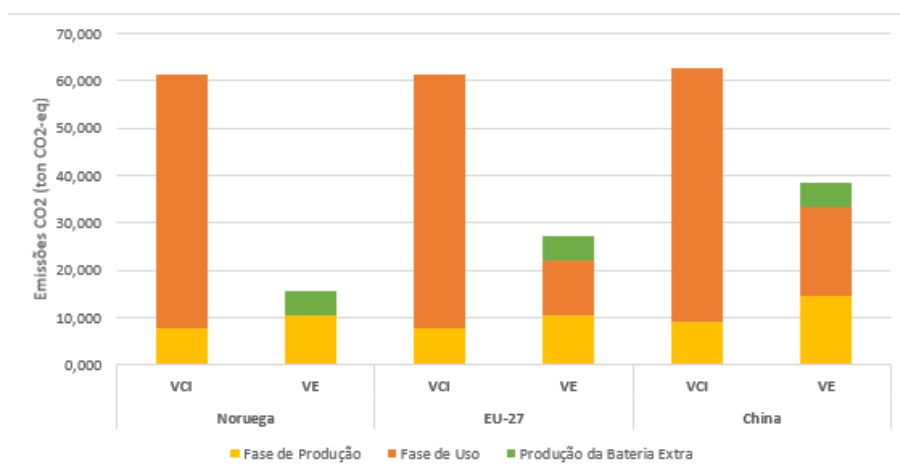


Figura 4.6: Análise comparativa das emissões ao longo do ciclo de vida de um VCI e VE para os diferentes casos (considerando o cenário 3)

Assim, e por análise das figuras anteriores, verifica-se que a introdução de VEs é de facto uma mais-valia para se conseguir atingir os objetivos da limitação das emissões de CO₂ em qualquer um dos cenários considerados. A transição para uma mobilidade elétrica, aliado ao aumento de energias renováveis, deve facto ser um dos principais fatores presentes nos CDNs de cada país de forma a se cumprirem as metas de 2030 e de 2050.

Capítulo 5

Análises Complementares

De modo a complementar a análise da cadeia de valor do VE, é de todo vantajoso explorar outras vertentes ligadas à mobilidade, como, por exemplo, alternativas às tecnologias utilizadas, quais os impactos que o carregamento dos veículos podem provocar na rede elétrica e a importância que as entidades governamentais ocupam na mobilidade elétrica.

Este capítulo pretende assim avaliar e responder às seguintes questões:

- Dado que produção das baterias de lítio caracteriza-se por ser um processo que gera elevadas quantidades de GEE, existe alguma(s) alternativa(s)?
- A conversão de um VCI para um VE é de todo vantajoso? Em caso afirmativo, por que razão esta alternativa não é adotada em grande escala?
- Dado que, ano após ano, há um aumento significativo na compra de VEs, que efeitos o carregamento dos veículos poderão provocar na rede elétrica?
- Existem soluções/tecnologias que previnam situações de congestionamento da linha de distribuição provocados pelo carregamento dos veículos?
- Que papel e de que forma as entidades governamentais ocupam nesta área?
- É possível as entidades governamentais melhorarem os seus incentivos de modo promover a mobilidade elétrica mais eficazmente?
- As questões anteriores aumentam a circularidade do ciclo de vida de um VE?

5.1 Baterias alternativas

As baterias de lítio representam uma cota de mercado de mais de 90%, sendo o seu uso mais notável na indústria de VEs [76]. Todavia, devido à futura escassez de material e aos elevados impactos ambientais da produção, é mais que nunca importante adotar outras alternativas. No entanto, o maior desafio para a adoção de novas baterias é a exigência de se manter o mesmo nível

de desempenho que as atuais baterias de lítio possuem, reduzindo o uso de recursos e os impactos ambientais. Nos subcapítulos seguintes são apresentadas as três alternativas mais promissoras.

5.1.0.1 Bateria de Sódio

Atualmente, as baterias de sódio são a alternativa preferencial às baterias de lítio. O sódio encontra-se no mesmo grupo da tabela periódica que o lítio, ou seja, apresentam propriedades químicas semelhantes. A produção e uso deste tipo de baterias irá ter um baixo impacto ambiental e são facilmente recicláveis. Além disso, a produção de uma bateria de sódio não necessita de outros recursos que sejam escassos, permitindo assim que estas baterias sejam mais baratas entre 30 a 40% do que as de lítio. Contudo, o sódio é mais pesado que o lítio e consequentemente irá aumentar o peso da bateria, o que poderá afetar o desempenho do veículo. Sendo o sódio um elemento com elevada disponibilidade mundial, é expectável que todos os países consigam ser autossuficientes, ou seja, conseguirem produzir as suas próprias baterias sem terem a necessidade de recorrer a matérias-primas ou comprar de outros países, havendo assim uma melhor gestão de recursos e uma redução das emissões de GEE. Estimasse que se houver uma adoção em massa das baterias de sódio, a adoção de VEs a nível mundial poderia aumentar significativamente em pouco espaço de tempo [76].

5.1.0.2 Baterias de Magnésio

Ao contrário do lítio, o magnésio possui uma natureza bivalente que, do ponto de vista químico, é uma vantagem muito importante, dado que irá permitir que a bateria possua uma maior capacidade e densidade de energia. Deste modo, se equiparmos a uma bateria de lítio (com dado tamanho e potência), a bateria de magnésio permitirá obter um maior desempenho e alcance do VE, assim como armazenar energia de forma mais eficiente e a um custo menor. Além disso, da mesma forma que as baterias de sódio, a produção de baterias de magnésio têm um baixo impacto ambiental, não requerem outro tipo de recursos que sejam escassos e a sua reciclagem é um processo simples, tornando estas baterias mais baratas no mercado e menos poluentes relativamente às de lítio. O magnésio é o oitavo elemento mais abundante na crosta terrestre, pelo que a procura deste minério face à procura das baterias para os VEs seria facilmente acessível. Contudo, o magnésio é mais pesado que o lítio, o que naturalmente tornaria a bateria igualmente mais pesada. Por outro lado, há ainda a necessidade de se encontrar um cátodo estável que consiga aumentar a durabilidade da bateria [77].

5.1.0.3 Diminuição da concentração do cobalto

O cobalto representa cerca de 20% da concentração química das baterias de lítio, porém a sua utilização apresenta riscos económicos e sociais. Atualmente, o cobalto é um dos minérios em risco de escassez, e a sua extração é por norma proveniente do subproduto da extração de níquel e cobre. Deste modo, o preço de mercado do cobalto dependerá dos mercados desses dois minérios. Por outro lado, mais de 70% da produção deste minério é proveniente da República Democrática

do Congo, local onde a extração ocorre por trabalho infantil e com poucas condições de segurança. Ao longo dos últimos anos têm sido estudadas novas formas de contrariar tais aspetos, entre as quais substituir ou diminuir a concentração de cobalto (aumentando a concentração de níquel) nas atuais baterias de lítio. Todavia, substituir o cobalto e manter o atual desempenho do produto é um desafio muito complexo. Por outro lado, existe ainda um longo caminho a percorrer desde os resultados obtidos em laboratório e a comercialização destas baterias, dado que o cobalto apresenta um papel fundamental na sua estabilidade. Assim, torna improvável para que a adoção de baterias com pouca ou nenhuma quantidade de cobalto sejam adotadas em grande escala, porém, irá permitir no futuro equilibrar a procura e a oferta de baterias de lítio no mercado. De realçar que a reciclagem de cobalto (que se verifica em pouca escala) ocupa igualmente um papel fundamental na futura adoção deste tipo de baterias. [78].

5.2 Conversão de veículos

Ao longo dos últimos anos, a conversão de VCIs em VEs têm ganhado gradualmente mais expressão no setor automobilístico. Numa perspetiva exclusivamente da EC, a conversão de veículos apresenta ser uma solução excelente, tendo um impacto significativo na crise climática e na economia dos consumidores.

O processo de conversão de um veículo a gasolina/gasóleo em um VEB ou VEH é bastante simples e rápido. Para converter um VCI é apenas necessário remover o motor, a caixa de velocidades e o tanque de combustível – além de alguns outros pequenos componentes – e os substituir por um motor e um conjunto de baterias. Atualmente existem empresas já totalmente autonomizadas para a conversão de veículos e que garantem serem capazes de realizar todo este processo em apenas um dia. Os preços para esta operação variam entre 3.000 € e 8.500 €, dependendo da entidade empresarial, da legislação existente no país e das características pretendidas ao veículo convertido. Tendo em conta que um VE novo custa em média cerca de 30.000 €, a conversão de veículos torna a adoção de VEs mais acessível a quem pretende trocar o seu veículo por um mais sustentável. Por outro lado, a conversão irá impedir que várias toneladas de plástico, de metal e outras matérias-primas de elevado interesse económico sejam descartadas e desperdiçadas, reduzindo significativamente a sua extração, e consequentemente reduzindo as emissões e os impactos ambientais adjacentes [79]. Além disso, é expectável que com a crescente adoção de VEs, futuramente irá haver mais peças doadas no mercado, reduzindo ainda mais os custos da conversão de veículos [79, 80].

Apesar de todas as vantagens inerentes à conversão de veículos, a sua expressão no mercado ainda não é muito significativa. Por conseguinte, Kwon et. al. [81] realizou em 2021 uma análise sobre os motivos deste processo não estar a ser adotado em escala industrial, pelo que concluiu que tal se deve essencialmente a três motivos:

- **Preocupação com a qualidade** — Os consumidores que consideram recorrer à conversão, muitas das vezes não avançam devido à preocupação com a qualidade do veículo final,

equiparado a um VE novo. De acordo com Sunarto Kaleg, com a maturidade tecnológica atual é possível obter níveis próximos da qualidade de um veículo novo, sendo capazes de satisfazer as necessidades de um utilizador comum [82];

- **Falta de legislação e incentivos** — Apenas um conjunto de países (Inglaterra, França e Países Baixos) é que atualmente promovem a conversão de veículos através de incentivos governamentais e regulamentação;
- **Disponibilidade das baterias** — No momento, o maior fator de custo da conversão são as baterias e a sua escassez no mercado. A prioridade atual é a venda das baterias a fabricantes de VEs novos, pelo que as entidades que realizam as conversões de veículos necessitam de comprar a esses fabricantes e, consequentemente o preço não é, de certo modo, acessível;

De acordo com o presidente da EcoMood Portugal: “A conversão de veículos a combustão para elétricos pode ser uma grande oportunidade para Portugal, que tem *know-how* e matérias-primas e poderá criar uma indústria de referência e uma economia circular e de proximidade que gera receita fiscal”. Porém, a grande lacuna em Portugal continua a ser a falta de legislação e incentivos. A Associação de Utilizadores de Veículos Elétricos (UVE) propõe, numa primeira fase, a atribuição de incentivos às empresas, dado que, especialistas consideram que a conversão de veículos numa empresa de distribuição urbana pode reduzir até metade o seu consumo de combustível, o que permite amortizar rapidamente o investimento [80, 83].

5.3 Impactos do carregamento na rede elétrica

Com o objetivo de a UE de acabar com as vendas de VCI até 2030, a adoção de VEs é cada vez mais expressiva no mercado, sendo estimado um aumento de 125 milhões até esse ano [84]. Com a aceleração da eletrificação na mobilidade, os produtores e distribuidores de energia preocupam-se com o potencial impacto que os VEs podem causar na rede elétrica e na procura de eletricidade.

Cerca de 2,6% das atuais vendas de carros correspondem a VEs, representado um pouco mais de 1% da frota global de veículos, de acordo com os dados recolhidos até ao ano de 2019 [85]. É reportado pelo “*Electric Vehicle Outlook 2022*” que, até se atingir a marca de 15% de VEs, não haverá nenhum impacto na rede elétrica, sendo projetado que este valor só será atingido em meados de 2035 [86].

Segundo a organização Euroelectric, num caso hipotético em que 80% da frota de veículos correspondesse a VEs, levaria a um aumento de 10–15% da procura de eletricidade. Com o crescimento de VEs não haverá um aumento imediato ou substancial no consumo total de energia, segundo um estudo da *McKinsey & Company*. Ou seja, os VEs não causarão interrupções abruptas no fornecimento de energia e não há necessidade de aumentar a capacidade de geração de eletricidade num futuro próximo. *McKinsey* afirma ainda que, na Alemanha o crescimento de VEs irá aumentar a procura em um pouco mais de 1% (cerca de 5GW) até 2030, e 4% (cerca de 20 GW)

até 2050. Quase toda essa nova capacidade exigida provavelmente será proveniente de energias renováveis, incluindo energia eólica e solar, e com alguma geração movida a gás (com tendência para gases renováveis) [87].

Embora seja improvável que haja um aumento significativo da procura total de energia, o aumento de VEs irá remodelar a curva de carga, principalmente durante os períodos noturnos (período de vazio normal e super vazio), considerando que, é nesse intervalo que os utilizadores carregarão mais os seus veículos. Os desafios devido à mudança da curva de carga serão mais significativos a nível local, dado que a distribuição de VEs a nível regional variará, isto é, de acordo com *McKinsey* as áreas suburbanas terão um crescimento muito rápido na adoção de VEs devido a uma maior concentração de dispositivos de carregamento. Neste sentido, há que avaliar os diferentes impactos que os diversos tipos de carregamento (lento e rápido) podem exercer na rede local [87].

O carregamento lento (com potência de carregamento abaixo de 22kW) são maioritariamente aplicáveis a locais residenciais, dado que os veículos podem ser deixados a carregar por longos períodos de tempo, observando-se assim um aumento de carga significativo [87, 88]. De acordo com a análise de *McKinsey*, para um *feeder* que alimenta 150 residências com 25% de adesão a VEs, no período noturno a carga iria aumentar em 30% (figura 5.1 a)). Embora este crescimento seja teoricamente elevado, a agregação de muitos domicílios (com e sem VEs) reduz o aumento de carga relativo numa subestação, mesmo em dias atípicos [87].

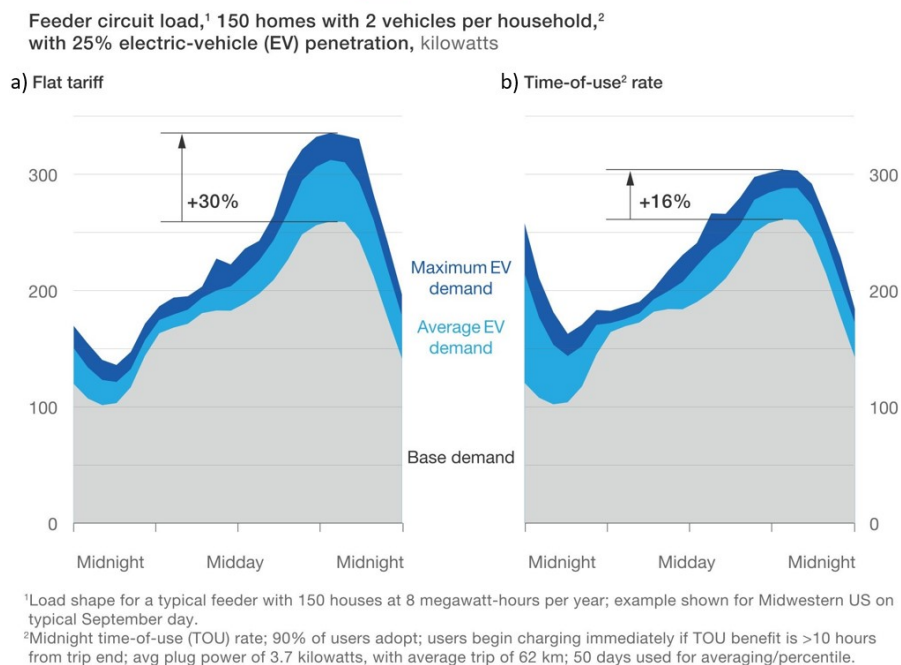


Figura 5.1: Aumento de carga para um *feeder* que alimenta 150 residências com 25% de VEs [87]

Por sua vez, o carregamento rápido (com potência de carregamento acima de 22kW) é utilizado principalmente em locais públicos, podendo carregar o veículo até cinco vezes mais rápido que o

carregamento lento [88]. No entanto, *McKinsey* afirma que uma única estação de carregamento rápido pode exceder rapidamente a capacidade de um transformador de um *feeder* local típico. Caso estas situações não sejam devidamente controladas, poderá resultar em danos graves nos transformadores das subestações, levando posteriormente a investimentos avultados. Desta forma há que explorar antecipadamente algumas soluções. Uma dessas soluções será a aplicação de uma tarifa que influenciará os proprietários de VEs a realizarem o carregamento depois da meia-noite e não no início da noite. A aplicação desta tarifa, conforme a análise, poderá reduzir para metade o aumento na carga de pico noturno (figura 5.1 b)) [87].

Apesar de esta solução permitir que os proprietários de VEs carreguem o seu veículo a um preço mais baixo — o preço da energia é mais barato durante os períodos de vazio — em algumas regiões as emissões de GEE podem ser mais elevadas relativamente aos outros períodos, visto que durante estas horas a concentração de produção renovável pode não ser suficiente para responder à procura. Assim, alternativamente podem ser implementadas soluções mais locais, tais como, a alocação de uma unidade de armazenamento de energia que carrega durante períodos de baixa procura e irá descarregar nos horários de maior procura, reduzindo a carga de pico. Como o custo das baterias continua a diminuir rapidamente, o uso do armazenamento de energia para suavizar os perfis de carga se tornará uma solução cada vez mais atraente.

Todavia, a implementação de soluções alternativas não dispensa que seja necessário realizar análises com vista a investimentos na adaptação da rede elétrica. Estes investimentos podem ser consideravelmente reduzidos caso se resolva os problemas atuais em relação à eficácia do carregamento dos veículos. Durante uma parte significativa do tempo em que os VEs permanecem conectados à rede, eles não se encontram a ser carregados ativamente. Essa percentagem pode variar em mais de 80% para o carregamento doméstico e privado, e cerca de 25% para o carregamento público. Esta situação cria um potencial para os VEs serem uma fonte vital de flexibilidade no sistema de energia. Neste entendimento surgem duas novas tecnologias: *Smart Charging* e *Vehicle-to-grid* [87].

Smart Charging, também designado por V1G, é um sistema unidirecional em que um VE e um dispositivo de carregamento compartilham uma conexão de dados de modo que o proprietário do VE possa controlar de que forma o seu veículo é conectado à rede. Este tipo de carregamento inteligente pode ser usado para uma infinidade de aplicações, como gestão da rede em situações de congestionamento ou regulação da frequência do sistema. V1G é principalmente interessante caso a procura de energia se tornar muito elevada. Nessa situação, pode-se controlar remotamente a potência com que os veículos carregam.

Por outro lado, V2G (*Vehicle-to-Grid*) vai um pouco mais além que o V1G, na medida em que o fluxo de energia é bidirecional (da rede para a bateria ou da bateria de volta para a rede elétrica), permitindo equilibrar as variações na produção e no consumo de energia (figura 5.2). A tecnologia V2G pode ser usada para todas as aplicações do V1G, assim como para aplicações mais exclusivas, tais como o armazenamento a curto prazo para energias renováveis e uma maior capacidade de regulação da frequência do sistema. O uso de V2G irá reduzir os custos de operação em cerca de 12% e as emissões de CO₂ provenientes da geração de eletricidade em 25% , aproximadamente

13,429 kg CO₂/ano (figura 5.3) [89, 90].

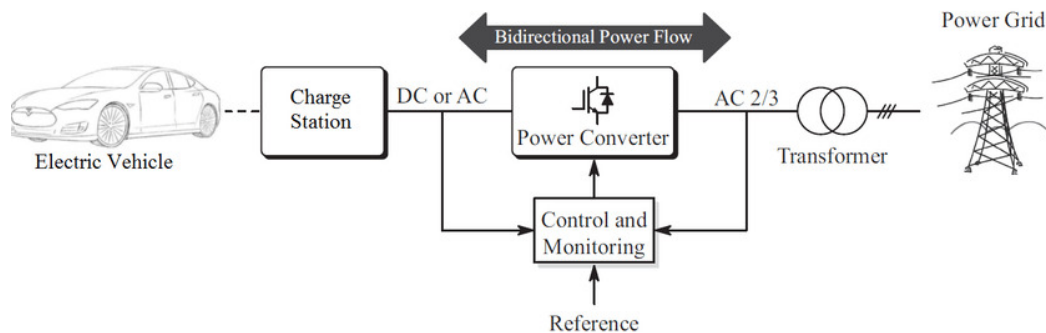


Figura 5.2: Diagrama de blocos simplificado da estrutura V2G [91]

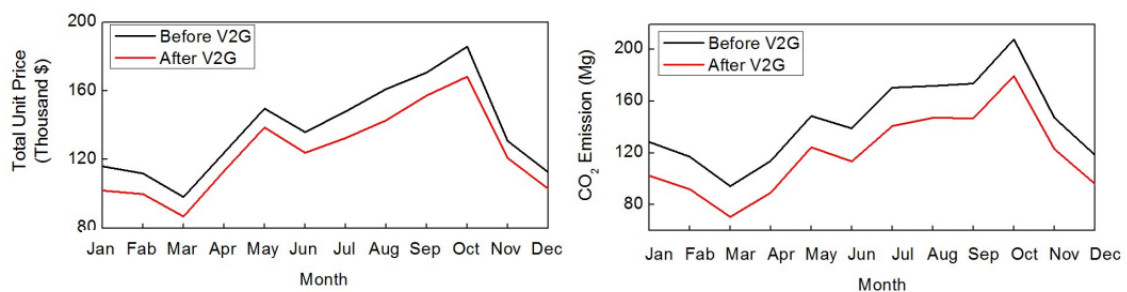


Figura 5.3: Redução do custo e das emissões de CO₂ antes e depois incorporação de V2G [90]

Todavia, de modo a se obter os benefícios que V1G e V2G podem induzir na rede, é necessário que haja alguns investimentos iniciais em infraestruturas de carregamento. Por outro lado, a adoção destas tecnologias irá tornar o sistema mais económico, resiliente e verde, trazendo igualmente lucros para os proprietários de VEs [90].

5.4 Papel das entidades governamentais na mobilidade

As entidades governamentais (inter)nacionais, ocupam um papel fundamental na transição energética e na mobilidade elétrica. Neste sentido, a Noruega apresenta ser a história de maior sucesso, principalmente devido aos pacotes de incentivos desenvolvidos para promover VEs no mercado.

Estes incentivos foram gradualmente introduzidos por diferentes governos e amplas coligações de partidos desde o início dos anos 90 de forma a acelerar a mobilidade elétrica, com objetivo principal de que todos os novos carros vendidos até 2025 devem ser de emissão-zero. Porém, tal só foi possível dado que, devido à sua localização geográfica, a Noruega sempre teve grande capacidade de energia renováveis no seu mix energético, acelerando assim todo o processo para a neutralidade carbónica na indústria automobilística.

Tabela 5.1: Principais incentivos aplicados na Noruega no período 1990-2021 [92]

Incentivo	Período
Sem impostos de compra/importação	1990 - \
Isenção de 25% de IVA na compra	2001 - \
Nenhum imposto rodoviário anual.	1996-2021
Estacionamento municipal gratuito	1999 - 2017
A taxa de estacionamento para VEs um limite máximo de 50% do preço total	2018 - \
Compensação fiscal pelo abate de carrinhas fósseis na conversão para carrinha de emissão zero	2018 - \

Em Portugal há vários incentivos fiscais associados à compra de VEs. No dia 22 de março de 2022 foi publicado o Despacho n.º 3419-B/2022 do Ministério do Ambiente e Ação Climática. A atribuição e a gestão dos apoios deste diploma é da responsabilidade do Fundo Ambiental.

O Estado promove um incentivo para a aquisição de VEs em duas tipologias:

- **Tipologia 1** — veículos ligeiros de passageiros (categoria M1): Atribuição no valor de 4.000€ para pessoas singulares, pela aquisição de um veículo ligeiro de passageiros 100% elétrico novo. Não são elegíveis veículos cujo custo final de aquisição seja superior a 62.500€ (com IVA incluído e todas as despesas associadas).
- **Tipologia 2** — veículos ligeiros de mercadorias (categoria N1): Incentivo no valor de 6.000€ pela aquisição de um veículo ligeiro de mercadorias 100% elétrico novo;

Neste despacho é indicado que “Entende-se por «veículo 100% elétrico novo» qualquer veículo automóvel ligeiro de passageiros, novo, exclusivamente elétrico, da categoria M1 conforme a classificação do IMT, devidamente homologado, e cuja primeira aquisição e matrícula tenham sido feitas em nome do candidato após 1 de janeiro de 2022” [93].

Existem ainda outros benefícios para comprar um carro 100% elétrico que ajudam a compensar o investimento inicial, destacando-se:

- Dedução do valor do IVA da aquisição de VEs para as empresas;
- Isenção do ISV (Imposto Sobre Veículos);
- Isenção de IUC (Imposto Único de Circulação);
- Redução ou isenção dos custos de estacionamento em algumas cidades

O regulamento prevê ainda incentivos para a instalação de carregadores em condomínios multifamiliares com ligação à Rede Mobi.E. De acordo com o despacho indicado: "O incentivo é no valor de 80% do valor de aquisição do carregador, com IVA, até ao máximo de 800€ por carregador, ao qual pode ser acrescido 80% do valor da instalação elétrica associada ao carregador adquirido (incluindo o IVA), até ao máximo de 1.000€ por lugar de estacionamento. No entanto,

o incentivo está limitado a um carregador por condômino, até ao limite de 10 carregadores por condomínio/CPE de acordo com o Código de Ponto de Entrega"[93].

Numa perspetiva global, entre 2018–2019 foram tomadas algumas medidas que moldarão o futuro da indústria automobilística mundial em 2025–2030, com propósito de mitigar as emissões de CO₂ e promover a venda de veículos elétricos. No quadro da figura 5.4, disponibilizado pelo ICCT, encontra-se um resumo das ações governamentais de promoção dos veículos elétricos nos principais mercados. É de notar a falta de políticas e incentivos relativamente à produção de baterias para os VEs. Dado que esta área é de enorme interesse para uma transição de energia limpa, a UE em 2017 criou um projeto designado por *European Battery Alliance* que pretende fornecer investimentos e incentivos fiscais estimados em 250 bilhões de euros para a aplicação das ações destacadas na figura 5.4, aumentando igualmente a competitividade industrial [94].

Area	Action	China	United States	Germany	Japan	France	South Korea	United Kingdom	Canada	Norway	Netherlands
Vehicles	Vehicle sales in 2017 (million vehicles)	25	16	3.4	4.1	2.1	1.5	2.5	2.1	0.2	0.4
	Vehicle manufacturing in 2017 (million vehicles)	25	11	5.6	8.3	1.7	3.7	1.7	2.2	<0.1	0.2
Electric vehicles	Global 2010–2017 electric vehicle sales	39%	24%	4%	6%	4%	1%	4%	2%	6%	4%
	Global 2010–2017 electric vehicle production	37%	21%	13%	14%	5%	2%	2%	0%	0%	0%
	Electric vehicle sales 2017 (thousands)	579	195	53	52	37	14	45	19	62	9
	Electric vehicle production 2017 (thousands)	595	200	146	98	45	30	17	4	0	0
Industrial policy	Research and development support	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Battery cell or electric vehicle production incentive	X	/					X			
	Minimum battery production size incentive	X									
	Local manufacturing tax incentives	X	/	/	/	/	/	/	/		
	Battery production minimum capacity mandate	X									
	Vehicle incentives linked to domestic batteries	X									
Regulatory policy	Long-term efficiency or CO ₂ standards	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Incentive provisions within efficiency regulations	X	X	X		X		X	X	X	X
	Electric vehicle deployment requirements	X	/						/		
	Goal for long-term transition to electric drive	/	/	/		X	/	X		X	X
Consumer support	Vehicle purchase incentive	X	X	X	X	X	/	X	/	X	X
	Government purchasing preferences	X	/	/	X	/	X	/	/	/	/
	Local registration, lottery, auction preference	X									
	High baseline fuel price (i.e., greater fuel savings)			X		X		X		X	X
	Annual vehicle fee exemption		/	X	X			/		X	X
	Discounted/free electric charging	/	/	/	X			/	/	X	X
	Preferential lane (e.g., bus, HOV lane) access	/	/	/						X	X
	Reduced roadway tax or tolls				X			X		X	X
	Preferential parking access	/	/	/		/		/	/	/	/
	Public outreach campaign	/	/	/	/	/		X	/	X	/
Charging Infrastructure	Carbon pricing scheme	X	/	X	X	X		X	/	X	X
	Low carbon fuel incentive for electricity providers		/					/	/		
	Public charging network funding	X	/	X	X	X	X	X	/	X	X
	Home charging equipment tax incentives		/			X	/		/		

Note. Vehicle statistics are for light-duty passenger vehicles; "X" denotes national program; "/" signifies smaller local or regional program.

Figura 5.4: Síntese dos incentivos governamentais nos principais mercados [36]

5.5 Conclusões e Considerações

O capítulo 3 do presente documento permitiu averiguar que a produção de um VE é mais poluente do que de um VCI, devido ao fabrico da bateria de lítio. Apesar de haver a necessidade de se optar por baterias alternativas e com composições químicas diferentes das atuais, conclui-se que tal não é viável ou possível de momento. Embora já se tenha conseguido obter bons resultados em laboratório com as baterias de sódio e magnésio, por exemplo, estas ainda não permitem que, ao serem utilizadas em VEs, se consiga atualmente obter o mesmo desempenho que as baterias de lítio conferem. No entanto, como o lítio é considerado uma matéria-prima crítica, o uso das baterias de sódio e magnésio iria permitir reduzir o custo de aquisição de um VE assim como haver uma melhor gestão dos recursos disponíveis.

Por outro lado, o processo industrial inerente à conversão de veículos apresenta ser uma excelente alternativa para quem pretende trocar o seu veículo de combustão por um mais sustentável e de forma mais económica. A conversão de veículos caracteriza-se por ser um processo rápido no qual é obtido um VE totalmente eficiente. Comparativamente à produção de um VE totalmente novo, a conversão evita que seja necessário utilizar matérias-primas novas, diminuindo a produção de elevadas emissões.

Um dos outros aspetos analisados foram os potenciais efeitos que o carregamento de VEs poderá provocar na rede elétrica. Foi constatado que, apesar de a procura de eletricidade não provocar efeitos graves na rede num futuro próximo, as dificuldades poderiam surgir no aumento de carga nos períodos de vazio nas zonas residenciais. No entanto, essas dificuldades são facilmente ultrapassadas através das tecnologias V1G e V2G. Estas tecnologias permitem melhorar o desempenho técnico da rede em áreas como a eficiência, estabilidade e a regulação da frequência, sendo que V2G permite ainda que as baterias dos VEs funcionem como armazenamento de energias renováveis. Além disso, as tecnologias possibilitam ainda reduzir os custos operacionais e até mesmo potencialmente gerar receita para os proprietários dos VEs.

Paralelamente, foi ainda possível apurar que a evolução da mobilidade elétrica está, em última estância, dependente das entidades governamentais. Ainda que cada vez mais se verifique um esforço maior por parte destas, ainda há algumas vertentes que deviam ser consideradas e ajustadas, como, por exemplo, a promoção de medidas para a produção das baterias dos VEs.

Capítulo 6

Medidas de atuação

Este capítulo pretende, numa primeira fase, identificar medidas/soluções, que direta ou indiretamente, irão aumentar a circularidade de todo o processo do ciclo de vida de um VE. Posteriormente, tendo em conta metodologia aplicada ao caso de estudo, foram igualmente identificadas ações com vista a reduzir o desperdício para qualquer aplicação industrial.

De salientar que soluções apresentam apenas um fundamento exclusivamente teórico. No entanto, a sua aplicação "física" poderá ser um processo complexo devido a estarem dependentes de outros aspetos alheios ao problema em questão como, por exemplo, fatores geopolíticos. Além disso, estas medidas poderão ser ajustadas consoante o aumento da presença das energias renováveis.

6.1 Medidas de atuação aplicáveis à mobilidade

1. **Promover a escolha de veículos menores**, desde que se consiga satisfazer as necessidades do utilizador. Atualmente, têm-se observado um aumento da compra de VEs (figura 3.16), principalmente de veículos de luxo/SUV [95]. De relembrar que o peso e o tamanho do VE são particularmente relevantes, dado que quanto maior o veículo, maior será a capacidade da bateria, ou seja, mais matéria-prima será necessária para a produção do veículo. Por conseguinte, ao se optar por veículos de menor tamanho, haverá uma maior disponibilidade de matéria-prima, permitindo haver uma melhor gestão de recursos e baixando consequentemente as emissões durante a fase de extração e produção de um veículo;
2. Desenvolvimento de mecanismos que permita a população optar por **alternativas de transporte**, como, por exemplo, disponibilização de serviços de *carsharing*, aumento do número de transportes públicos e o seu alcance territorial, etc. A utilização deste tipo de alternativas irá permitir reduzir cerca de 1,83 Gt de CO₂ e 1,64 Gt do uso de material virgem [96] ;
3. Como indicado no subcapítulo 3.1.1, sendo pouco provável que num futuro próximo se verifique uma substituição das CRMs por outras alternativas, uma **mudança no design dos VEs** pode reduzir significativamente o uso destes materiais. Porém, os fabricantes assumem

um novo desafio: reduzir o uso de CRMs sem prejudicar o desempenho dos veículos. A redução deste tipo de materiais é de todo vantajoso considerando os riscos económicos, ambientais e de fornecimento face à procura;

4. **Optar por baterias que tenham um menor impacto ambiental** por unidade de energia fornecida tendo em conta as necessidades do utilizador. As baterias são a principal causa das emissões elevadas da produção de um VE e, deste modo, ao haver uma maior distribuição do tipo baterias existentes (por exemplo, as que se encontram presentes na tabela 3.5) irá permitir melhorar a gestão de matérias-primas e a sua disponibilidade;
5. Considerando que as baterias são maioritariamente carregadas durante a noite e, de modo a evitar aumentos de carga significativos a nível local, será de todo o interesse **mudar os hábitos de carregamento da bateria**, como, por exemplo:
 - Carregar baterias nas horas em há maior concentração de produção renovável, por exemplo, durante as horas com maior concentração de produção fotovoltaica;
 - Optar pelas tecnologias de *smart-charging* (V1G) e “*vehicle to grid*” (V2G) : As tecnologias V1G e V2G apresentam diversas vantagens para a gestão da rede, por exemplo, permite equilibrar as variações da produção do consumo de energia ou ainda carregar a bateria nas horas de menor procura, coincidindo com a geração renovável. Além disso, estas tecnologias podem gerar lucros para os proprietários dos VEs.
 - Optar por *Battery swapping*: Atualmente em alguns automóveis, o utilizador tem a possibilidade de facilmente poder remover a bateria descarregada e substituí-la por uma totalmente carregada. Esta solução, além de aumentar o tempo de vida útil das baterias permite expandir o alcance dos veículos [22].

Deste modo, além de melhorar a gestão da rede elétrica, irá permitir que as baterias sejam carregadas maioritariamente por energia renovável. Assim, é expectável que se observe uma queda das emissões durante a fase de uso dos veículos, tornado a adoção de um VE muito mais económica e acessível.

6. Face à medida anterior, será igualmente necessário **aumentar o número de infraestruturas de carregamento nas zonas urbanas**. Com o aumento de postos de carregamento (e a sua disposição territorial), seria possível aos utilizadores carregar as baterias a qualquer hora do dia, evitando o carregamento noturno e, consequentemente, reduzindo as emissões de GEE e o aumento de carga nos períodos de vazio nas zonas residenciais;
7. **Aumentar a concentração de renováveis no mix energético**. O mix energético é de facto o fator-chave de todo o processo, dado que as emissões em todas as fases, principalmente de produção e de uso do veículo, dependem fortemente deste. Além disso, quanto maior for a concentração renovável, mais baratos serão os processos inerentes a um VE (produção, carregamento, reciclagem...), aumentando assim a EC.

8. Criar um **modelo standard das baterias**. Atualmente a reciclagem de baterias de lítio é complexa dada a variedade dos materiais usados, do *design*, da sua localização no veículo e do seu formato. Apesar de um modelo *standard* completo não ser realista, a definição um conjunto de medidas básicas pode tornar este processo menos demorado e menos complexo. Deste modo, com o aumento da reciclagem das baterias e dos seus componentes, haverá uma queda do consumo de material virgem, tornando inclusive as baterias mais baratas;
9. Dar uma "**segunda vida**" às baterias pós-fim de vida. Após a sua primeira vida útil, é muito provável que as baterias ainda retenham uma capacidade significativa de armazenamento, normalmente entre 75% a 80% da sua capacidade original. Assim, as baterias poderiam desempenhar um papel importante no apoio à rede elétrica, especialmente à medida que as energias renováveis intermitentes se tornam cada vez mais difundidas. O uso de baterias de veículos elétricos em sistemas de armazenamento de energia renovável pode aumentar a vida útil da bateria em 72% e reduzir as emissões de GEE dos VEs em cerca de 42% por quilómetro [97];
10. **Incentivar a conversão de veículos**. A transformação do VCI em um VE é um processo simples, rápido e eficaz. Por ter um custo consideravelmente baixo (cerca de 8.500€) relativamente à compra de um veículo novo, a adoção de um VE tornar-se-á mais acessível. A conversão permite que várias matérias-primas de elevado interesse económico não sejam descartadas e desperdiçadas, reduzindo a sua extração e os impactos ambientais adjacentes. No entanto, seria de todo o interesse que houvesse um esforço político de modo a promover esta solução (por exemplo, por legislação e incentivos financeiros), aspeto que atualmente apenas se verifica em alguns países (Inglaterra, França e Países Baixos);
11. **Investimento em trabalho de investigação e no desenvolvimento de novas tecnologias**. Apesar desta medida parecer um pouco paralela ao objetivo de aumentar a EC do processo é, porém, uma das mais importantes. A sua aplicação irá permitir:
 - Descobrir novos tipos de matérias-primas/criar novos produtos que, no futuro, poderão substituir as atuais CRMs. Além de se observar uma melhor gestão dos recursos e, considerando que as CRMs se encontram maioritariamente nas baterias, a produção destas tornar-se-á economicamente mais viável afetando positivamente os processos de reciclagem;
 - Como referido no ponto 3.4, atualmente a reciclagem da maior parte dos componentes das baterias dos VEs (principalmente das CRMs), não acontece a escala industrial, dado que é mais económico produzir uma bateria através de material virgem. Deste modo, o desenvolvimento de sistemas de reciclagem são de elevada importância para aumentar a circularidade;
 - Com a evolução dos sistemas e das infraestruturas de extração, produção e reciclagem, irá permitir baixar o custo da adoção de um VE;

6.2 Medidas de atuação gerais aplicáveis à indústria

1. **Aumentar a concentração de renováveis no mix energético.** É impossível implementar eficazmente uma EC na indústria sem uma ótima concentração de energia renovável. Quanto maior for esta concentração, observar-se-á uma queda das emissões durante os processos de produção inerentes à aplicação industrial. Consequentemente, a reciclagem dos produtos será mais acessível e economicamente viável (aspeto que por vezes não se verifica), reduzindo o uso de recursos. De sublinhar que, com as medidas e planos já implementados com intuito de mitigar as alterações climáticas é expectável que, entre 2030 e 2050, a geração renovável aumente consideravelmente.

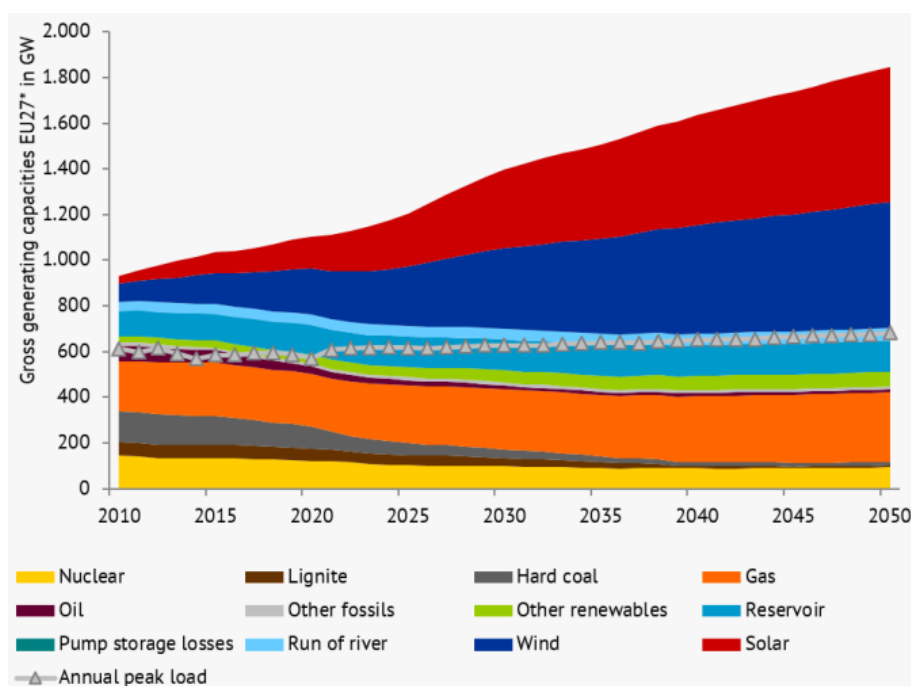


Figura 6.1: Projeção de potência instalada na EU [98]

A figura 6.1 representa a uma projeção realizada em 2021 da evolução do mix energético europeu. No entanto, devido à invasão da Rússia à Ucrânia em fevereiro de 2022, a Comissão Europeia pretende acelerar a transição energética através do plano REPowerEU — de modo a acabar com a dependência da UE dos combustíveis fósseis. Este plano constitui uma panóplia de medidas financeiras e jurídicas que permitirão criar uma nova infraestrutura e um novo sistema energético;

2. **Apoiar a simbiose industrial,** por exemplo, através da criação de comunidades de energia renovável para as zonas industriais. Deste modo, será possível aumentar da autonomia das empresas face às oscilações do preço de energia e reduzir os custos de operação. Além disso, o desenvolvimento e a criação de outro tipo de redes simbióticas de cooperação entre empresas (por exemplo, a partilha de serviços/infraestrutura e de resíduos/subprodutos) permite uma diminuição do consumo de materiais e energia;

3. **Efetuar medições constantes.** Se não forem realizadas medições, será difícil acompanhar o progresso de forma significativa e, nem será possível identificar quais os problemas mais impactantes. Em muitas situações é notável a falta de medições. A título de exemplo, na análise do caso de estudo deste documento um dos principais desafios foi a recolha de dados, uma vez que eram poucas as entidades que de facto realizavam medições constantes ao longo do tempo ou, em algumas situações, nem medições eram realizadas, sendo necessário recorrer a estimativas e projeções. A recolha de dados irá conferir às indústrias a capacidade de acompanhar o seu progresso em direção aos seus objetivos circulares e sustentáveis;
4. **Desenvolver ferramentas digitais para partilha de dados.** O conhecimento de dados é o fator-chave para a evolução e a inovação. As entidades governamentais e as instituições ligadas à avaliação estatística devem priorizar a recolha frequente e simplificada de dados, tanto no nível macro, como a nível micro. Deve igualmente haver uma colaboração com as empresas para disponibilizar ao público os dados do setor privado, a fim de ser possível a tomada de decisões circulares e, posteriormente, analisar o seu impacto. Por conseguinte, as indústrias ao utilizarem as ferramentas digitais irão conseguir avaliar a cadeia de valor da sua atividade, desde produção até ao consumo final do produto, identificando assim as estratégias circulares que devem ser aplicadas modo a obter o melhor impacto possível;
5. **Implementar medidas e diretivas para aumentar a competitividade industrial.** Muitas empresas que decidem implementar medidas circulares afirmam que ainda enfrentam desafios significativos na competitividade com outras indústrias do mesmo setor (devido essencialmente à subida de preços dos seus produtos em virtude dos processos de reciclagem de matérias-primas). Por outro lado, outras atividades alegam que a falta de capital é uma barreira para conseguirem expandir as suas operações circulares [99]. Em suma, é necessária uma maior atenção neste domínio, que pode assumir a forma de financiamento para projetos de integração e desenvolvimento, ou ainda através de outros instrumentos económicos, como, por exemplo, incentivos fiscais para empresas que já se encontram a operar num modelo de negócio circular;
6. **Apoiar a adoção de produtos circulares.** Grande parte dos consumidores ainda são céticos em relação a estes produtos ou realmente não entendem quais os seus benefícios. Além disso, o preço, a perceção sobre a confiabilidade e a qualidade dos produtos circulares parecem ser os fatores mais importantes para a sua adoção [99]. Assim, são necessários mecanismos para a dinamização de informação sobre estes produtos, por exemplo, por meio de campanhas de consciencialização. Ao haver um aumento do consumo de produtos circulares por parte dos consumidores finais, irá obrigar as empresas a adotar estratégias circulares de tal forma que se consigam manter competitivas no mercado;
7. **Investimento em infraestruturas, inovação tecnológica e trabalhos de investigação** por parte das indústrias. Em muitas situações, a maturidade tecnológica não sofre alterações

durante largos períodos de tempo, ou seja, não conseguem acompanhar os progressos tecnológicos. O desenvolvimento tecnológico e de infraestruturas é essencial para a transição circular. Além disso, a realização de estudos por parte das empresas sobre a sua atividade irá permitir identificar os problemas e as estratégias circulares que devem ser implementadas.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalho Futuro

7.1 Satisfação dos Objetivos

Os resultados apresentados nesta dissertação vieram comprovar que, de facto, a introdução de veículos elétricos irá permitir reduzir as emissões CO₂ do setor da mobilidade, ajudando igualmente a cumprir as metas estabelecidas pelas Nações Unidas para 2030. Todavia, após ter sido avaliado todo o ciclo de vida de um veículo elétrico — comparando-o inclusivamente com o ciclo de vida de um veículo de combustão interna — é notável que ainda há espaço para serem implementadas medidas circulares e assim aumentar a sustentabilidade e reduzir o desperdício neste setor.

Apesar de todos os incentivos e políticas atualmente existentes, a prioridade das entidades governamentais é aumentar a quota de veículos elétricos na sua frota e não melhorar alguns aspetos que merecem a sua atenção como, por exemplo, aperfeiçoar os processos de produção dos veículos. A produção dos veículos elétricos caracteriza-se por ser consideravelmente poluente, dado que a produção das baterias contém matérias-primas críticas, isto é, materiais que são de elevada importância económica, que se encontram em risco de fornecimento e utilizam grandes quantidades de energia para o processo da sua extração, ou seja, as baterias aumentam substancialmente as emissões e o preço do veículo. Deste modo, algumas das ações circulares propostas — por exemplo, a escolha de veículos menores, a conversão de veículos e o investimento em materiais/baterias alternativas — irão permitir, se implementadas, contrair esta questão.

Por outro lado, há outro fator que merece ser considerado como uma prioridade: a reciclagem dos componentes do veículo pós-fim de vida. Os processos de reciclagem atuais ainda não se encontram autonomizados para os veículos elétricos nem para as suas baterias, razão para a qual a taxa de reciclagem seja relativamente baixa atualmente. Considerando que os veículos e as baterias apresentam uma elevada concentração de matérias-primas críticas, e que no futuro a disponibilidade destas não poderá responder à procura, as medidas identificadas neste trabalho, como a adoção de um modelo *standard* das baterias e o investimento em trabalho de investigação e no desenvolvimento de novas tecnologias, apresentam ser vitais para o futuro da mobilidade elétrica.

Ao longo da análise foi possível constatar que o mix energético é o fator-chave para a implementação da economia circular na mobilidade. Quanto maior for a taxa de energia proveniente de fontes renováveis, irá se observar uma queda das emissões em todas as fases do ciclo. Além disso, permitirá que os atuais processos de reciclagem sejam mais acessíveis, dado que atualmente não são economicamente viáveis. Deste modo, foi possível concluir em *Grow Countries* o tempo que um veículo elétrico irá compensar as emissões produzidas durante o ciclo de vida pode ser mais do dobro que nos *Shift Countries*. Por conseguinte, a Noruega apresenta ser o exemplo a seguir no que toca à mobilidade elétrica, tendo sido determinado que, ao fim de apenas um ano e meio (cerca de 17.500 km percorridos) um veículo elétrico novo estará a produzir menos emissões que um veículo de combustão interna de características semelhantes. Por sua vez, na China o ponto de equilíbrio das emissões sobe para três anos e meio (54.360 km), enquanto o caso médio da UE-27 este ponto será atingido ao fim de quase dois anos (22.370 km).

Porém, ao longo deste trabalho foi notável que existe uma falta de medições de forma constante e de disponibilidade de dados, por exemplo, muitos dos dados utilizados para calcular o ponto de equilíbrio das emissões de um veículo elétrico foram calculados através de suposições e/ou projeções. Se não forem realizadas medições, será difícil de acompanhar o progresso de forma significativa e, nem será possível identificar quais os problemas mais impactantes de modo a aplicar ações corretivas e circulares. De igual modo, o conhecimento e a partilha de dados é o fator-chave para a evolução e a inovação, conferindo a qualquer tipo de indústria a capacidade de acompanhar o seu progresso em direção aos seus objetivos circulares e sustentáveis.

7.2 Trabalho Futuro

Os resultados do trabalho desenvolvido nesta dissertação, principalmente no que contempla a mobilidade elétrica, podem inspirar outros estudos de investigação. Seria de todo o interesse que a análise realizada no capítulo 4 pudesse ser reaproveitada e melhorada, por exemplo, com dados mais recentes e que algumas das simplificações realizadas (emissões da fase de fim de vida, diferentes condições de tráfego/condução, diferentes taxas de reciclagem dos componentes, etc.) pudessem ser incluídas no modelo. Além disso, essa mesma análise poderá servir como base para se realizar uma avaliação de custo-benefício da adoção de veículos elétricos.

Referências

- [1] S. P. Michaux, *Restructuring the Circular Economy into the Resource Balanced Economy*, 2021. [Online]. Available: www.gtk.fi
- [2] *Paris Agreement*, accessed: 2022-02-13. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/international-action-climate-change/climate-negotiations/paris-agreement_pt
- [3] *Sustainable Development Goals | International Partnerships*, accessed: 2022-02-13. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/international-partnerships/sustainable-development-goals_pt
- [4] L. et al. Haigh, *Circularity Gap Report 2021*, Circle Economy, 2021. [Online]. Available: <https://www.circularity-gap.world/2021>
- [5] *Climate at a Glance | National Centers for Environmental Information (NCEI)*. [Online]. Available: https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series/globe/land_ocean/1/2/1880-2020
- [6] *Total greenhouse gas emission trends and projections in Europe*. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/ims/total-greenhouse-gas-emission-trends>
- [7] E. Council, *Climate change summit COP26: why it matters - Consilium*, 11 2021. [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/climate-change/paris-agreement/cop26/>
- [8] W. Haas, F. Krausmann, D. Wiedenhofer, and M. Heinz, *How circular is the global economy?: An assessment of material flows, waste production, and recycling in the European union and the world in 2005*, *Journal of Industrial Ecology*, 2015, doi: <https://doi.org/10.1111/JIEC.12244>.
- [9] *Communication From The Commission - The European Green Deal*, 2020. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0640&from=ET>
- [10] *Circular economy action plan*. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/environment/strategy/circular-economy-action-plan_en
- [11] *The EU Green Deal – a roadmap to sustainable economies*. [Online]. Available: <https://www.switchtogreen.eu/the-eu-green-deal-promoting-a-green-notable-circular-economy/>
- [12] *A European Green Deal | European Commission*. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

- [13] E. Commission, *100 Climate-neutral Cities by 2030 – by and for the Citizens* | European Commission.
- [14] A. Godson, *King or Pawn? Where does REPowerEU leave Europe?* - Eurocities. [Online]. Available: <https://eurocities.eu/latest/king-or-pawn-where-does-repowereu-leave-europe/>
- [15] *REPowerEU: Ação conjunta para uma energia mais acessível, segura e sustentável*. [Online]. Available: <https://www.dgae.gov.pt/comunicacao/noticias/repowereu-acao-conjunta-para-uma-energia-mais-acessivel-segura-e-sustentavel.aspx>
- [16] C. Europeia, *Plano REPowerEU*, 5 2022. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:fc930f14-d7ae-11ec-a95f-01aa75ed71a1.0020.02/DOC_1&format=PDF
- [17] *Liderar a Transição*, 2017. [Online]. Available: <https://eco.nomia.pt/pt/recursos/noticias/paec>
- [18] *Recuperar Portugal, Construindo o futuro Mecanismo de Recuperação e Resiliência*, 4 2021. [Online]. Available: <https://recuperarportugal.gov.pt/documentacao/>
- [19] *Estratégia Comum De Desenvolvimento Transfronteiriço*, 9 2020. [Online]. Available: <https://portugal2020.pt/apresentada-estrategia-comum-de-desenvolvimento-transfronteirico/>
- [20] Z. Petrovi, N. Mason, S. Hamaguchi, N. Ulibarri, D. Han, D. B. Agusdinata, W. Liu, H. Eakin, and H. Romero, *Socio-environmental impacts of lithium mineral extraction: towards a research agenda*, Biological Effects and Regulatory Control, doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae9b1>.
- [21] *Tipos de Carros Elétricos - Veículos Elétricos (VE)* | NeoCharge. [Online]. Available: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/tipos-veiculos-eletricos>
- [22] *Electric vehicle life cycle analysis and raw material availability*, 2017. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-014-0788-0>
- [23] C. Europeia, *Critical raw materials*, 2020. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_pt
- [24] G. S. of Sweden, *Critical raw materials*, 2021. [Online]. Available: <https://www.sgu.se/en/mineral-resources/critical-raw-materials/>
- [25] G. A. Blengini, C. E. Latunussa, U. Eynard, C. T. de Matos, D. Wittmer, K. Georgitzikis, C. Pavel, S. Carrara, L. Mancini, M. Unguru, D. Blagoeva, F. Mathieux, and D. Pennington, “Study on the eu’s list of critical raw materials (2020) final report,” 2020.
- [26] E. Commission, *Report on critical raw materials and the circular economy - Publications Office of the EU*, 11 2018. [Online]. Available: <https://op.europa.eu/pt/publication-detail/-/publication/d1be1b43-e18f-11e8-b690-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-80004733>
- [27] *Critical Raw Materials and the Circular Economy. Background report*, Report EUR 28832 EN, 2017, doi: <https://doi.org/10.2760/378123>. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/jrc>
- [28] T. R. Hawkins, B. Singh, G. Majeau-Bettez, and A. H. Strømman, *Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles*, Journal of Industrial Ecology, 2013, doi: <https://doi.org/10.1111/J.1530-9290.2012.00532.X>.

- [29] MIT, *On the Road in 2020: A life-cycle analysis of new automobile technologies* | MIT Energy Initiative. [Online]. Available: <https://energy.mit.edu/publication/on-the-road-in-2020-a-life-cycle-analysis-of-new-automobile-technologies/>
- [30] K. Suzuki, Y.-A. Chien, K. Hashigata, al, T. Yoshida, S. Makino, Y. Ayato, V. K. Jayswal, A. M. Ritcey, J.-F. Morin, L. A.-W. Ellingsen, B. Singh, and A. H. Strømman, *The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles*, Environmental Research Letters, 5 2016, doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/054010>.
- [31] R. Nealer, D. Reichmuth, and D. Anair, *Cleaner Cars from Cradle to Grave How Electric Cars Beat Gasoline Cars on Lifetime Global Warming Emissions*, 2015. [Online]. Available: www.ucsusa.org
- [32] M. Thomas, L. A.-W. Ellingsen, and C. R. Hung, *Research for TRAN Committee-Battery-powered electric vehicles: market development and lifecycle emissions STUDY*.
- [33] T. C. Wanger, *The Lithium future—resources, recycling, and the environment*, Conservation Letters, 6 2011, doi: <https://doi.org/10.1111/J.1755-263X.2011.00166.X>,.
- [34] *Electric Car Batteries and Characteristics* | Omazaki Group. [Online]. Available: <https://www.omazaki.co.id/en/electric-car-batteries-and-their-characteristics/>
- [35] *How technology, recycling, and policy can mitigate supply risks to the long-term transition to zero-emission vehicles*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/346972651_How_technology_recycling_and_policy_can_mitigate_supply_risks_to_the_long-term_transition_to_zero-emission_vehicles
- [36] N. Lutsey, M. Grant, S. Wappelhorst, and H. Zhou, *Power Play: How Governments Are Spurring the Electric Vehicle Industry*, 5 2018.
- [37] H. Ritchie and M. Roser, *Energy Mix*, Our World in Data, 11 2020. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/energyhttps://ourworldindata.org/energy-mix>
- [38] G. Bieker, *A Global Comparison of the Life-cycle Greenhouse Gas Emissions of Combustion Engine and Electric Passenger Cars*, 2021. [Online]. Available: www.theicct.orgcommunications@theicct.org
- [39] *Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives - TERM 2018 — European Environment Agency*. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/electric-vehicles-from-life-cycle>
- [40] S. Rangarajua and L. D. Vroeyb, *Impacts of electricity mix, charging profile, and driving behavior on the emissions performance of battery electric vehicles: A Belgian case study*. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1755-263X.2011.00166.x>
- [41] *BU-205: Types of Lithium-ion - Battery University*. [Online]. Available: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>
- [42] H. Hao, Z. Mu, S. Jiang, Z. Liu, and F. Zhao, *GHG Emissions from the Production of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles in China*, Sustainability 2017, Vol. 9, Page 504, 4 2017, doi: <https://doi.org/10.3390/SU9040504>.

- [43] A. Nordelöf, M. Messagie, A. M. Tillman, M. L. Söderman, and J. V. Mierlo, *Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment?*, 10 2014, doi: <https://doi.org/10.1007/S11367-014-0788-0/TABLES/6>.
- [44] N. Hooftman, L. Oliveira, M. Messagie, T. Coosemans, and J. V. Mierlo, *Environmental Analysis of Petrol, Diesel and Electric Passenger Cars in a Belgian Urban Setting*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 1 2016, doi: <https://doi.org/10.3390/EN9020084>.
- [45] R. S. H. Skov and L. M. Iversen, *Noise from electric vehicles*, 2015.
- [46] C. Vlahoplus and B. Lozier, *Charging up: A review of electric vehicle workplace charging* | Greenbiz. [Online]. Available: <https://www.greenbiz.com/article/charging-review-electric-vehicle-workplace-charging-sponsored>
- [47] F. Ahmad, A. Iqbal, I. Ashraf, M. Marzband, and I. Khan, *Optimal location of electric vehicle charging station and its impact on distribution network: A review*, Energy Reports, 11 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2022.01.180>.
- [48] ACEA, “Electric cars: 10 eu countries do not have a single charging point per 100km of road - acea - european automobile manufacturers’ association,” 9 2021. [Online]. Available: <https://www.acea.auto/press-release/electric-cars-10-eu-countries-do-not-have-a-single-charging-point-per-100km-of-road/>
- [49] OPOCE, *EUR-Lex - 32000L0053 - PT*, Jornal Oficial nº L 269 de 21/10/2000 p. 0034 - 0043;.
- [50] M. A. Reuter, A. V. Schaik, O. Ignatenko, and G. J. D. Haan, *Fundamental limits for the recycling of end-of-life vehicles*, Minerals Engineering, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2005.08.014>.
- [51] *EUR-Lex - Baterias - PT*. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32006L0066&from=PT>
- [52] *What is the environmental impact of lithium batteries?* [Online]. Available: <https://changeit.app/blog/2021-03-26-environmental-impact-of-lithium-batteries/>
- [53] T. . Environment, *Weak climate rules put Europe’s battery boom at risk*, 2021.
- [54] *New registrations of electric vehicles in Europe*. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/ims/new-registrations-of-electric-vehicles>
- [55] *Energy: Key Charts - Our World in Data*. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/energy-key-charts>
- [56] *European Electricity Review: H1-2021* | Ember. [Online]. Available: <https://ember-climate.org/insights/research/european-electricity-review-h1-2021/>
- [57] *Change in distance travelled by car* | ODYSSEE-MURE. [Online]. Available: <https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-by-sector/transport/distance-travelled-by-car.html>
- [58] T. R. Hawkins, O. M. Gausen, and A. H. Strømman, *Environmental impacts of hybrid and electric vehicles-a review*, doi: <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0440-9>.
- [59] T. R. Hawkins, B. Singh, G. Majeau-Bettez, and A. H. Strømman, *Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles*, Journal of Industrial Ecology, 2 2013, doi: <https://doi.org/10.1111/J.1530-9290.2012.00532.X>.

- [60] D. M. Messagie, *Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles*, 2021. [Online]. Available: http://www.trankvile.de/WebRoot/Store8/Shops/79722721/MediaGallery/Neuer_Ordner14/Studien/TRANKVILE_electric_vehicles_Studie_TE_-_draft_report_v04.pdf
- [61] *Multidimensional assessment of passenger cars: Comparison of electric vehicles with internal combustion engine vehicles*, Procedia CIRP, 1 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2020.01.101>.
- [62] E. J. Cairns and P. Albertus, *Batteries for Electric and Hybrid-Electric Vehicles*, 6 2010, doi: <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-CHEMBIOENG-073009-100942>.
- [63] P. Keil, S. F. Schuster, H. Hesse, R. Arunachala, C. V. Lüders, and A. Jossen, *Lifetime Analyses of Lithium-Ion EV Batteries Nanostructured Metal oxide in organic solar cells View project Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen View project Lifetime Analyses of Lithium-Ion EV Batteries*, 2015. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/286242928>
- [64] *How long does an electric car battery last - Renault Group*. [Online]. Available: <https://www.renaultgroup.com/en/news-on-air/news/what-is-the-lifespan-of-an-electric-car-battery/>
- [65] J. Das, *Comparative life cycle GHG emission analysis of conventional and electric vehicles in India*, Environment, Development and Sustainability, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/S10668-021-01990-0>.
- [66] *The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles*, 2016, doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/054010>.
- [67] Q. Qiao, F. Zhao, Z. Liu, S. Jiang, and H. Hao, *Comparative Study on Life Cycle CO2 Emissions from the Production of Electric and Conventional Vehicles in China*, Energy Procedia, 5 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.03.827>.
- [68] E. Helmers and M. Weiss, *Energy and Emission Control Technologies Dovepress Advances and critical aspects in the life-cycle assessment of battery electric cars*, 2017, doi: <https://doi.org/10.2147/EECT.S60408>.
- [69] J. Baars, T. Domenech, R. Bleischwitz, H. E. Melin, and O. Heidrich, *Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce reliance on raw materials*, Nature Sustainability 2020 4:1, 9 2020, doi: <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00607-0>.
- [70] *Electric Vehicles with Lowest CO2 Emissions | Volkswagen Newsroom*. [Online]. Available: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/electric-vehicles-with-lowest-co2-emissions-4886>
- [71] T. A. Barkald, *An assessment of the cost-effectiveness of the Norwegian EV policy between 2010-2019*, 2020.
- [72] A. M. et al, *Global perspective on CO₂ emissions of electric vehicles*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf8e1>.
- [73] *The Role of Electric Vehicles in Decarbonizing China's Transportation Sector | Belfer Center for Science and International Affairs*. [Online]. Available: <https://www.belfercenter.org/publication/role-electric-vehicles-decarbonizing-chinas-transportation-sector>

- [74] B. Nunes, D. Bennett, and D. Shaw, *Green operations strategy of a luxury car manufacturer*, Technology Analysis and Strategic Management, 1 2016, doi: <https://doi.org/10.1080/09537325.2015.1068933>.
- [75] X. Hao, Y. Zhou, H. Wang, and M. Ouyang, *Plug-in electric vehicles in China and the USA: a technology and market comparison*, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 3 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/S11027-019-09907-Z/TABLES/3>. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11027-019-09907-z>
- [76] *Sodium Biphenyl as Anolyte for Sodium–Seawater Batteries*, Advanced Functional Materials, 6 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/ADFM.202001249>.
- [77] R. Shah, V. Mittal, E. Matsil, and A. Rosenkranz, *Magnesium-ion batteries for electric vehicles: Current trends and future perspectives*, 3 2021, doi: <https://doi.org/10.1177/16878140211003398>.
- [78] J. Baars, T. Domenech, R. Bleischwitz, H. E. Melin, and O. Heidrich, *Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce raw material reliance*. [Online]. Available: <https://orcid.org/0000-0002-6581-5572>
- [79] *How Electric Car Conversion Works — IrishEVs*. [Online]. Available: <https://www.irishevs.com/how-electric-car-conversion-works>
- [80] *Conversão de veículos a combustão para elétricos: uma oportunidade para Portugal*, Motor24, 9 2020. [Online]. Available: <https://www.motor24.pt/sites/conversao-de-veiculos-a-combustao-para-eletricos-uma-oportunidade-para-portugal/1486817/>
- [81] C. H. Kwon and H. R. Byun, *Analysis of Relative Importance on Electric Vehicle Conversion Intention*, Proceedings - 2021 21st ACIS International Semi-Virtual Winter Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing, SNPD-Winter 2021, 1 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/SNPDWINTER52325.2021.00030>.
- [82] S. Kaleg, A. Hapid, and M. R. Kurnia, *Electric Vehicle Conversion Based on Distance, Speed and Cost Requirements*, Energy Procedia, 4 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2015.03.276>.
- [83] P. Reis, *Converta o seu carro num veículo elétrico por apenas 5000 Euros*, PortalEnergia, 8 2019. [Online]. Available: <https://www.portal-energia.com/converta-carro-veiculo-eletrico-147830/>
- [84] *Cumulative Global EV Sales Hit 4 Million | BloombergNEF*, 8 2018. [Online]. Available: <https://about.bnef.com/blog/cumulative-global-ev-sales-hit-4-million/>
- [85] IEA, *Global EV Outlook 2020 – Analysis - IEA*, 7 2020. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>
- [86] BloombergNEF, *EVO Report 2022 | BloombergNEF | Bloomberg Finance LP*. [Online]. Available: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/#toc-download>
- [87] H. Engel, R. Hensley, S. Knupfer, and S. Sahdev, *How electric vehicles could change the load curve | McKinsey*, 8 2018. [Online].

- Available: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-potential-impact-of-electric-vehicles-on-global-energy-systems>
- [88] G. Braithwaite-Smith, *What is the difference between slow, fast and rapid EV charging?* [Online]. Available: <https://www.motoringelectric.com/charging/difference-between-slow-fast-rapid-charging/>
- [89] G. Ram, *Roadmap Electric Vehicles and Grid Integration (V1G versus V2G)* | News | *pr-electronics.nl*, Delft University of Technology / TU Delft. [Online]. Available: <http://www.pr-electronics.nl/en/news/85/roadmap-electric-vehicles-and-grid-integration-v1g-versus-v2g/>
- [90] “Economic and environmental impact of vehicle-to-grid (v2g) integration in an intermittent utility grid,” pp. 345–349, 9 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/SPIES48661.2020.9242992>.
- [91] S. Vadi, R. Bayindir, A. M. Colak, and E. Hossain, *A review on communication standards and charging topologies of V2G and V2H operation strategies*, *Energies*, 9 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/EN12193748>.
- [92] *Norwegian EV policy - Norsk elbilforening*. [Online]. Available: <https://elbil.no/english/norwegian-ev-policy/>
- [93] UVE, *Incentivo pela Introdução no Consumo de Veículos de Emissões Nulas no Ano de 2022 - UVE*. [Online]. Available: <https://www.uve.pt/page/incentivo-aquisicao-2022/>
- [94] *European Battery Alliance*. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/growth/industry/strategy/industrial-alliances/european-battery-alliance_pt
- [95] J. O'Dell, *EV Sales Soar As Variety And Gas Prices Climb, Study Finds - Forbes Wheels*, 2022. [Online]. Available: <https://www.forbes.com/wheels/news/ev-sales-soar-in-2022/>
- [96] C. Economy, *CIRCULARITY GAP REPORT*, 2022. [Online]. Available: https://circulars.iclei.org/wp-content/uploads/2022/02/1.-Report_-CGR-Global-2022.pdf
- [97] D. Hall and N. Lutsey, *Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions*, 2018, doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/054010>.
- [98] *Update: EU Energy Outlook 2050 – How will Europe evolve over the next 30 years?** - *Energy BrainBlog*. [Online]. Available: <https://blog.energybrainpool.com/en/update-eu-energy-outlook-2050-how-will-europe-evolve-over-the-next-30-years/>
- [99] V. Rizos and J. Bryhn, *Implementation of circular economy approaches in the electrical and electronic equipment (EEE) sector: Barriers, enablers and policy insights*, *Journal of Cleaner Production*, 3 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.130617>.