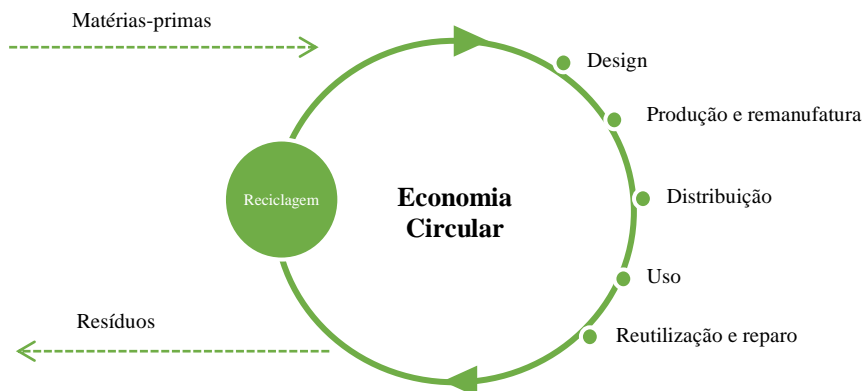




INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA



Área Departamental de Engenharia Química

Identificação de matérias-primas críticas para Portugal e estratégias de economia circular

VITOR SIMÕES

(Licenciado em Engenharia do Ambiente)

Trabalho de Projeto ou Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de Mestre em Engenharia da Qualidade e Ambiente

Orientador (es):

Doutora Isabel Maria da Silva João

Júri:

Presidente: Doutor João Fernando Pereira Gomes

Vogais:

Especialista IPL António Victor Carreira Oliveira

Doutora Isabel Maria da Silva João

Setembro de 2021

Agradecimentos

Este trabalho foi elaborado com o apoio imprescindível de uma equipa multidisciplinar do Laboratório Nacional de Engenharia e Geologia (LNEG), sem a qual não teria o mesmo resultado, pelo que agradeço toda a ajuda e apoio prestado ao longo da elaboração deste trabalho. O meu sincero obrigado à Eng^a Cristina Rocha e Dr. Jorge Alexandre pelo trabalho de supervisão externa e também ao Dr. Carlos Nogueira e Dr^a Justina Catarino por todo o apoio prestado.

Um especial obrigado também à Dr^a Isabel Maria da Silva João, orientadora do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), por toda a ajuda, paciência e por me incentivar e motivar a efetuar um trabalho de qualidade.

Agradeço também à EnviEstudos, em especial ao Eng.º Jorge Alves, por me dar a oportunidade de tirar este mestrado e por me apoiar e incentivar constantemente, seja a nível pessoal, profissional ou académico.

Aos meus amigos, que sempre me apoiaram nos momentos difíceis e que me têm acompanhado ao longo de toda a minha vida, pessoal e profissional.

À minha namorada, Mélanie dos Santos, que me apoiou desde o primeiro momento em que decidi tirar este mestrado, sabendo tudo o que implicaria. Obrigado por todo o apoio, carinho, paciência e amor.

Aos meus pais e irmã, as melhores pessoas do mundo. Obrigado por me terem tornado quem sou, por acreditarem em mim, por confiarem, apoiarem e estarem sempre por perto. Um muito obrigado por tudo.

Este “meu” objetivo alcançado, é também muito vosso.

Resumo

A tendência para o aumento populacional e as tecnologias emergentes estão a criar um incremento sem precedentes na procura de recursos naturais e a maior produção do setor industrial tem a si associado um aumento exponencial do consumo destes recursos. Desta tendência emerge o desafio de assegurar o acesso estável a metais e minerais considerados imprescindíveis para o funcionamento sustentável da economia e das tecnologias emergentes.

Da Iniciativa «Matérias-Primas» (RMI – Raw Materials Initiative) surgiu a definição da lista de matérias-primas críticas (MPC) para a União Europeia (UE). A lista de 2020 publicada pela comissão europeia identifica um total de 30 MPC que atingem ou excedem o limite definido em termos de importância económica e risco de fornecimento.

Com este estudo pretende-se identificar 3 matérias-primas de especial importância para Portugal, de entre a lista de 30 MPC da UE, as suas principais aplicações na indústria e o potencial de adoção de estratégias de economia circular. Para tal efetuou-se uma revisão bibliográfica onde foram identificados os fundamentos de economia circular e sustentabilidade, as matérias-primas críticas na UE e a nível nacional, bem como as suas principais aplicações.

De forma a efetuar a identificação das três matérias-primas a partir desse conjunto alargado de 30, foi utilizada uma metodologia multicritério de apoio à decisão (MMAD), que se mostrou de extrema utilidade, permitindo considerar um conjunto alargado de critérios, no âmbito da sustentabilidade e considerando o ciclo de vida destas MPC, sob o qual um conjunto de matérias-primas previamente definidas foram avaliadas.

Esta avaliação permitiu a identificação das três MPC mais relevantes no contexto nacional.

Posteriormente foram caracterizadas estas três MPC e identificadas estratégias de circularidade com potencial de adoção a nível nacional e/ou europeu.

Palavras-chave: Economia Circular, Sustentabilidade, Análise Multicritério, Matérias-Primas Críticas, Estratégias de Circularidade.

Abstract

The trend towards increasing population and emerging technologies is creating an unprecedented increase in the demand for natural resources and the greater production in the industrial sector has associated with an exponential increase in the consumption of these resources. From this trend emerges the challenge of ensuring stable access to metals and minerals necessary for the sustainable functioning of the economy and emerging technologies.

From the Raw Materials Initiative (RMI) came the definition of the list of critical raw materials (CRM) for the European Union (EU). The 2020 list published by the European Commission identifies a total of 30 CRM that reach or exceed the limit defined in terms of economic importance and supply risk.

This study aims to identify 3 raw materials of special importance for Portugal, among the EU 30 CRM list, its main applications in the industry and the potential for adopting circular economy strategies. To this end, a bibliographic review was carried out, which identified the fundamentals of circular economy and sustainability, critical raw materials in the EU and at national level, as well as their main applications.

In order to make the identification of the three raw materials from this broad set of 30, a multiple-criteria decision analysis (MCDA) methodology was used, which proved to be extremely useful, allowing to consider a wide set of criteria, in the scope of sustainability and considering the life cycle of these CRM, under which a set of previously defined raw materials were evaluated.

This evaluation allowed the identification of the three most relevant CRM in the national context.

Subsequently, these three CRM were characterized and circularity strategies with potential for adoption at national and/or European level were identified.

Keywords: Circular Economy, Sustainability, Multicriteria Analysis, Critical Raw Materials, Circularity Strategies.

Acrónimos e Siglas

AHP - Analytic hierarchy process

As - Percentagem de utilização final da MP utilizada num setor ao nível de 2 dígitos da NACE

CE - Comissão Europeia

EC - Economia Circular

EI - Importância Económica (*Economic Importance*)

EIP RM - Parceria Europeia de Inovação em Matérias-Primas (*European Innovation Partnership on Raw Materials*)

ENAAAC - Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas

EoLRIR - taxa de entrada de reciclagem de fim de vida (*End-of-Life Recycling Input Rate*)

EU-MKDP - European Minerals Knowledge Data Platform

EU-UMKDP – Plataforma de Dados de Conhecimento de Mina Urbana (*European Union – Urban Mine Knowledge Data Platform*)

EVs - Veículos Elétricos (*Electric Vehicles*)

GEE - Gases com Efeito de Estufa

GS - Fornecimento Global (*Global Supply*)

HEVs - Veículos híbridos elétricos (*Hybrid Electric Vehicles*)

HHIWGI- Índice Herfindahl-Hirschman com base no Índice de Governança Mundial (WGI - *World Governance Index*)

HREE - Elementos das Terras Raras Pesados (*Heavy Rare Earth Metals*)

IR - Dependência de importação (*Import Reliance*)

JRC - Joint Research Centre

LNEG - Laboratório Nacional de Engenharia e Geologia

LREE - Elementos das Terras Raras Leves (*Light Rare Earth Metals*)

MACBETH - *Measuring Attractiveness by a categorical Based Evaluation Technique*

MP - Matérias-primas

MPC - Matérias-primas Críticas

NACE Rev. 2: Classificação Estatística das Atividades Económicas na Comunidade Europeia, Revisão 2

NiMH - Bateria de níquel-hidreto metálico (*Nickel metal hydride batteries*)

OECD - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (*Organisation for Economic Co-operation and Development*)

PAEC - Plano de Ação para a Economia Circular

PAG – Potencial de Aquecimento Global

PGM's - Metais do grupo platina (*Platinum-group metals*)

PIB - Produto Interno Bruto

PNAC - Programa Nacional para as Alterações Climáticas

PPM - Partes por milhão

PV - Energia Fotovoltaica (*Photovoltaic Energy*)

QEPiC - Quadro Estratégico para a Política Climática

Qs - valor acrescentado do setor ao nível de 2 dígitos da NACE

RCD - Resíduos de Construção e Demolição

REE - Elementos das Terras Raras (*Rare Earth Metals*)

REEE- Resíduos de Equipamento Elétrico e Eletrónico

RMI - Iniciativa Matérias-primas (*Raw Materials Initiative*)

RMIS - Sistemas de Informação de Matérias-Primas (*Raw Materials Information Systems*)

RNC - Roteiro para a Neutralidade Carbónica

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

SCo - Co-produção do material substituto (*Substitute Co-production*)

SCP - Custo-desempenho do substituto (*Substitute cost-performance*)

SCr - Críticidade do substituto (*Substitute Criticality*)

SIEI - Índice de substituição relacionado com a importância económica (*Substitution Index related to Economic Importance*)

SISR - Índice de substituição relacionado com o risco de fornecimento (*Substitution Index related to Supply Risk*)

SMART - Simple Multi-Attribute Rating Technique

SP - Produção do material substituto (*Substitute Production*)

SR - Risco de Fornecimento (*Supply Risk*)

TIC - Eletrónica e Tecnologias de Informação e Comunicação

UE - União Europeia

VFV - Veículos em Fim de Vida

Índice

1º	Capítulo.....	1
1.1	Introdução	1
1.2	Contextualização	1
1.3	Objetivos do trabalho.....	2
1.4	Estrutura do trabalho.....	2
2º	Capítulo.....	4
2.1	Fundamentos de economia circular e contributo para a sustentabilidade	4
2.2	O novo Plano de Ação para a Economia Circular.....	8
2.3	Economia Circular em Portugal.....	9
2.4	Matérias-primas críticas na União Europeia e Portugal: conceitos e desenvolvimentos	11
2.4.1	Metodologia de definição de MPC	13
2.4.2	A lista de 30 MPC da UE.....	17
2.4.3	Matérias-primas Críticas em Portugal.....	26
3º	Capítulo.....	36
3.1	Ferramentas multicritério de apoio à decisão	36
3.2	Tipos de métodos de avaliação multicritério	37
3.2.1	Analytical Hierarchy Process (AHP)	37
3.2.2	Métodos Outranking.....	38
3.2.3	Método MACBETH (Measuring Attractiveness By a Categorical Based Evaluation Technique).....	38
4º	Capítulo.....	43
4.1	Avaliação de matérias-primas críticas para Portugal	43
4.2	Identificação dos pontos de vista fundamentais.....	43
4.3	Definição das alternativas a avaliar.....	45
4.4	Avaliação das alternativas segundo cada critério.....	47
4.4.1	Potencial extrativo em Portugal.....	47
4.4.2	Importação de MPC para Portugal.....	49
4.4.3	Importância Económica da MPC.....	50
4.4.4	Impacte ambiental da extração	51
4.4.5	Dependência da MPC a nível global.....	52
4.4.6	Exportação de MPC de Portugal para outros países	53
4.4.7	Produção de MPC em Portugal	54
4.4.8	Impacte/relevância da MPC nos setores de importância para a neutralidade carbónica e o combate às AC.....	54
4.4.9	MPC em utilização/stock em Portugal.....	56
4.4.10	Quantidade MPC a sair de stock (exportação e/ou geradas como resíduos)	57
4.4.11	Potencial de Pós-utilização	58

4.5	Ponderação dos critérios	59
4.6	Análise dos resultados obtidos.....	61
4.7	Avaliação da robustez da decisão	66
4.8	Resultados obtidos	69
5°	Capítulo	70
5.1	Identificação do potencial de adoção de estratégias de economia circular às 3 matérias-primas selecionadas	70
5.2	Aplicações das 3 matérias-primas na indústria	70
5.2.1	Tungsténio.....	70
5.2.2	Antimónio	73
5.2.3	Neodímio	76
5.3	Identificação de potenciais estratégias de economia circular a aplicar.....	78
6°	Capítulo.....	82
6.1	Conclusões e perspetivas de trabalho futuro.....	82
	Bibliografia	84

Índice de Figuras

Figura 1 - Modelo de Economia Circular.....	5
Figura 2 - Emissões médias anuais de Portugal desagregadas por setor, na década 2007-2017. Fonte: Adaptado do RNC 2050.....	6
Figura 3 - Contribuição da reciclagem na procura de MPC na UE. Fonte: Mathieux, F et al., 2017.....	13
Figura 4 – Países com maior quota de MPC [Fonte: COM(2020) 474 final].....	17
Figura 5 - Resíduos Sólidos Urbanos depositados em Aterro em Portugal (EUROSTAT, 2021).....	19
Figura 6 - Percentagem de MPC utilizadas no setor dos EEE de acordo com a avaliação de MPC de 2017. (Fonte: Mathieux, F et al., 2017).....	20
Figura 7 - Percentagem de MPC utilizadas no setor das Baterias por tipo de aplicação de acordo com a avaliação das MPC de 2017. (Fonte: Mathieux, F. et al., 2017).....	21
Figura 8 – Previsão de procura de MPC na EU para veículos híbridos e elétricos [Fonte: Beatriz, V-L et al, 2018].....	22
Figura 9 – Dependência de importação de matérias-primas e materiais usados nas tecnologias eólica, fotovoltaica e de bateria. Fonte: European Political Strategy Centre (2018).....	24
Figura 10 – Procura anual atual (2012) e estimada (2030) de matérias-primas usadas para tecnologias de energia de baixo carbono selecionadas (ver Introduction of the EU Raw Materials Scoreboard 2016); baseado na metodologia da JRC, 2001 e JRC, 2013). As matérias-primas críticas são apresentadas em caixas vermelhas.....	24
Figura 11 – Percentagem de MPC utilizadas em produtos químicos e fertilizantes de acordo com a avaliação de MPC de 2017. Fonte: Elaboração do JRC com base nos dados da avaliação de criticidade da UE em 2017 (Deloitte Sustainability et al., 2017).....	25
Figura 12 – Indústria e Manufatura como % do PIB em Portugal. Fonte: World Bank, World Development Indicators.....	26
Figura 13 – Processo MACBETH de apoio à decisão.....	39
Figura 14 - Árvore de pontos de vista fundamentais construída no software M-MACBETH.....	45
Figura 15 – Definição das alternativas em avaliação no software M-MACBETH.....	46
Figura 16 – Matriz de julgamentos do critério “Potencial Extrativo em Portugal” no software M-MACBETH.....	48
Figura 17 – Matriz de julgamentos do critério “Importação de MPC para Portugal” no software M-MACBETH.....	50
Figura 18 – Matriz de julgamentos do critério “Importância Económica da MPC” no software MACBETH.....	51
Figura 19 – Matriz de julgamentos do critério “Impacte ambiental da MPC” no software MACBETH com consistências.....	52
Figura 20 – Matriz do critério “Dependência da MPC a nível global” no software MACBETH.....	53
Figura 21 – Matriz do critério “Exportação de MPC para outros países” no software MACBETH.....	54
Figura 22 – Matriz do critério “Produção de MPC em Portugal” no software MACBETH.....	54
Figura 23 – Matriz de julgamentos do critério “Impacte/relevância da MPC nos setores de importância para a neutralidade carbónica e o combate às AC” no software MACBETH.....	56
Figura 24 – Matriz do critério “MPC em utilização/stock em Portugal” no software MACBETH.....	57
Figura 25 – Matriz do critério “Quantidade MPC a sair de stock (exportação e/ou geradas como resíduos)” no software MACBETH.....	58

Figura 26 – Matriz do critério “Potencial de Pós-utilização” no software MACBETH.....	59
Figura 27 - Referências de ponderação.....	60
Figura 28 – Escala de ponderação (Global) obtida no software M-MACBETH.....	61
Figura 29 - Pontuações globais para as MPC segundo os critérios em avaliação.....	62
Figura 30 – Termómetro global obtido no software MACBETH.....	63
Figura 31 - Perfis e perfis ponderados para o Antimónio	64
Figura 32 - Perfis de diferenças simples e ponderado entre o antimónio e o neodímio	64
Figura 33 - Análise de sensibilidade ao peso do critério “MPC em utilização/stock em Portugal”	65
Figura 34 - Análise de sensibilidade ao peso do critério “Quantidade MPC a sair de stock (exportação e/ou geradas como resíduos”	66
Figura 35 – Análise de Robustez (Informação local e global ordinal) obtida no software MACBETH	67
Figura 36 – Análise de Robustez (Informação local e global) obtida no software MACBETH.....	68
Figura 37 – Histograma de ponderação dos critérios e termómetro global obtido no software MACBETH para peso dos critérios igual.....	68
Figura 38 – Consumo (por setor) e fornecimento (por país) de Tungsténio na UE (Fonte: Adaptado de European Commission, 2020).....	70
Figura 39 - Lista de aplicações de MPC e não críticas em diferentes tecnologias e o seu risco de fornecimento (Fonte: Adaptado de European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020 (Fonte: Bobba, S. et al, 2020).....	72
Figura 40 – Cadeia de valor simplificada do Tungsténio para a EU, média de 2012-2016 (Fonte: Adaptado de European Commission, 2020). Importações representadas a setas pretas e exportação a setas verdes .	73
Figura 41 - Consumo (por setor) e fornecimento (por país) de Antmónio na EU (Fonte: Adaptado de European Commission, 2020).....	74
Figura 42 –Abastecimento da UE de antimónio em formas brutas e óxidos de antimónio (fase de processamento) (média anual para 2012-2016) (Fonte: European Commission, 2020).....	74
Figura 43 – Cadeia de valor simplificada do Antimónio para a UE, média de 2012-2016 (Fonte: European Commission, 2020). Importações representadas a setas pretas e exportação a setas verdes	76
Figura 44 –Usos finais da UE e globais e consumo de REE (Fonte: Adaptado de European Commission, 2020).....	76
Figura 45 – Cadeia de valor simplificada dos REE para a UE, média de 2012-2016 (Fonte: European Commission, 2020). Importações representadas a setas pretas e exportação a setas verdes	78

Índice de Quadros

Quadro 1 - Potencial de redução de emissões em relação a 2005 por setor [Adaptado do Quadro 1º do RNC 2050].....	7
Quadro 2 – Ações da iniciativa matérias-primas. Fonte: Adaptado de COM(2008) 699 final	12
Quadro 3 – SCP matriz de avaliação (Fonte: adaptado de European Commission, 2017).....	15
Quadro 4 – Matriz de avaliação do SCr (Fonte: adaptado de European Commission, 2017).....	16
Quadro 5 – Matriz de avaliação do SCr (Fonte: adaptado de European Commission, 2017).....	16
Quadro 6 - Lista das 30 MPC publicadas pela Comissão Europeia [COM(2020) 474 final]	17
Quadro 7 – Indicadores de produção em Portugal de RSU per capita, por unidade de PIB e excluindo os principais resíduos minerais por consumo de material doméstico.....	27
Quadro 8 – Indicadores de gestão de resíduos em Portugal	27
Quadro 9 – Indicadores de matérias-primas secundárias em Portugal	28
Quadro 10 – Indicadores de matérias-primas secundárias em Portugal.....	28
Quadro 11 – Produção de MP em Portugal de 2004 a 2018 (adaptado da EU-MKDP).....	30
Quadro 12 – Importação de MPC em Portugal de 2004 a 2018 (adaptado da EU-MKDP)	30
Quadro 13 – Exportação de MPC em Portugal de 2004 a 2016 (adaptado da EU-MKDP)	30
Quadro 14 – MPC colocadas no mercado, em stock e gerados como resíduo em Portugal para o grupo dos EEE (adaptado da EU-UMKDP).....	31
Quadro 15 – MPC colocadas no mercado, em stock e gerados como resíduo em Portugal para o grupo dos Veículos (adaptado da EU-UMKDP)	32
Quadro 16 – MPC colocadas no mercado, em stock e gerados como resíduo em Portugal para o grupo das Baterias (adaptado da EU-UMKDP)	33
Quadro 17 – Soma de colocação de mercado dos grandes grupos do projeto ProSUM (EEE, Veículos e Baterias) em Portugal por MPC (adaptado da EU-UMKDP).....	34
Quadro 18 – Soma de stock dos grandes grupos do projeto ProSUM (EEE, Veículos e Baterias) em Portugal por MPC (adaptado da EU-UMKDP).....	34
Quadro 19 – Soma de a sair de stock dos grandes grupos do projeto ProSUM (EEE, Veículos e Baterias) em Portugal por MPC (adaptado da EU-UMMKDP).....	35
Quadro 20 – Critérios/Pontos de vista fundamentais.....	44
Quadro 21 –Desempenho de cada alternativa em avaliação segundo o critério “Potencial extrativo em Portugal”(adaptado de EU-MKDP).....	47
Quadro 22 – Desempenho de cada alternativa em avaliação para o critério “Importação de MPC para Portugal”(adaptado de EU-MKDP).....	49
Quadro 23 – Potencial de aquecimento global para cada alternativa avaliada (Nuss P, Eckelman MJ 2014)	51
Quadro 24 – Projeções de procura estimada em 2030 de MPC em avaliação de acordo com a Figura 1054	
Quadro 25 – Projeções de procura estimada em 2030 de MPC em avaliação de acordo com a Figura 8 .55	
Quadro 26 – Eol-RIR das opções/MPC em avaliação (Fonte: European Comission, 2020).....	58
Quadro 27 – Previsão qualitativa de oferta e demanda de antimónio (Adaptado de European Commission, 2017).....	75

1º Capítulo

1.1 Introdução

O conceito de Economia Circular, doravante designada apenas por EC, não é novidade e remonta aos anos 60 e 70 (Georgescu-Roegen, 1975; Boulding, 1966). No entanto, o termo EC apenas emergiu com significância com o trabalho de Pearce and Turner (Pearce & Turner, 1990), e reemergiu em 2012 com a primeira de muitas publicações da Ellen MacArthur Foundation (Ellen MacArthur Foundation, 2012).

Desde então que este conceito tem ganho notoriedade e diversas respostas políticas têm vindo a ser dadas no sentido de potenciar a circularidade dos materiais e produtos, como é caso da diretiva embalagens e resíduos de embalagens (Diretiva 94/62/CE).

A EC, como estratégia, assenta nos pilares da sustentabilidade (Pilares económico, social e ambiental) e visa precisamente a diminuição do impacto social, económico e ambiental dos produtos e/ou serviços em toda a sua cadeia de valor. Johnston et al. (2007) estimaram que existem cerca de 300 definições para sustentabilidade. A sustentabilidade pode ser definida como o estado global do sistema, incluindo aspetos sociais, ambientais e económico, em que as necessidades atuais não comprometem as necessidades das gerações vindouras (ISO 15392:2019), uma transformação do estilo de vida humano que otimiza a probabilidade de que as condições de vida apoiem continuamente a segurança, o bem-estar e a saúde, principalmente mantendo o fornecimento de bens e serviços não substituíveis (McMichael et al., 2003), ou uma perpetuação indefinida de todas as formas de vida (Ehrenfeld, 2005).

A EC pode assim ser vista como um sistema económico que visa eliminar o desperdício e fomentar o uso contínuo de recursos. Os sistemas circulares incluem a reutilização, partilha, reparação, renovação, remanufatura e reciclagem de modo a criar um sistema de ciclo fechado, minimizando o uso de entradas de recursos e a produção de resíduos, a poluição e as emissões de carbono (Geissdoerfer et al., 2017), de forma a permitir a manutenção do valor do produto e/ou serviço pelo máximo tempo possível.

Tendo em consideração a tendência para o aumento populacional, e que as tecnologias emergentes estão a criar um aumento sem precedentes na procura de recursos naturais, a maior produção do setor industrial para dar resposta ao aumento da procura de bens pela sociedade tem a si associado um aumento exponencial do consumo destes recursos, resultando também na emissão de gases com efeito de estufa (GEE). Neste sentido, as estratégias de EC podem também ser um importante fator de adaptação e mitigação às alterações climáticas (AC). As AC, resultado do aumento destes GEE, é considerada por muitos o desafio do século e ganham cada vez mais importância no seio da sociedade e, conseqüentemente, na comunidade política.

Esta relação entre a EC e as AC é evidenciada no relatório da Ellen MacArthur Foundation (Ellen MacArthur Foundation, 2019), de nome *Completing the picture: How the circular economy tackles climate change*, onde se refere que para atingir os objetivos climáticos é necessária uma transformação na forma como produzimos e utilizamos bens. Deste relatório pode-se concluir que a produção de energia através de fontes renováveis, como é caso da energia solar e eólica, apenas dá resposta a 55% das emissões globais de gases de efeito estufa, mas para as restantes 45% das emissões o trabalho de redução será mais complexo, uma vez que estas emissões têm origem na gestão do solo/terra e na produção de bens e serviços. Este relatório da EMF aborda como a EC é indispensável para reduzir tais emissões, transformando a maneira como projetamos, produzimos e usamos bens (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

1.2 Contextualização

As matérias-primas são consideradas a base da economia europeia (Mathieux et al., 2017), sendo estas imprescindíveis para o fabrico da grande maioria dos produtos utilizados pela sociedade, seja como produtos auxiliares na indústria ou incorporados em produtos de utilização para o cidadão comum.

Determinadas matérias-primas, pela sua importância económica e risco associado ao fornecimento, chamam-se matérias-primas essenciais/críticas, sendo fundamentais para o funcionamento de uma vasta gama de ecossistemas industriais [COM(2020) 474 final].

Em 2008 foi adotada pela comissão europeia a Iniciativa «Matérias-Primas» (RMI – *Raw Materials Initiative*), através da COM(2008) 699 final, que define uma estratégia integrada para as matérias-primas. Desta iniciativa surgiu a definição da lista de matérias-primas críticas (MPC) para a UE.

No seguimento desta iniciativa, a comissão europeia lança periodicamente uma lista das matérias-primas consideradas essenciais (i.e críticas) para a UE, sendo a última, publicada em 2020, constituída por 30 MPC [COM(2020) 474 final]. O grande objetivo desta lista é permitir aos estados-membros adotar medidas e estratégias para a minimização do consumo e extensão do uso destas matérias-primas, consideradas de especial importância, de modo a prevenir uma escassez com efeitos drásticos na economia europeia.

Considerando o aumento da procura de recursos naturais e a realização de que estes são finitos à escala em que a população humana os necessita, a que chamamos usualmente de recursos não renováveis, obriga à adoção de novas estratégias para dar resposta a este problema, inserindo-se aqui a EC. Para atingirmos a neutralidade carbónica e combater as AC, que resulta maioritariamente da industrialização e aumento da procura de recursos e bens, é necessário separar o crescimento económico da utilização dos recursos, mantendo a utilização destes dentro dos limites do planeta [COM(2020) 98 final, 2020].

Deste enquadramento urge a necessidade de garantir um abastecimento sustentável destas MPC, de elevada importância pelos seguintes aspetos (European Commission, 2020):

- Ligação à indústria: as matérias-primas não energéticas estão associadas a todos os setores industriais e em todas as etapas da cadeia de abastecimento;
- Tecnologias emergentes: a progressão tecnológica e a qualidade de vida dependem do acesso a um número crescente de matérias-primas, como é exemplo um smartphone, que pode conter até 50 tipos de metais diferentes;
- Ambiente: as matérias-primas estão intimamente ligadas às tecnologias verdes/limpas, essenciais no combate às AC e no objetivo de atingir a neutralidade carbónica até 2050.

Para além do referido acima, o acesso a recursos, nomeadamente a matérias-primas críticas, é considerado uma questão de segurança estratégica para a ambição europeia de concretizar o pacto ecológico [COM (2019) 640 final]. É ainda de destacar as lacunas da UE nas capacidades de extração, transformação, reciclagem, refinação e separação de MPC, que refletem uma alta dependência de fornecimento destes recursos de outras partes do mundo [(COM(2020) 474 final].

As mudanças tecnológicas e o rápido crescimento das economias emergentes têm levado a um aumento, embora às vezes volátil, da procura por vários metais e minerais. Garantir o acesso a um fornecimento estável de matérias-primas, especialmente as críticas, tornou-se um importante desafio para as economias nacionais e regionais com recursos naturais limitados, como é caso da economia da UE.

Este trabalho surge precisamente deste desafio, tendo como objetivos os apresentados no próximo ponto.

1.3 Objetivos do trabalho

Os principais objetivos do presente trabalho são: a) Providenciar um enquadramento da EC e das MPC a nível Europeu e Nacional, b) definir 3 MPC com especial relevância para Portugal, da lista das 30 definidas a nível europeu, c) caracterizar as 3 MPC e identificar os grandes grupos de produtos onde são utilizadas e d) identificar os maiores grupos de produtos onde estas se utilizam e potenciais estratégias de circularidade a aplicar.

A definição das 3 MPC com especial relevância para Portugal visa, de acordo com a contextualização efetuada no ponto anterior, a implementação de medidas, nomeadamente de EC, que permitam aumentar a resiliência e reduzir a dependência destas, tanto a nível nacional como europeu.

Tais medidas permitirão também aumentar a resiliência e diminuir a dependência de outras MPC, por se utilizarem nos principais setores das 3 definidas ou por estarem presentes nas suas cadeias de abastecimento.

Para tal, efetuar-se-á primeiramente uma revisão bibliográfica desta temática e posteriormente será definida uma metodologia multicritério de apoio à decisão (MMAD) para a definição destas 3 MPC.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado num conjunto de seis capítulos. No 1º capítulo efetua-se um enquadramento ao tema do trabalho bem como a sua contextualização, definição dos objetivos e estrutura. A parte remanescente do trabalho é composta pelos capítulos 2 a 6.

De seguida, no 2º capítulo, efetua-se a revisão bibliográfica, através da identificação dos fundamentos de economia circular e de sustentabilidade, da aplicação da EC em Portugal e identificação dos conceitos e desenvolvimentos em termos de MPC em Portugal e a nível europeu.

Já no 3º capítulo efetua-se um enquadramento daquilo que são ferramentas multicritério de apoio à decisão, identificando-se as principais técnicas de avaliação multicritério e um desenvolvimento mais aprofundado da abordagem MACBETH, que será a abordagem a utilizar no âmbito deste trabalho com vista à seleção das principais MPC para Portugal.

No 4º capítulo será efetuada a definição e quantificação propriamente dita das 3 MPC com relevância a nível nacional, sendo para tal definidas as opções a avaliar e pontos de vista fundamentais (i.e. critérios de avaliação) que permitirão a avaliação. Para tal serão efetuados os julgamentos de comparação entre as MPC a avaliar para cada um dos critérios definidos, a ponderação dos critérios e feita a análise dos resultados e robustez da decisão.

Com a identificação das 3 MPC, no 5º capítulo, efetua-se a identificação das suas principais utilizações e de potenciais estratégias de EC a aplicar.

Por último, no 6º capítulo, efetua-se uma reflexão sobre o trabalho desenvolvido e as principais conclusões obtidas.

2º Capítulo

2.1 *Fundamentos de economia circular e contributo para a sustentabilidade*

A EC é um conceito estratégico que assenta na redução da produção de resíduos, privilegiando a sua valorização (p.ex através da reutilização) e a extensão do tempo de vida útil do produto e/ou serviço. Visa também eliminar o conceito de fim-de-vida, associado essencialmente ao sistema económico linear, através da manutenção do valor do produto e/ou serviço ao longo do seu ciclo de vida, através da criação de fluxos circulares de reutilização, restauro, entre outros.

Não existindo uma definição única para EC, também ao longo do seu desenvolvimento e aplicação as definições foram evoluindo, no sentido de se aproximar o mais possível do que se pretende com este sistema económico. Uma das definições dada por Geissdoerfer et al. (2017), e que já considera os principais aspetos da EC, é:

Regenerative system in which resource input and waste, emission, and energy leakage are minimized by slowing, closing, and narrowing material and energy loops. This can be achieved through long-lasting design, maintenance, repair, reuse, remanufacturing, refurbishing, and recycling.

Desta definição verifica-se que a transição para uma EC assenta em três estratégias principais:

1. Desacelerar os ciclos de recursos, isto é, estender ou intensificar o período de utilização de um produto, resultando em uma desaceleração do consumo de recursos. Tal pode ser efetuado projetando produtos para uma vida útil longa, facilitar a reparação e a remanufatura;
2. Fechar os ciclos de recursos, isto é, fechar o ciclo entre a pós-utilização e a produção por meio de técnicas de valorização;
3. Reduzir os *loops* de recursos, isto é, usar menos recursos por produto.

No entanto, esta definição não inclui referência aos aspetos sociais da sustentabilidade. A definição dada por Murray et al. (2017) verifica-se mais completa, incluindo o bem-estar humano na sua definição:

The Circular Economy is an economic model wherein planning, resourcing, procurement, production and reprocessing are designed and managed, as both process and output, to maximize ecosystem functioning and human well-being.

Tendo em conta um conjunto de definições, nomeadamente as referidas acima, Rocha et al. (2020) apresentam a seguinte definição para EC:

Circular economy is a system that is restorative and regenerative by intention and design, which supports ecosystem functioning and human well-being with the aim of accomplishing sustainable development. It replaces the end-of-life concept with closing, slowing and narrowing the resource flows in production, distribution and consumption processes, extracting economical value and usefulness of materials, equipment and goods for the longest possible time, in cycles energized by renewable sources. It is enabled by design, innovation, new business and organizational models and responsible production and consumption.

Assim, considera-se que a EC tem como principais objetivos que o material e/ou produto produzido não seja imediatamente descartado após um único ciclo de vida, aplicando estratégias que permitam a sua reintrodução no processo produtivo, total ou parcial, o prolongamento do tempo de vida útil e a sua reutilização para a mesma ou outras finalidades, minimizando a parte que não pode ser novamente utilizada, isto é, o resíduo que não pode ser valorizado.

A **Figura 1**, esquematiza o modelo da EC.

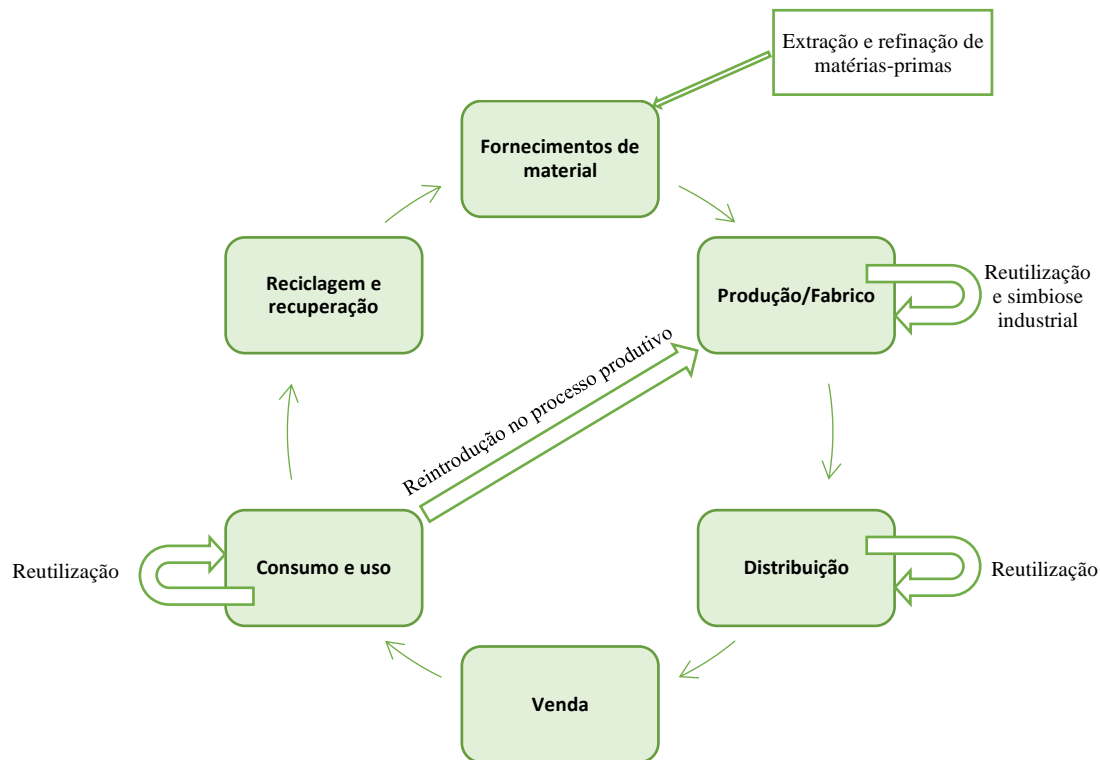


Figura 1 - Modelo de Economia Circular

Embora o conceito de EC tenha ganhado mais notoriedade recentemente, as estratégias aplicadas em cada uma das etapas do modelo de EC não são novidade. A Ellen MacArthur Foundation tem uma página dedicada a casos de estudo (Ellen MacArthur Foundation, 2017a), que vão desde o prolongamento da utilização de roupa (*Circos - Increasing clothing use through subscription*), fechar o ciclo de uso único de embalagens alimentares (*Biopak - Closing the loop on single-use food packaging*), aos benefícios da simbiose industrial (*Generating multiple benefits for the manufacturing industry - Africa's First Industrial Symbiosis Programme*), entre outros.

O modelo de economia linear não promove, no entanto, a menor produção de resíduos nem a reutilização de bens de consumo, muito pelo contrário. A facilidade com que a sociedade tem acesso a novos produtos/bens e a evolução tecnológica faz com que a sociedade procure sempre o novo e melhor modelo de determinado produto, independentemente das boas condições de funcionamento do atual. O modelo de economia linear confronta-se também com as necessidades atuais de redução de consumo de recursos e com a salvaguarda da sua disponibilidade, principalmente a nível europeu, que vão desde a volatilidade dos preços a potenciais interrupções das cadeias de abastecimento pelos principais produtores mundiais.

Algumas das barreiras para a transição para um modelo de EC estão associadas a questões financeiras (dificuldade na medição dos benefícios financeiros da economia circular e rentabilidade financeira), operacionais (gestão das infraestruturas/cadeias de abastecimento), atitude (perceção da sustentabilidade e aversão ao risco), estruturais e tecnológicas (design de produto e integração em processos de produção) (Ritzén & Sandström, 2017).

Geralmente quando se analisa e se tenta solucionar um problema este confronta-nos com uma decisão. Em termos industriais o problema é geralmente o fator económico e social (lucro e emprego) vs impacto ambiental da atividade. Em determinadas situações aplica-se a diretiva Avaliação de Impacte Ambiental (Diretiva n.º 2014/52/EU), que tem como objetivo precisamente avaliar os impactos de um determinado projeto em diversos descritores ambientais, nomeadamente as AC, fatores socioeconómicos, solos e uso dos solos, ordenamento do território, entre outros.

O modelo económico de EC, através da minimização da necessidade de recursos primários, do prolongamento da vida útil dos produtos, da sua reutilização e/ou reintrodução no processo produtivo e do tratamento em fase de pós-utilização promove a sustentabilidade de toda a cadeia de valor.

Uma economia circular oferece ainda uma abordagem sistémica e económica para enfrentar outras áreas de preocupação, como é o caso das alterações climáticas (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

A causa das alterações climáticas prende-se com o aumento exponencial de Gases com Efeito de Estufa (GEE) na atmosfera. Estes gases estão naturalmente presentes na atmosfera, sendo devido a estes que o planeta terra apresenta um clima que permite a vida humana e de outros animais, diferenciando-se assim dos restantes planetas conhecidos.

Desde a revolução industrial que a emissão para a atmosfera destes GEE tem aumentado em concentrações sem precedentes, alterando o balanço e equilíbrio natural destes gases na terra. Não se pode dissociar a EC das AC, uma vez que as abordagens de EC têm um conceito de sustentabilidade que se conecta com as duas vertentes do combate às alterações climáticas:

1. Adaptação;
2. Mitigação.

A adaptação às alterações climáticas tem como objetivo encontrar e fomentar estratégias e mecanismos de adaptação às alterações inevitáveis no clima. Já a mitigação é orientada para estratégias que visam a diminuição do aumento de GEE e conseqüentemente a diminuição dos impactes associados.

Alguns dos principais instrumentos nacionais de mitigação e adaptação em alterações climáticas são o Programa Nacional para as Alterações Climáticas 2020/2030 (PNAC 2020/2030) e a segunda fase da Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas (ENAAC 2020), contemplado no Quadro Estratégico para a Política Climática (QEPiC), publicado no anexo 1 da Resolução do Conselho de Ministros n.º 56/2015, de 30 de julho.

Outro documento de elevada relevância nesta temática é o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC 2050), publicado através da Resolução de Conselho de Ministros n.º 107/2019, de 1 de julho. De acordo com o RNC 2050, as emissões médias anuais de Portugal foram, na década 2007-2017, de 69 MtCO₂ (54 a 74 MtCO₂). Quando desagregadas por setor, as emissões nacionais estão distribuídas por: 25% na produção de energia, 25% nos transportes, 23% na indústria, 10% na agricultura, 8% em outros usos de energia; e 8% nos resíduos.

A **Figura 2** apresenta as emissões médias anuais de Portugal desagregadas por setor, na década 2007-2017.

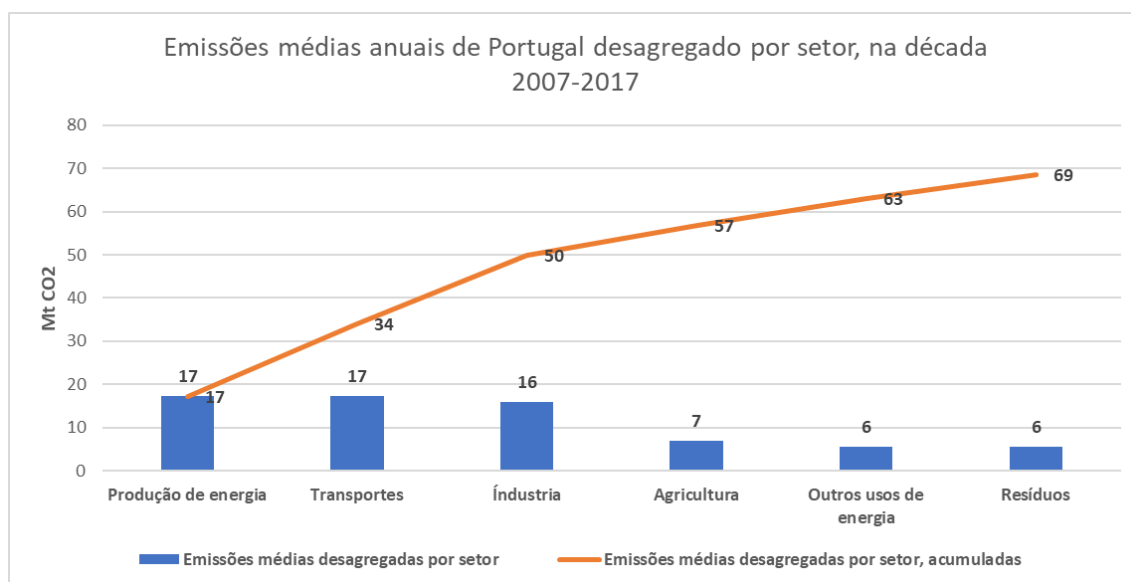


Figura 2 - Emissões médias anuais de Portugal desagregadas por setor, na década 2007-2017. Fonte: Adaptado do RNC 2050

Numa perspetiva de priorização, Portugal terá de focar as medidas nos setores da produção de energia, transportes e indústria, por estes representarem por si só cerca de 73% do global das emissões médias anuais. Em termos de contribuição para a redução em cada um dos setores (**Quadro 1**), o RNC 2050 dá também uma perspetiva até 2030, 2040 e 2050.

Quadro 1 - Potencial de redução de emissões em relação a 2005 por setor [Adaptado do Quadro 1º do RNC 2050]

Setores	2030	2040	2050
Energia	80% 81%	92%	99%
Indústria	52% 48%	59% 60%	73% 72%
Edifícios	48% 49%	73% 74%	85%
Transportes	43% 46%	84% 85%	98%
Agricultura e usos solo	36% 39%	37% 49%	38% 60%
Resíduos e Águas residuais	57% 58%	69% 71%	77% 80%

Da análise do **Quadro 1** pode-se concluir que todos os setores terão de ser alvo de mudanças significativas de modo a cumprir o objetivo nacional de atingir a neutralidade carbónica até 2050.

No **setor da energia** verifica-se nos últimos anos um enorme crescimento da tecnologia fotovoltaica e eólica, bem como de outras energias alternativas. Já no setor dos **transportes**, uma mudança sem precedentes ocorreu com o desenvolvimento dos veículos híbridos e elétricos. Por outro lado, a **indústria** é mais limitada quanto às estratégias para a descarbonização.

Algumas indústrias alteraram o combustível associado a equipamentos (como caldeiras e empilhadores) ou melhoraram as suas eficiências energéticas substituindo equipamentos e promovendo ações de sensibilização aos seus colaboradores.

Efetivamente a indústria verá as suas emissões de CO₂ reduzidas decorrente das alterações no setor da energia, uma vez que a descarbonização do setor da energia terá implicações diretas nas emissões de âmbito 2 (Emissões indiretas) de todos os edifícios (habitacionais ou industriais) e/ou equipamentos que necessitam de energia elétrica para o seu funcionamento.

A procura por novas tecnologias e a melhoria das existentes com o objetivo de diminuir o seu impacto ambiental e social e combater as alterações climáticas tem tido consequências disruptivas em determinados setores de atividade, como das energias renováveis, da mobilidade elétrica e das baterias. Estas tecnologias têm, no entanto, contrapartidas, como a necessidade de utilização de determinadas matérias-primas, algumas destas consideradas críticas.

Para além das questões relacionadas com a neutralidade carbónica, na qual a EC pode ser uma das soluções, temos os desafios relacionados com as ineficiências da economia linear, como é caso do consumo excessivo de recursos primários e que sem o seu reaproveitamento originam uma situação de insustentabilidade e escassez que podem colocar em causa a sustentabilidade das gerações vindouras. Reverter este comportamento da sociedade torna-se imprescindível para garantir a sustentabilidade futura, através da redução do consumo de recursos, reutilização, recuperação e reciclagem, prolongamento do tempo de vida dos produtos/processos e através da redução do impacto do ciclo de vida destes.

Neste sentido verifica-se a EC como uma das principais soluções para redução ou mesmo eliminação das ineficiências associadas ao sistema económico linear, mas também para outras áreas de preocupação, como o combate das alterações climáticas e todos os impactos negativos associados.

2.2 O novo Plano de Ação para a Economia Circular

Foi publicado, a 11 de março de 2020, pela CE, o novo plano de ação para a EC [COM(2020) 98 final, 2020)], doravante designado apenas como novo PAEC. Esta é uma resposta política direta à problemática que é a transição de um sistema económico linear para um modelo económico circular. Este plano vem reforçar a necessidade de acelerar a transição do modelo económico linear para um modelo económico circular.

É evidente, da leitura da introdução deste plano, a problemática das alterações climáticas e a EC como uma das soluções para alcançar a neutralidade carbónica até 2050.

O novo PAEC destaca ainda que metade das emissões de GEE e mais de 90% da perda de biodiversidade e pressão sobre os recursos hídricos provém da extração e transformação de recursos, pelo que uma economia circular, através da redução da necessidade de extração de matéria-prima primária, permitiria combater as alterações climáticas e ainda minimizar a pressão sobre a biodiversidade e os recursos hídricos. No entanto, de acordo com o *Circularity Gap Report 2020* (de Wit et. al, 2020), foi obtido um valor de 8.6% de circularidade da economia global, valor este bastante baixo e que evidencia a necessidade de mais esforços para a transição para um modelo económico circular.

De acordo com o relatório da comissão europeia (European Commission, 2014a), até 80 % do impacte ambiental dos produtos é determinado na fase da conceção. Tal deve-se a que nesta fase se poderá efetuar o design do produto para que seja mais facilmente reutilizado, reparado ou reciclado, permitindo a manutenção do seu valor por um período alargado de tempo e evitando o descarte ao fim de um único ciclo de utilização.

De facto, a economia atual promove uma insustentabilidade do uso de recursos finitos imprescindíveis para a manutenção da sociedade como a conhecemos. Uma utilização sustentável destes recursos, pela noção cada vez maior de que uma economia linear ameaça a competitividade europeia, permitiria não só promover a circularidade como diminuir a degradação ambiental causada pela pressão sobre estes recursos, bem como poderia ser benéfico a nível económico (European Commission, 2014a).

Embora existam algumas iniciativas e legislação europeia, obrigatórias ou facultativas, que abordam a sustentabilidade dos produtos, relacionados, por exemplo, com a eficiência energética, ou instrumentos como o Rótulo Ecológico, aprovado através do Regulamento (CE) n.º 66/2010, estes não são suficientes para incentivar os produtores a apostar na circularidade dos produtos.

Considerando que os consumidores são os principais reguladores do mercado, dar a possibilidade de reduzir os custos e ter informações fiáveis sobre os produtos consumidos, em termos de vida útil e disponibilidade de serviços pós-venda, como a reparação ou possibilidade de compra de peças sobressalentes, forçarão os produtores a adaptar-se e inovar para dar resposta a esta nova realidade.

Para que tal seja possível, é imprescindível inserir a circularidade nos processos produtivos, sendo um dos objetivos da comissão europeia, com a aprovação deste novo PAEC, incentivar a circularidade na indústria. As cadeias de valor/setores considerados de maior relevância neste âmbito são aqueles que para além de colocarem os maiores desafios em termos de sustentabilidade, necessitam de ações urgentes. No âmbito do novo PAEC, os setores considerados relevantes são:

1. Eletrónica e Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC);
2. Baterias e veículos;
3. Embalagens;
4. Plásticos;
5. Construção e edifícios;
6. Alimentos, água e nutrientes.

Em **termos de eletrónica e TIC**, estima-se que menos de 40 % dos resíduos eletrónicos sejam reciclados na UE20 (EUROSTAT, 2021g). Em Portugal, em 2017, a taxa de reciclagem de equipamentos elétricos e eletrónicos está nos 43,5%. De acordo com o novo PAEC, verificam-se perdas de valor sempre que os produtos que estão total ou parcialmente funcionais são rejeitados por não serem reparáveis, não poder substituir-se a bateria, entre outros.

Já em termos de **baterias e veículos**, o futuro da mobilidade assenta nas baterias e veículos sustentáveis, que se verifica imprescindível com o crescimento abrupto de produtos e venda de veículos híbridos e elétricos.

No mesmo âmbito, a comissão europeia irá rever as regras sobre os **VFV**, com vista a vincular as questões da conceção ao tratamento em fim de vida, estudar a definição de regras sobre o teor reciclado obrigatório de certos materiais dos componentes e melhorar a eficiência da reciclagem aspetos [COM(2020) 98 final, 2020)].

No setor das **embalagens**, a Comissão Europeia, com o objetivo principal de garantir que todas as embalagens utilizadas no mercado da EU sejam reutilizáveis ou recicláveis até 2030, irá rever a Diretiva 94/62/CE, relativa a embalagens e resíduos de embalagens. Esta Diretiva está atualmente transposta para regime jurídico nacional através do Decreto-Lei n.º 152-D/2017, de 11 de dezembro, que unifica o regime da gestão de fluxos específicos de resíduos sujeitos ao princípio da responsabilidade alargada do produtor, transpondo as Diretivas n.os 2015/720/UE, 2016/774/UE e 2017/2096/UE

Depois dos alimentos, da habitação e dos transportes, os **têxteis** são a quarta categoria com maior intensidade de utilização de matérias-primas primárias e de água, e a quinta no que respeita às emissões de gases com efeito de estufa (European Environment Agency, 2019). O setor dos têxteis verifica-se como problemático pela reduzida percentagem de têxteis reciclados a nível mundial, que se estima em 1% (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

Em termos de **construção e edifícios**, estima-se que o setor da construção seja responsável por mais de 35% da produção de resíduos na UE (EUROSTAT, 2021n). De acordo com Hertwich et al. (2020), uma maior eficiência dos materiais pode reduzir as emissões de GEE até 80 %.

Por último, no âmbito do setor dos **Alimentos, água e nutrientes**, estima-se que, na UE, se perdem ou desperdiçam 20 % dos alimentos produzidos [COM(2020) 98 final].

No anexo do novo PAEC são apresentadas as principais ações e respetivas datas, de onde se verificar que as ações propostas apresentam um prazo para implementação entre o ano 2020 e 2023, pelo que se notará a curto prazo uma mudança de paradigma e uma forte aposta na transição de um modelo económico linear para um modelo económico circular. Para grande parte das ações no âmbito do novo PAEC e setores considerados relevantes, as MPC estão direta ou indiretamente relacionadas.

Tendo como exemplo o setor da eletrónica e TIC, ações que promovam o prolongamento da vida útil do produto terão impactes na cadeia de valor das MPC que os compõem.

No setor das baterias, o novo quadro regulamentar para as baterias está diretamente relacionado com as MPC, considerando que este quadro regulamentar terá em consideração o teor reciclado e adota medidas para melhorar as taxas de recolha e reciclagem de todas as baterias, o aprovisionamento responsável e a segurança do abastecimento de matérias-primas, entre outros.

Os outros setores, em maior ou menor medida, são também afetados pela cadeia de valor das MPC.

Vê-se assim o novo PAEC como de extrema relevância para a promoção da EC e para a cadeia de valor das MPC que compõem os produtos e serviços dos setores considerados relevantes. Para um melhor enquadramento dos setores acima referidos e das ações a tomar deve ser verificado o novo PAEC [COM(2020) 98 final, 2020)].

2.3 Economia Circular em Portugal

Em Portugal o atual enquadramento político nacional para a EC é o Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal (PAEC-P), aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 190-A/2017, de 23 de novembro. O principal objetivo deste plano consiste em definir uma estratégia nacional para a EC assente na produção e eliminação de resíduos e nos conceitos de reutilização, reparação e renovação de materiais e energia.

De acordo com o PAEC-P, embora seja possível traçar um perfil do metabolismo económico, não existem indicadores designados para a medição da circularidade. Em Portugal o metabolismo económico é lento, acumulando materiais em stock, consequência da maior importação de matéria-prima que exportação de produto acabado.

Alguns indicadores interessantes são apresentados neste plano, que se sintetizam de seguida:

- Portugal evolui pouco em termos de produtividade. Em 10 anos, melhorámos 23 %; a EU 30 %; a Espanha, 134 %;

- Em 2015, os minerais não metálicos (p. ex. areia) foram 73 % de 145 milhões de toneladas de materiais extraídos em Portugal;
- Apenas 65 % da água capturada é efetivamente utilizada, e a reutilização é, ainda, residual quando comparada com outros Estados-Membros;
- Em termos de emissões de GEE, desde 2005 que as mesmas têm decaído;
- Produção de resíduos setoriais decresceu nos últimos 5 anos (a contar da data da publicação do PAEC em Portugal) em 35 %, em alinhamento com o decréscimo na produção e consumo.

Ainda de acordo com este plano, são considerados elementos da EC o **Design, Tecnologias e novos modelos de negócio, Ciclos reversos (p. ex. logística inversa)** e **Promotores/contexto favorável**.

Na tabela 4 do PAEC são apresentadas as ações macro e os seus objetivos, setores-chave, papéis/identidades a envolver, orientações, nível de progresso dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (ODS)/EU/PT, indicadores complementares e referências. As ações macro são:

1. Desenhar, Reparar, Reutilizar: uma responsabilidade alargada do produtor;
2. Incentivar um mercado circular;
3. Educar para a EC;
4. Alimentar sem sobrar: produção sustentável para um consumo sustentável;
5. Nova vida aos resíduos!;
6. Regenerar recursos: água e nutrientes;
7. Investigar e inovar para uma EC.

As informações referidas acima para cada ação macro podem ser verificadas na Resolução do Conselho de Ministros n.º 190-A/2017, de 11 de dezembro.

Com a publicação do novo PAEC [COM(2020) 98 final, 2020] é expectável que Portugal também adapte ou atualize o seu plano de ação de modo a ser coerente com as estratégias e ações macro definidas a nível Europeu.

Embora ainda escassos, já existem alguns estudos, projetos, organizações/associações e iniciativas relacionados com a EC em Portugal, como é caso dos projetos CircularStart (LNEG, 2021) e ECOLAB (LNEG, 2021a), o portal eco-nomia (República Portuguesa | Ambiente, 2021), a organização Circular Economy Portugal (Circular Economy Portugal, 2021), a Agenda de I&I sobre Economia Circular (FCT, 2019), entre outros.

Existe também alguma legislação publicada no sentido de garantir algum tipo de circularidade de materiais, direcionados essencialmente para o a recolha e tratamento em fim-de-vida de produtos, como é caso do Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro, que aprova o regime geral da gestão de resíduos, o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro e altera o regime da gestão de fluxos específicos de resíduos, transpondo as Diretivas (UE) n.º 2018/849, n.º 2018/850, n.º 2018/851 e n.º 2018/852.

Este diploma legal apresenta como requisito a inclusão, embora apenas no âmbito das obras públicas e sempre que tecnicamente exequível, de 10% de materiais reciclados ou que incorporem materiais reciclados relativamente à quantidade total de matérias-primas usadas em obra. Ainda de acordo com este diploma legal, esta medida tem como objetivo fomentar a reciclagem dos resíduos e o emprego dos materiais reciclados, promover a sustentabilidade diminuindo a utilização de recursos naturais, assim como contribuir para as metas de valorização dos resíduos impostas a nível europeu a atingir em 2020.

Esta pacote legislativo vê-se, no entanto, insuficiente para aquilo que é a necessidade de transitar do modelo económico linear para o modelo económico circular. Tal deve-se também ao facto de ser relativamente mais fácil tratar os produtos no seu fim-de-vida e tornar a deposição um requisito. Não tão fácil é aprovar legislação direcionada para a vida útil do produto ou para a sua conceção, pois envolve a participação dos setores de produção, de toda a cadeia de valor e dos próprios consumidores.

A difícil implementação de legislação neste âmbito prende-se principalmente com a dificuldade dos operadores económicos, até ao momento, em verem a circularidade como uma oportunidade e não como uma ameaça. Os dados obtidos no âmbito da EC são, na maioria dos casos, a análise de diversas fontes de dados que permitem uma análise do ciclo de vida dos produtos e também obter informações da circularidade existente nesse ciclo, sendo possível identificar se são ou não utilizados materiais reciclados na produção, que percentagem de materiais são reutilizados, quanto dos resíduos gerados desses produtos e/ou materiais são efetivamente recolhidos e valorizados, entre outros dados que permitem obter uma estimativa da circularidade do ciclo de vida do produto e/ou material.

2.4 Matérias-primas críticas na União Europeia e Portugal: conceitos e desenvolvimentos

Tal como referido no ponto 1.2 (Contextualização), as matérias-primas são consideradas a base da economia europeia (Mathieux, F et al., 2017). A manutenção de um fluxo sustentável de MP é crucial para manter a competitividade industrial e garantir um futuro para a sociedade, sendo estas a base para as tecnologias emergentes e consideradas *low-carbon*, como é o caso da energia solar, eólica, iluminação eficiente, mobilidade sustentável (veículos híbridos e elétricos), entre outras (Bobba et al, 2020).

Em 2008 foi adotada pela comissão europeia a iniciativa «Matérias-Primas» (RMI – *Raw Materials Initiative*) através da COM(2008) 699 final, de 04/11/2008, que define uma estratégia integrada para as matérias-primas assente em três pilares:

1. assegurar um acesso às matérias-primas nos mercados internacionais, nas mesmas condições que outros concorrentes industriais;
2. estabelecer, na UE, as condições-quadro adequadas para promover o aprovisionamento sustentável de matérias-primas de fontes europeias;
3. reforçar a eficiência global dos recursos e promover a reciclagem, por forma a reduzir o consumo de matérias-primas primárias na UE e diminuir a dependência relativa das importações.

É desta iniciativa que surge a definição da lista de matérias-primas críticas para a UE: *Além disso, a Comissão recomenda que uma estratégia europeia integrada deve, antes de mais, definir as matérias-primas críticas para a UE. A este respeito, a Comissão propõe, em estreita cooperação com os Estados-Membros e as partes interessadas, identificar uma lista comum de matérias-primas críticas* [COM(2008) 699 final].

Esta iniciativa estabelece um conjunto de ações e os níveis de atuação, que se apresentam no **Quadro 2**.

Quadro 2 – Ações da iniciativa matérias-primas. Fonte: Adaptado de COM(2008) 699 final

Iniciativa <<Matérias-Primas>>		Nível de atuação		
		CE	Estados-membro	Indústria
1	Definir matérias-primas críticas	X	X	X
2	Lançar uma diplomacia estratégica comunitária das matérias-primas junto dos principais países industrializados e dos países ricos em recursos	X	X	
3	Introduzir disposições sobre acesso e gestão sustentável das matérias-primas em todos os acordos comerciais bilaterais e multilaterais e em negociações em matéria de regulação, consoante os casos	X	X	
4	Identificar e contestar as medidas de distorção do comércio adotadas por países terceiros, recorrendo a todos os mecanismos e instrumentos disponíveis, incluindo negociações da OMC, resolução de litígios e parcerias de acesso ao mercado, dando prioridade às medidas que mais subvertem a abertura dos mercados internacionais em prejuízo da UE. Acompanhar os progressos emitindo relatórios intercalares anuais sobre a aplicação dos aspetos comerciais, com base nos elementos fornecidos pelas partes interessadas.	X	X	X
5	Promover o acesso sustentável às matérias-primas no domínio da política de desenvolvimento, recorrendo ao apoio orçamental, a estratégias de cooperação e a outros instrumentos.	X	X	
6	Melhorar o quadro normativo relacionado com o acesso aos solos: <ul style="list-style-type: none"> – promovendo o intercâmbio de boas práticas no domínio do planeamento do uso dos solos e das condições administrativas para exploração e extração e – desenvolvendo orientações que esclareçam sobre como conciliar as atividades de extração no interior ou nas proximidades das zonas Natura 2000 com a proteção do ambiente 	X	X	
7	Fomentar uma melhor ligação em rede dos inquéritos geológicos nacionais tendo em vista melhorar a base de conhecimentos da UE.		X	
8	Promover a aquisição de competências e a investigação centradas nas tecnologias inovadoras de exploração e extração, na reciclagem, nos materiais de substituição e na eficiência dos recursos.	X	X	X
9	Aumentar a eficiência dos recursos e promover a substituição de matérias-primas.	X	X	X
10	Promover a reciclagem e facilitar a utilização de matérias-primas secundárias na UE.	X	X	X

Estas ações têm como objetivo melhorar a informação de recursos minerais europeus de modo a reduzir a dependência de países de fora da UE e, simultaneamente, reduzir o consumo de matérias-primas primárias, promovendo um uso eficiente dos recursos pelo uso de matérias-primas secundárias e da reciclagem.

Neste sentido, a *European Innovation Partnership on Raw Materials* (EIP RM) implementou e desenvolveu vários projetos, como por exemplo o *OneGeology-Europe* (EuroGeoSurvey, 2021), *ProMine* (EuroGeoSurvey, 2021a), *EuroGeoSource* (EuroGeoSurvey, 2021b), *InGeoClouds* (EuroGeoSurvey, 2021c), entre outros.

A *European Minerals Knowledge Data Platform* (EU-MKDP) do projeto Minerals4EU (Minerals4EU, n.d.) permite um acesso simplificado, fácil de usar e eficiente a todos os dados disponíveis e novos relacionados aos recursos minerais.

O *Minerals Yearbook* da EU-MKDP apresenta dados e informações que podem ser obtidos por recurso mineral primário, país e por categoria. Ao selecionar Portugal pode-se obter informação de produção, importação, exportação, recursos, reservas, exploração mineira e fluxos de resíduos.

Uma das medidas para a circularidade das MPC é o contributo da reciclagem destas. Apesar do potencial de reciclagem que algumas MPC apresentam, o contributo para a circularidade é ainda reduzido. De facto, da análise da **Figura 3**, pode-se verificar que a maior contribuição das MPC provém do vanádio, tungsténio e cobalto, sendo para todas estas inferior a 50%.

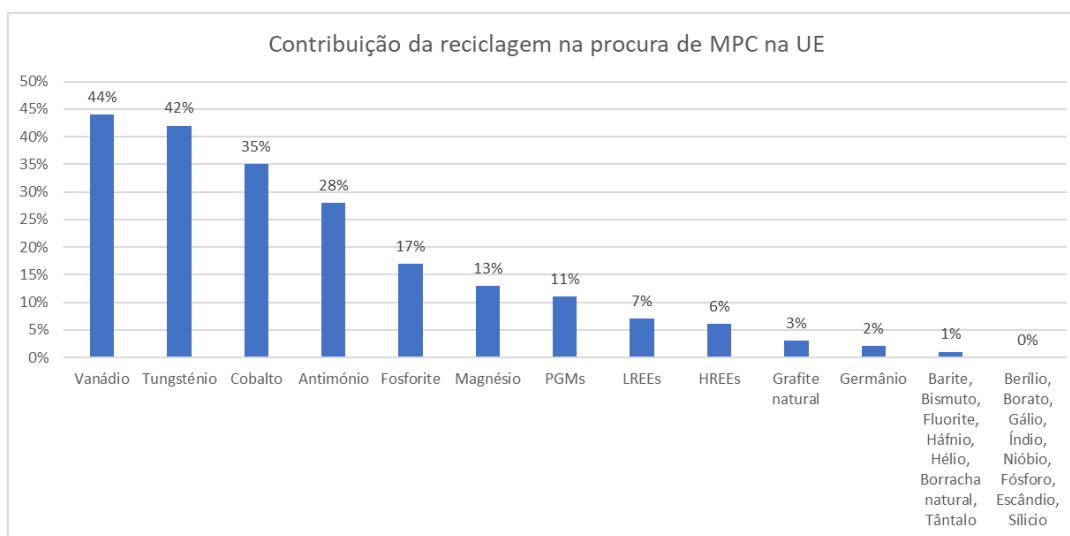


Figura 3 - Contribuição da reciclagem na procura de MPC na UE. Fonte: Mathieux, F et al., 2017

A contribuição elevada de determinadas MPC referidas são consequência das obrigações legais impostas em cada estado-membro da UE.

O relatório da JRC (Mathieux, F. et al, 2017) efetua uma abordagem mais direcionada para as MPC por setor, considerando a lista de 27 MPC de 2017 para a UE, e o relatório da comissão europeia (European Commission, 2020) apresenta uma ficha técnica para as 30 MPC da lista de 2020. Também relevante é o relatório *Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU* (Bobba, S. et al, 2020), que apresenta um estudo das MPC e da sua relevância nos setores e tecnologias estratégicas para a UE.

Antes de se iniciar a análise da lista das 30 MPC considerou-se pertinente perceber e entender como é que esta lista é definida e a metodologia a si associada. Assim, no ponto seguinte, apresenta-se uma breve descrição da metodologia utilizada para a definição da lista de MPC na UE.

2.4.1 Metodologia de definição de MPC

A lista de MPC de 2020 [COM(2020) 474 final], que deu origem à lista das 30 MPC identificadas no

Quadro 6, incluiu uma avaliação de um grupo de 83 materiais individuais ou 66 matérias-primas candidatas, compreendendo 63 individuais e 3 grupos de materiais (dez REEs, cinco LREEs e cinco metais do grupo platina). Nesta avaliação foram considerados novos 5 materiais (arsénio, cádmio, estrôncio, zircónio e o hidrogénio).

Em 2017, a comissão europeia publicou um relatório com as linhas de orientação para a metodologia para estabelecer a lista de MPC da UE (European Commission, 2017), onde se baseou a avaliação de 2020, que considera os seguintes parâmetros:

- *Supply Risk* – Risco de abastecimento (RA);

- *Economic Importance* – Importância Económica (IE).

No ponto seguinte apresenta-se uma breve descrição desta metodologia.

2.4.1.1 Importância Económica (IE)

A **Importância Económica**, um dos indicadores utilizados para a definição da lista de MPC, é um indicador da importância das matérias-primas para a economia da UE. Para o cálculo deste indicador, a metodologia revista apresenta a seguinte equação:

$$EI = \sum_s (A_s * Q_s) * SI_{EI} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

- EI é a importância económica;
- A_s é a percentagem de utilização final da MP utilizada num setor ao nível de 2 dígitos da NACE;
- Q_s é o valor acrescentado do setor ao nível de 2 dígitos da NACE;
- SI_{EI} é o fator de substituição (SI) de uma MP (a utilizar na importância económica);
- O_s representa setor.

O fator de substituição em relação à Importância Económica (SI_{EI}) para um determinado material candidato é calculado utilizando o custo-desempenho do substituto (SCP) para cada material, multiplicado pela sub-quota desse material numa determinada aplicação e pela quota do material na aplicação de uso-final.

$$SI_{EI} = \sum_i \sum_a SCP_{i,a} * Sub - share_{i,a} * Share_a \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

- i denota um material substituto
- a denota uma aplicação do material candidato
- SCP o parâmetro de custo-desempenho do material candidato
- Share a quota da matéria-prima numa aplicação de uso-final
- Sub Share a sub-quota de cada substituto em cada uma das aplicações

2.4.1.2 Risco de Abastecimento(RA)

O parâmetro RA indica o risco de interrupção de fornecimento de um dado material na UE e baseia-se na concentração da oferta primária dos países produtores de matérias-primas, considerando o seu desempenho comercial e de governança.

Dependendo da dependência de importação da UE, proporcionalmente os dois conjuntos de países produtores são levados em consideração - os fornecedores globais e os países de onde a UE obtém as matérias-primas.

O RA é medido na fase de *“bottleneck”* do material, isto é, na fase de extração ou processamento do material, que apresenta o maior risco de abastecimento para a UE.

A substituição da matéria-prima e/ou reciclagem são consideradas medidas de redução de risco.

A fórmula para o cálculo do RA é a seguinte:

$$SR = \left[(HHI_{WGI,t}) \cdot \frac{IR}{2} + (HHI_{WGI,t})_{EU_{sourcing}} \left(1 - \frac{IR}{2} \right) \right] \cdot (1 - EoL_{RIR}) \cdot SI_{SR} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde,

- SR (*Supply Risk*) = risco de abastecimento;
- GS (*Global Supply*) = fornecimento global, ou seja, mix de países fornecedores globais;
- $EU_{sourcing}$ = abastecimento real da UE, ou seja, produção doméstica da UE mais outros países que importam para a UE;
- HHI (*Gerfindahl-Hirschman Index*) = Índice *Herfindahl-Hirschman* (usado como proxy para concentração no país);
- WGI (*World Governance Index*) = Índice de Governança Mundial em escala (usado como proxy para a governança do país);
- t = parâmetro de negociação que ajusta o parâmetro WGI;

- IR (*Import Reliance*) = dependência de importação;
- EoL_{RIR} (*End-of-Life Recycling Input Rate*) = taxa de entrada de reciclagem de fim de vida;
- SI_{SR} (*Substitution Index related to Supply Risk*) = índice de substituição relacionado com o risco de fornecimento.

2.4.1.3 Cálculo dos índices de substituição na avaliação da criticidade

Na metodologia revista a disponibilidade de substitutos é considerada um elemento de redução tanto para a componente da *EI* como para a componente *SR*.

A avaliação tem em consideração apenas os substitutos comprovados que estão disponíveis atualmente e que são efetivamente capazes de reduzir as consequências de uma interrupção e / ou influenciar o risco de uma interrupção de fornecimento .

Os parâmetros SI_{EI} e SI_{SR} são estimados com base nos seguintes sub-parâmetros:

SI_{EI} :

- *Substitute cost-desempenho* (SCP) = Custo-desempenho do substituto.

SI_{SR} :

- *Substitute production* (SP) – Produção do substituto;
- *Substitute criticality* (SCr) – Criticidade do substituto;
- *Substitute co-production* (SCo) – Co-produção do substituto.

O valor de SCP, utilizado para o cálculo do parâmetro SI_{EI} , é estimado considerando a desempenho técnica do material substituto e o custo. A matriz que se apresenta no **Quadro 3** é utilizada para a avaliação do SCP de cada material substituto com base no custo e no desempenho do material substituto.

Quadro 3 – SCP matriz de avaliação (Fonte: adaptado de European Commission, 2017)

Desempenho técnica do material substituto Custo do material substituto	Desempenho similar	Desempenho reduzido	Desempenho no caso de inexistência de substituto
Custo muito elevado (pelo menos 2 vezes superior)	0.9	1	1
Custo ligeiramente superior (até 2 vezes superior)	0.8	0.9	1
Custo similar ou mais baixo	0.7	0.8	1

Esta matriz deve ser aplicada a cada material substituto numa determinada aplicação. É assumida uma redução de 30% na EI se todos os materiais substitutos oferecerem um desempenho semelhante e a um custo semelhante.

No caso de todos os materiais substitutos apresentarem desempenho reduzido e um custo muito elevado assume-se que não existe redução na componente EI, uma vez que não é expectável que estes materiais sejam adotados no mercado.

Para o parâmetro SI_{SR} , é necessário calcular os sub-parâmetros SP, SCr e SCo. Para o SP é seguida a seguinte abordagem:

- **SP = 0.8** se a produção global anual do material substituto for superior à do material candidato;
- **SP = 1** se a produção global anual do material substituto for semelhante ou inferior à do material candidato.

O S_{Cr} é obtido com base no racional apresentado no **Quadro 4**.

Quadro 4 – Matriz de avaliação do S_{Cr} (Fonte: adaptado de European Commission, 2017)

Criticidade do substituto (S _{Cr})	Racional
S _{Cr} = 1	Se o material substituto constava da última lista da UE de MPC, não se espera que este material contribua para a redução do SP do material candidato.
S _{Cr} = 0.8	Se o material substituto não era considerado crítico na última avaliação da UE ou não foi selecionado no exercício anterior, espera-se que este material contribua para a redução do SR do material candidato.
S _{Cr} = 1	Se nenhum material substituto estiver disponível, nenhuma redução do SR é assumida.

Por último, para o S_{Co}, é seguido o racional apresentado no **Quadro 5**.

Quadro 5 – Matriz de avaliação do S_{Co} (Fonte: adaptado de European Commission, 2017)

Coprodução/Subprodução do material substituto (S _{Co})	Racional
S _{Co} = 1	Se o material substituto for extraído apenas como um subproduto ou coproduto - nenhuma redução do SR do material candidato é assumida.
S _{Co} = 0.8	Se o material substituto for extraído como material primário - assume-se uma redução de até 20% do SR.
S _{Co} = 0.9	Se o material substituto for extraído tanto como material primário, mas também como subproduto / coproduto (por exemplo, o caso do molibdênio) - assume-se uma redução de até 10% do SR.
S _{Co} = 1	Se nenhum material substituto estiver disponível, nenhuma redução do SR é assumida.

Esta descrição resumida da metodologia utilizada para a definição da lista de MPC da UE visa apenas fornecer alguma informação dos parâmetros e sub-parâmetros utilizados e as principais diferenças entre a metodologia anterior e a revista (onde se baseou a avaliação de 2020), devendo ser consultado o relatório *Methodology for establishing the eu list of critical raw materials* (European Commission, 2017) para maior detalhe.

No próximo ponto efetuou-se uma análise da lista de 2020 das 30 MPC da UE [COM(2020) 474 final], que teve origem na aplicação desta metodologia.

2.4.2 A lista de 30 MPC da UE

A primeira lista de MPC para a UE foi publicada em 2011 contendo 14 MPC, que surge, tal como já referido, da Iniciativa «Matérias-Primas». Deste então foram publicadas mais 3 listas de MPC, a de 2014 contendo 20 MPC, a de 2017 contendo 27 MPC e a de 2020 contendo 30 MPC. A Lista das 30 MPC [COM(2020) 474 final] apresenta-se no

Quadro 6.

Quadro 6 - Lista das 30 MPC publicadas pela Comissão Europeia [COM(2020) 474 final]

Antimónio (Sb)	Barita	Berílio (Be)	Bismuto (Bi)	Borato
Cobalto (Co)	Bauxite	Háfnio (Hf)	Germânio (Ge)	Gálio (Ga)
Índio (In)	Magnésio (Mg)	Grafite natural (Gn)	Borracha natural	Nióbio (Nb)
Fosfato natural (Prock)	Fósforo (P)	Escândio (Sc)	Silício metálico (Si)	Tântalo (Ta)
Tungsténio (W)	Vanádio (V)	Metais do grupo platina (PGMs)	Elementos de terras raras pesados (HREE)	Elementos de terras raras leves (LREE)
Carvão de coque	Espatoflúor	Lítio (Li)	Titânio (Ti)	Estrôncio (Sr)

Os países que apresentam a maior quota de MPC são os apresentados na **Figura 4**.

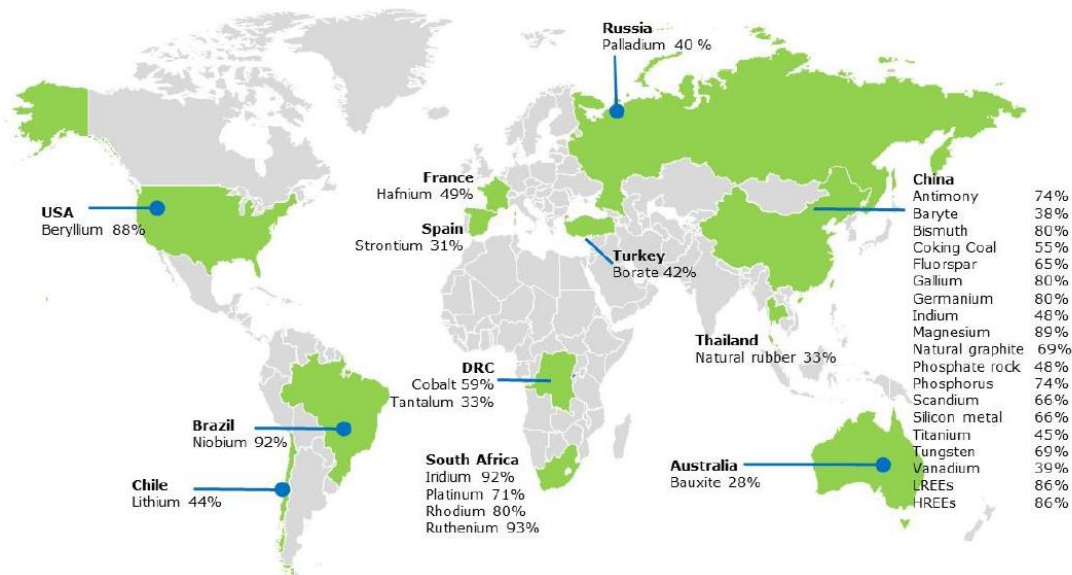


Figura 4 – Países com maior quota de MPC [Fonte: COM(2020) 474 final]

Da análise da **Figura 4** pode-se concluir que grande parte das MPC têm origem da China, detendo quotas para 19 das 30 MPC. Não é então de estranhar que seja uma das maiores potências económicas do mundo.

A circularidade das MPC depende de muitos fatores, sendo um dos mais importantes o setor em que são utilizados.

Tal como referido no ponto 2.4, a reciclagem é uma fonte importante de MP secundárias e pode contribuir para assegurar o fornecimento de MP e promover uma economia mais circular a nível Europeu, e embora algumas MPC tenham um alto potencial de reciclagem e os esforços do governo e de projetos relacionados com a EC, as taxas de reciclagem de MPC são geralmente baixas, como se verifica pela análise da **Figura 3**. Como se pode também verificar, algumas MPC, como por exemplo o vanádio e o tungsténio, apresentam contribuições em termos de reciclagem relativamente elevadas, quando comparadas com outras MPC, mas todas apresentam percentagens inferiores a 50%, o que evidencia a necessidade de tomar medidas mais eficazes para aumentar esta contribuição.

O relatório da JRC (Mathieux, F et al., 2017) efetua uma análise das MPC da lista de 2017 para as seguintes atividades/setores:

1. Indústria extrativa;
2. Aterros;
3. Equipamentos Elétricos e Eletrónicos;
4. Baterias;
5. Setor automóvel;
6. Energias renováveis;
7. Indústria da defesa;
8. Químicos e fertilizantes.

Este é uma importante fonte de informação em termos das principais MPC utilizadas nos setores acima referidos, perspetivas futuras de crescimento de procura, entre outras informações relevantes. Efetuou-se nos próximos pontos uma descrição das principais informações no âmbito de cada uma das atividades/setores acima referidos, e sempre que pertinente mencionando as novas MPC introduzidas na nova lista de 2020.

2.4.2.1 Resíduos da indústria extrativa

A indústria extrativa é essencial uma vez que fornece a mão-de-obra necessária para a extração de MP, que são essenciais para as indústrias e setores económicos que se situam a jusante da cadeia de valor.

Assim, da atividade natural da indústria extrativa, são produzidos resíduos que podem conter algumas MPC e que podem apresentar concentrações elevadas, com potencial de serem aproveitadas em caso de necessidade do mercado e se economicamente viável.

As MPC presentes em resíduos da indústria extrativa podem variar significativamente e dependem também do tipo de minério extraído. A título de exemplo, a extração e processamento de agregados usualmente origina baixas quantidades de resíduos extrativos, ao passo que o processamento de certos minérios com baixa concentração de metais estão geralmente associados a grandes volumes de resíduos extrativos (Mathieux, F et al., 2017).

Em termos de circularidade, reaproveitar as MPC que possam estar presentes nos resíduos da indústria extrativa pode reduzir a necessidade de tratar e armazenar resíduos extrativos bem como reduzir a necessidade de extração primária destas MPC, diminuindo as emissões de GEE associadas à extração de MP e a pressão sobre a biodiversidade e recursos hídricos.

2.4.2.2 Aterros

De acordo com a Diretiva 1999/31/EC um Aterro é *uma instalação de eliminação para a deposição de resíduos acima ou abaixo da superfície natural (isto é, deposição subterrânea), incluindo:*

- *as instalações de eliminação internas (isto é, os aterros onde o produtor de resíduos efectua a sua própria eliminação de resíduos no local da produção) e;*
- *uma instalação permanente (isto é, por um período superior a um ano) usada para armazenagem temporária,*

mas excluindo:

- instalações onde são descarregados resíduos com o objectivo de os preparar para serem transportados para outro local de valorização, tratamento ou eliminação;
- a armazenagem de resíduos previamente à sua valorização ou de tratamento por um período geralmente inferior a três anos;
- a armazenagem de resíduos previamente à sua eliminação por um período inferior a um ano.

De acordo com a mesma diretiva, os aterros são divididos em três tipologias:

1. aterro para resíduos perigosos;
2. aterro para resíduos não perigosos;
3. aterro para resíduos inertes.

Este tipo de destino dado aos resíduos tem sido reduzido pelo avanço tecnológico e pela melhor perceção do impacto ambiental da exploração e desativação de um aterro e como consequência da publicação de legislação direccionadas para a diminuição da deposição de resíduos em aterro, tendo resultado na redução considerável do número de aterros nos países europeus e na quantidade de resíduos depositados nos mesmos.

Em Portugal, por exemplo, de acordo com os dados da Eurostat (EUROSTAT, 2021), comparando o ano de 2010 com 2019, houve uma redução de RSU depositados em aterro em cerca de 876 mil toneladas (Figura 5).

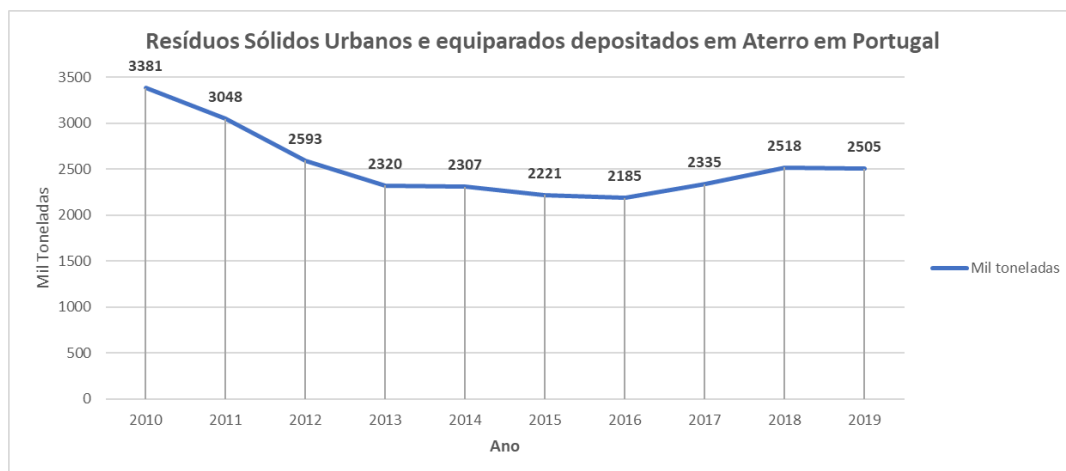


Figura 5 - Resíduos Sólidos Urbanos depositados em Aterro em Portugal (EUROSTAT, 2021)

Os resíduos depositados em aterro são variados e embora no presente momento, decorrente de legislação europeia e nacional, existam algumas restrições a nível da tipologia de resíduos que podem ser depositados, é expectável que existam materiais nestes que contém MPC, embora não existam dados específicos neste âmbito. Existem algumas estimativas da quantidade de MPC presentes em aterro, como por exemplo a efetuada pela Delloitte (*BIO by Deloitte*, 2015), através de um inventário de dados dos fluxos de materiais da indústria e da sociedade na UE-28.

Assim, os aterros poderão ser uma fonte importante de MPC secundárias e uma boa resposta à crescente procura destes recursos.

2.4.2.3 Equipamentos Elétricos e Eletrónicos (EEE)

Os EEE são equipamentos utilizados em todos os setores de atividade e pelo cidadão comum no seu dia-a-dia. O setor dos EEE depende de uma variedade considerável de MPC, como se verifica da análise da Figura 6, nomeadamente antimónio, berílio, cobalto, gálio, entre outros.

Na **Figura 6** identificam-se os principais setores em que as MPC representadas são utilizadas e a % direcionada de determinada MPC para este setor. A título de exemplo, 95% do gálio é utilizado no setor dos EEE, com larga utilização em circuitos integrados e díodos emissores de luz (LEDs) para iluminação.

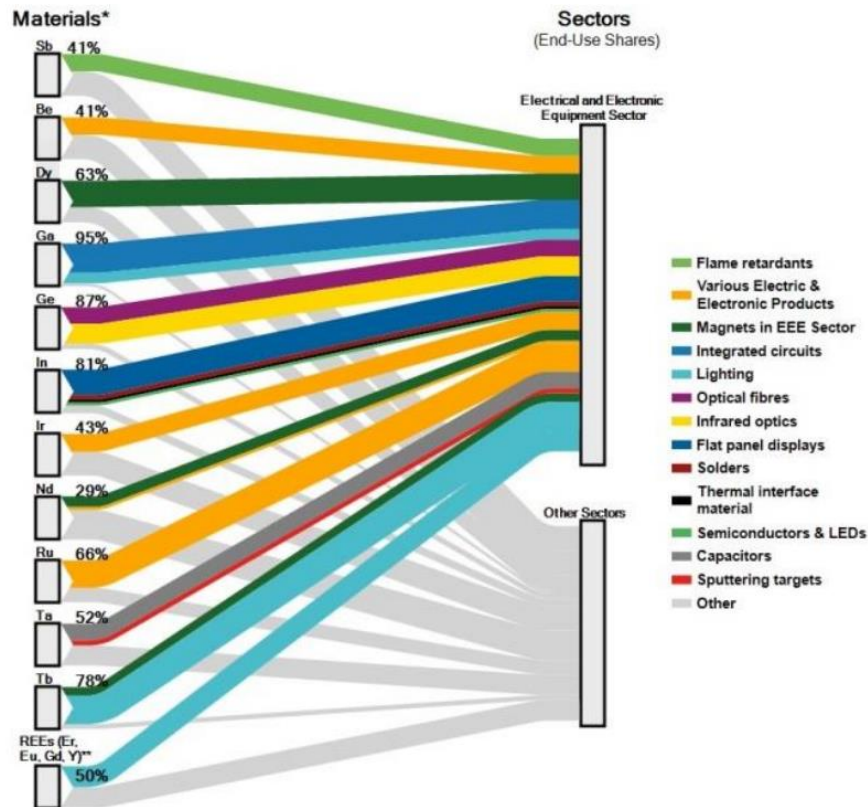


Figura 6 - Percentagem de MPC utilizadas no setor dos EEE de acordo com a avaliação de MPC de 2017. (Fonte: Mathieux, F et al., 2017)

Algumas MPC, como é o caso do antimónio, chegam ao setor dos EEE de forma indireta, que é utilizado em retardantes de chama para plásticos que são utilizados posteriormente na produção de EEE (Mathieux, F. et al., 2017).

Um dos pontos fulcrais da circularidade das MPC é o seu tempo de vida útil, isto é, depende significativamente da sua aplicação nos produtos que os contém. Exemplificando, o tempo de vida útil de determinadas MPC, como é caso dos elementos das terras raras, pode variar de poucos anos em lâmpadas, até décadas em motores de alta eficiência (Mathieux, F. et al., 2017).

Do mesmo modo, a reciclagem de MPC contidas em EEE depende largamente do tipo de aplicação e no seu valor. Por exemplo, metais preciosos em equipamentos eletrónicos são geralmente separados de acordo com a diretiva dos REEE (Diretiva 2012/19/EU).

2.4.2.4 Baterias

De acordo com a diretiva baterias (Diretiva 2006/66/EC), existem três tipos de baterias:

- baterias portáteis;
- industriais;
- automóveis.

As baterias não só alimentam veículos elétricos mas também permitem armazenar energia de uma variedade de fontes, como é caso da energia solar e do vento. Estas necessitam de um conjunto de MPC, como é caso do lítio, antimónio, cobalto, grafite natural, índio e alguns elementos das terras raras (Bobbà et al, 2020).

Do lítio, embora elemento constituinte de algumas baterias, apenas 1% do seu consumo na UE é direcionado para a produção de baterias (European Commission, 2020a).

Da análise da **Figura 7**, que apresenta a percentagem de MPC utilizadas no setor das baterias por tipo de aplicação de acordo com a avaliação das MPC de 2017, verifica-se:

- O antimónio é usado principalmente para baterias de chumbo-ácido;
- Aproximadamente 10% do uso da grafite natural é direcionada para o setor das baterias, nomeadamente como ânodo em baterias recarregáveis e não recarregáveis (Lapie. et al., 2015);
- 44% do cobalto é direcionado para o setor das baterias.
- De entre os elementos das terras raras, 14% do neodímio, 13% do praseodímio, 10% do lantânio mundial e 6% de cério são direcionados para o setor das baterias, mais concretamente baterias NiMH (BIO by Deloitte, 2015).

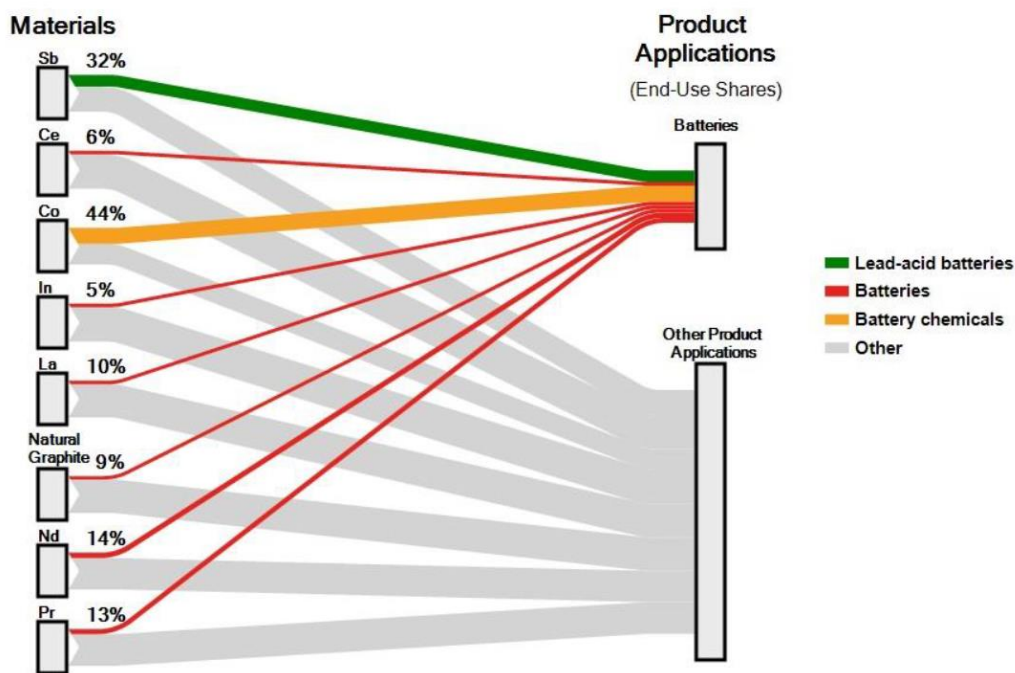


Figura 7 - Percentagem de MPC utilizadas no setor das Baterias por tipo de aplicação de acordo com a avaliação das MPC de 2017. (Fonte: Mathieux, F. et al., 2017)

A diretiva baterias veio estabelecer metas de reciclagem para os estados-membro da EU, sendo que de acordo com Tsiarta et al. (2015) em quase todos os estados-membros a taxa de reciclagem imposta foi atingida.

Estas taxas de recolha e reciclagem variam consoante o tipo de tecnologia da bateria e do setor em que estas são utilizadas. De acordo com IHS Consulting (2014); Mudgal et al. (2014), para baterias à base de chumbo, na Europa, esta taxa atinge 99%.

Também os materiais produzidos no processo de reciclagem de baterias podem ser utilizados na indústria automóvel, como é exemplo o cobalto. A reciclagem de cobalto, para além das razões ambientais, ocorre principalmente devido aos custos mais baixos do cobalto recuperado em comparação com a extração primária de minérios de cobalto (BIO by Deloitte, 2015).

Já em relação à grafite, esta não é direcionada e geralmente é perdida nos processos de recuperação (Mathieux, F. et al., 2017). No entanto, de acordo com BIO by Deloitte (2015); Moradi E Botte (2016), no processo hidrometalúrgico é possível a sua recuperação.

Finalmente, as taxas de reciclagem no final da vida útil de lantânio e cério são inferiores a 1% (BIO by Deloitte, 2015).

2.4.2.5 Setor automóvel

No setor automóvel a necessidade de utilização de MPC tem aumentado com o desenvolvimento dos veículos híbridos (HEVs) e elétricos (EVs), que necessitam de baterias para o seu funcionamento, baterias estas em que, tal como referido no ponto anterior, são incorporadas MPC como o lítio, o cobalto, antimónio, entre outras.

De acordo com European Commission (2014b), 14% do uso mundial de grafite em 2011 foi direcionado para peças automóveis e, em 2012, a utilização na UE de paládio direcionada para motores a gasolina foi de 69%, 70% da platina foi para motores a diesel e 80% do ródio para conversores catalíticos de 3 vias usados para reduzir as emissões dos tubos de escape dos veículos.

Em relação ao Nióbio, em 2012, 44% da utilização na UE foi destinada ao setor automóvel (BIO by Deloitte, 2015).

Também relevante é o expectável crescimento do mercado de veículos híbridos e elétricos, que terá necessariamente implicações na procura de MPC associadas a este setor, nomeadamente de MPC utilizadas em baterias e motores elétricos. O crescimento do mercado de veículos híbridos e elétricos, para o qual se prevê um crescimento significativo, terá implicações na procura de MPC utilizadas nestas tecnologias, como se verifica da análise da **Figura 8**, que apresenta a previsão de procura de 5 MPC (lítio, cobalto, grafite, neodímio, praseodímio e disprósio) até 2030 para utilização em motores de tração elétrica e em baterias.

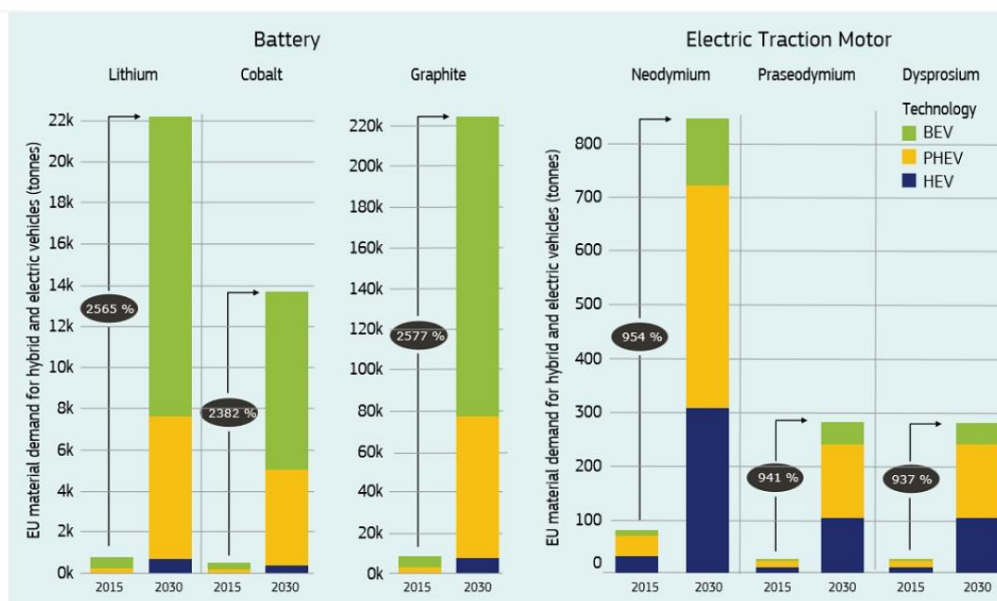


Figura 8 – Previsão de procura de MPC na EU para veículos híbridos e elétricos [Fonte: Beatriz, V-L et al, 2018]

Da análise da **Figura 8** pode-se verificar o aumento considerável da procura destas 5 MPC, especialmente da grafite natural, do lítio e do cobalto associado ao setor das baterias.

De acordo com Blagoeva et al. (2016), o crescimento recente do mercado dos veículos híbridos e elétricos ainda não deu origem aos resíduos associados, nomeadamente das baterias utilizadas nestes veículos. É assim imprescindível garantir a existência de um sistema que permita a reciclagem das MPC que incorporam os veículos elétricos (p.ex nas baterias e motores de tração elétrica).

O valor económico de determinada MPC e a diminuição do seu uso pode também ter implicações na reciclagem destas. A título de exemplo, a diminuição do uso de cobalto em baterias pode diminuir o

interesse na reciclagem destas, caso este interesse não se estenda a outras MPC, como é caso do lítio e da grafite (CEC, 2015).

Em relação aos REE contidos nos motores de tração elétrica, embora o nível atual de reciclagem de ímanes permanentes seja muito limitado (Tsamis & Coyne, 2015), estudos apontam para um potencial de reciclagem próximo dos 40% nos próximos 20 anos (Blagoeva et al., 2016).

Para os PGMs, com o aumento esperado de células a combustível em veículos elétricos espera-se também um aumento significativo de algumas MP, como é caso da platina e do paládio, pela sua utilização nos catalisadores automóveis para o controle de emissões (European Commission, 2014b).

2.4.2.6 Energias renováveis

Tal como para os restantes setores e tecnologias, também as associadas às energias renováveis necessitam de MPC. A energia eólica e fotovoltaica (PV) são as tecnologias de energia renovável mais avançadas e “maduras” atualmente existentes.

Este mercado tem aumentado rapidamente nos últimos anos e espera-se que assim continue, sendo também relevante salientar que as energias renováveis são vistas como uma das soluções ao combate às alterações climáticas, por se considerarem energias limpas/verdes e terem a si associadas baixas emissões de GEE, quando comparadas com a energia com origem em combustíveis fósseis.

Estas tecnologias de energia, eólica e fotovoltaica, contam com uma variedade de materiais. Alguns desses materiais, como é caso do neodímio, praseodímio, disprósio, índio, gálio e silício metálico, são identificados como MPC na lista de MPC de 2020 (*vide* **Figura 9**).

Assim, é expectável que a evolução das tecnologias renováveis tenha implicações na procura destas MP, bem como no mix de tecnologias associadas a este setor (Mathieux, F., et al., 2017). A **Figura 10** apresenta uma estimativa da procura em 2030, face a 2012, de matérias-primas nas tecnologias eólica, fotovoltaica, energia elétrica da rede e biocombustíveis.

De acordo com o Sistema de Informação de Matérias-Primas (RMIS, 2021), a produção de energia é um dos principais contribuintes para o combate às alterações climáticas, desempenhando uma papel fundamental para na transição para um sistema energético sustentável.

A **Figura 9** apresenta a dependência de importação de determinadas MP utilizadas na tecnologia eólica, fotovoltaica e nas baterias.

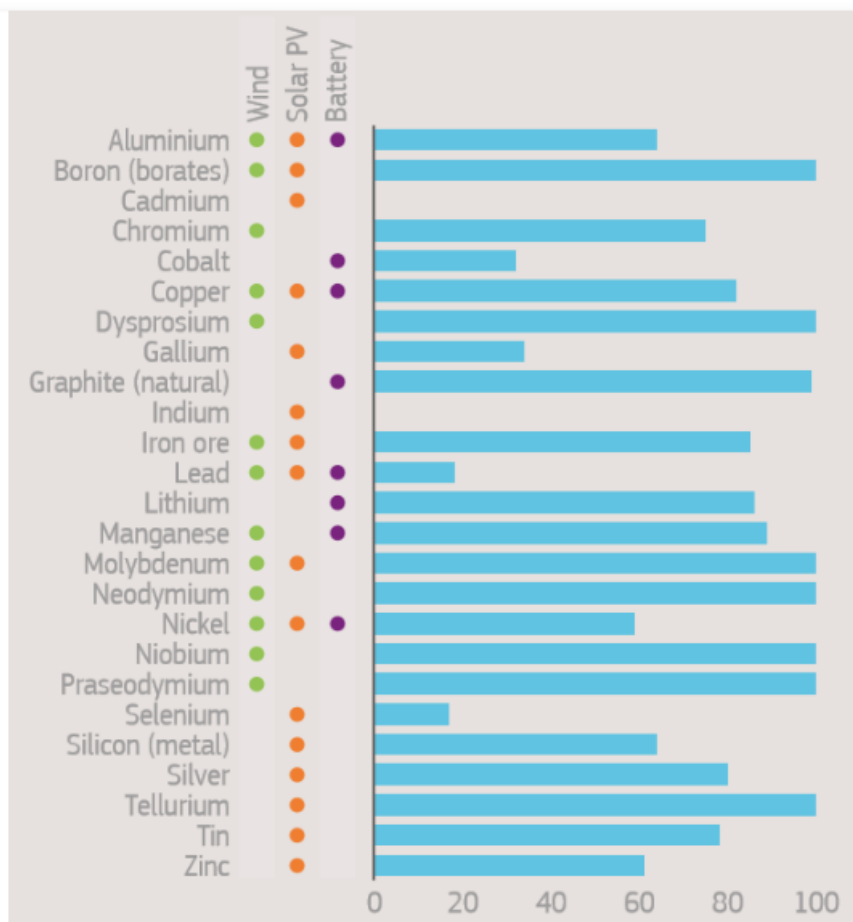


Figura 9 – Dependência de importação de matérias-primas e materiais usados nas tecnologias eólica, fotovoltaica e de bateria. Fonte: European Political Strategy Centre (2018)

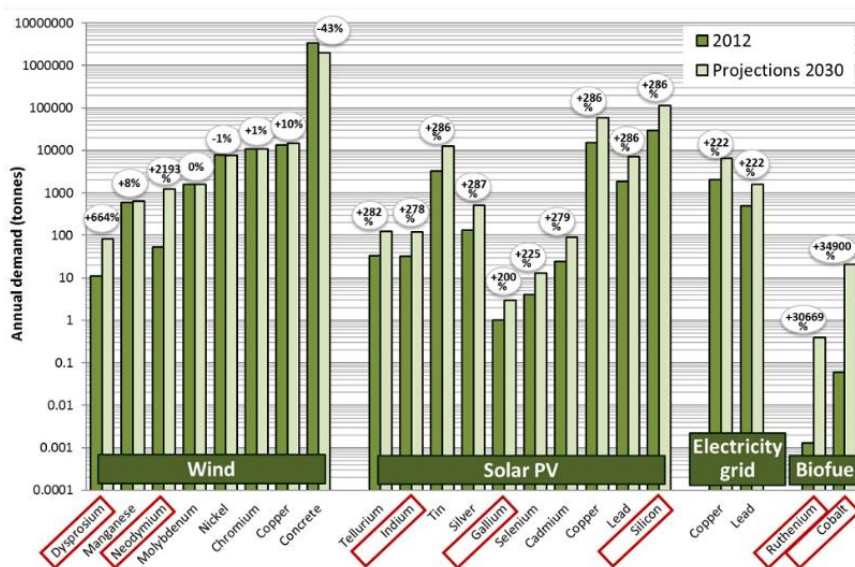


Figura 10 – Procura anual atual (2012) e estimada (2030) de matérias-primas usadas para tecnologias de energia de baixo carbono seleccionadas (ver Introduction of the EU Raw Materials Scoreboard 2016); baseado na metodologia da JRC, 2001 e JRC, 2013). As matérias-primas críticas são apresentadas em caixas vermelhas

As **figuras 9 e 10** evidenciam a necessidade de criar sinergias e sistemas que permitam reduzir a necessidade de utilização de MP utilizadas neste tipo de tecnologias, dado o previsível aumento da sua procura.

2.4.2.7 Indústria da defesa

A indústria da defesa, à semelhança de muitos outros setores de atividade, depende de uma variedade de matérias-primas. Algumas das MP utilizadas neste setor, nomeadamente berílio, cobalto, disprósio, gálio, germânio, háfnio, índio, neodímio, nióbio, platina, praseodímio, outros REEs, samário, tântalo, tungsténio, vanádio e ítrio, são consideradas MPC (Deloitte Sustainability et al., 2017).

De entre os subsetores da indústria da defesa, os principais utilizadores de MPC são a defesa aeronáutica e eletrónica (Mathieux, F., et al., 2017).

Como consequência dos elevados requisitos de qualidade da indústria da defesa, eventuais restrições de fornecimento de MPC são um fator crítico para a segurança desta indústria, e como tal uma grande preocupação (Mathieux, F., et al., 2017).

Considerando a importância económica e estratégica do setor da defesa, responsável por cerca de 1,4 milhões de empregos a apresenta uma faturação aproximada de 100 biliões de euros por ano (Chancerel et al., 2016), garantir um seguro fornecimento de materiais é imprescindível.

2.4.2.8 Químicos e fertilizantes

Por último, grande parte dos químicos e fertilizantes produzidos na Europa dependem de diversas MPC, como por exemplo o antimónio, barita, bismuto, borato, cobalto, espatoflúor, háfnio, grafite natural, nióbio, PGMs, rocha fosfática, fósforo, REE, silício metálico, tântalo, tungsténio e vanádio.

A **Figura 11** apresenta a percentagem de MPC utilizadas em produtos químicos e fertilizantes.

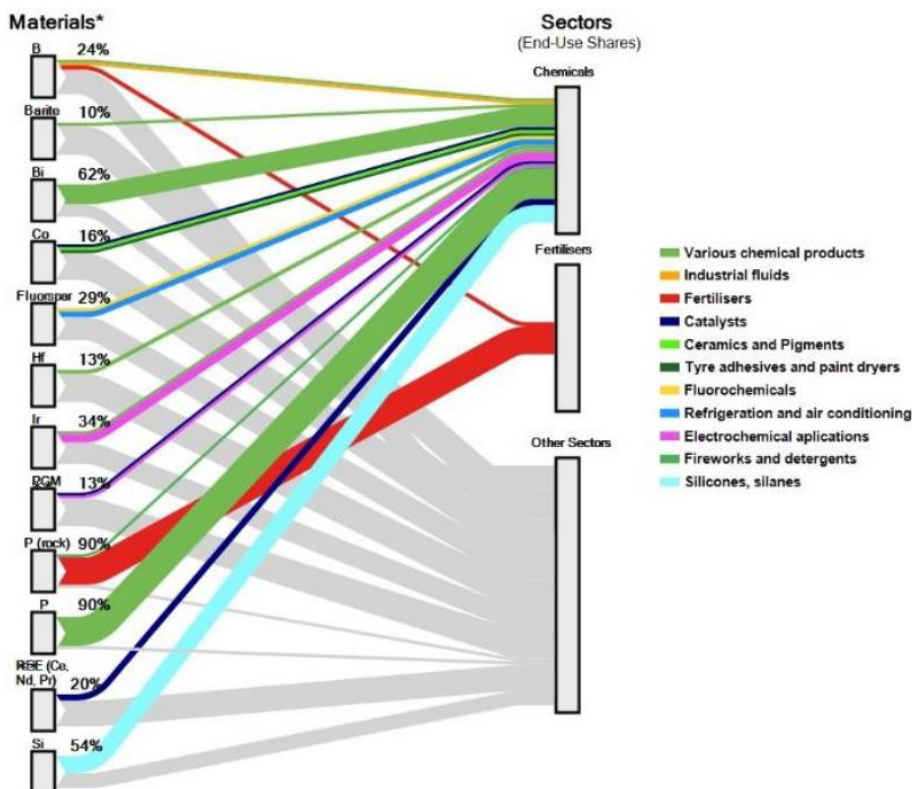


Figura 11 – Percentagem de MPC utilizadas em produtos químicos e fertilizantes de acordo com a avaliação de MPC de 2017. Fonte: Elaboração do JRC com base nos dados da avaliação de criticidade da UE em 2017 (Deloitte Sustainability et al., 2017).

Da análise da **Figura 11** verifica-se que a utilização de MPC no setor dos químicos e fertilizantes estão relacionadas com a produção de catalisadores, fertilizantes, silicones, aplicações eletroquímicas, entre outras aplicações.

Para grande parte das MPC utilizadas neste setor, a UE é completamente dependente de importações (Mathieux, F. et al., 2017), sendo assim bastante vulnerável a eventuais restrições por parte dos países fornecedores.

As conclusões do estudo *Study on Data for a Raw Material System Analysis* (BIO by Deloitte, 2015) indicam que as MPC utilizadas em várias aplicações químicas são perdidas para o ambiente ou depositadas em aterro. É, portanto, imperativo, dado ao mercado neste setor e à dependência de importação de MP (algumas delas MPC), a criação de sistemas e mecanismos que permitam o prolongamento da vida útil destes produtos e a reutilização e a reciclagem das MPC que os incorporam, reduzindo o risco de fornecimento.

Face ao exposto, o relatório da JRC fornece informação bastante relevante em termos de utilização de MPC, quais os setores em que a % de utilização é maior, previsão de crescimento na procura de determinadas MPC, entre outras que se consideram bastante relevantes no âmbito deste trabalho. Este conjunto de informação fornece uma visão valiosa das principais MPC utilizadas em determinados setores que se poderão considerar de extrema relevância a nível nacional e assim ser um importante suporte para a escolha das 3 MPC para Portugal.

2.4.3 Matérias-primas Críticas em Portugal

Tal como já referido no início desta secção, existe um conjunto de projetos que fornecem informação no âmbito das MP, que se podem desagregar por país, elementos, entre outros.

O principal objetivo desta secção é efetuar um levantamento de informação relativo às MPC a nível nacional, tendo como base em informação estatística e em ferramentas disponíveis, como é caso da EU-MKDP (Minerals4EU, n.d.).

De acordo com o *International Council of Mining and Metals* (ICMM, 2018), Portugal tem uma pontuação de 38,2, o que coloca o país no lugar 111 (de 182) no ranking.

A indústria e a manufatura representam uma % significativa do PIB em Portugal, como se verifica da **Figura 12**.

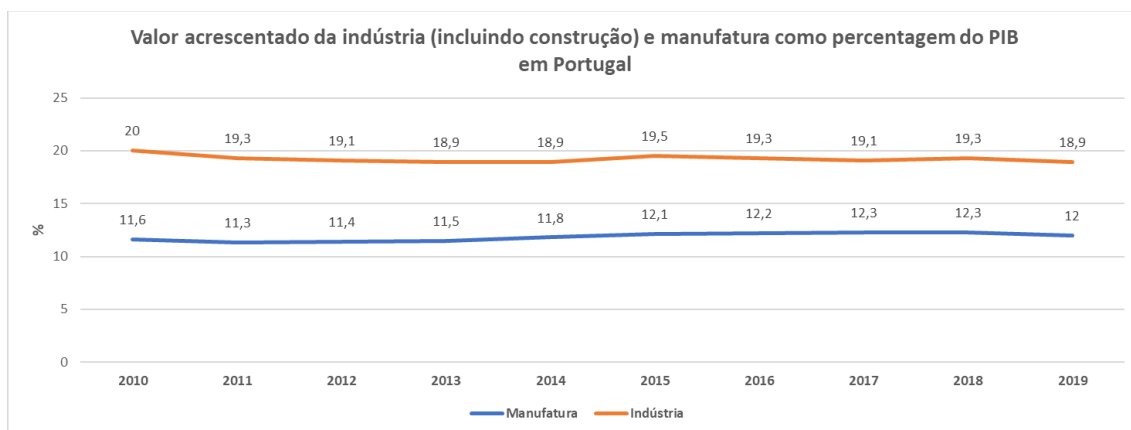


Figura 12 – Indústria e Manufatura como % do PIB em Portugal. Fonte: The World Bank Group (2021)

O EUROSTAT providencia também alguns indicadores relacionados com a EC, divididos nas seguintes temáticas e que permitem obter informação (direta ou indiretamente) sobre:

- a) Produção e consumo:
 - 1. Autossuficiência de matérias-primas para produção na UE;
 - 2. Compras públicas ecológicas (como um indicador para aspetos de financiamento);

3. Produção de resíduos (como indicador de aspetos de consumo);
4. Desperdício alimentar;
- b) Gestão de resíduos:
 1. Taxas de reciclagem;
 2. Fluxos específicos de resíduos;
- c) Matérias-primas secundárias:
 1. Contribuição de materiais reciclados para a procura de matérias-primas;
 2. Comércio de matérias-primas recicláveis entre os Estados-Membros da UE e com o resto do mundo.
- d) Competitividade e inovação
 1. Investimentos privados, empregos e valor agregado bruto;
 2. Patentes relacionadas com a reciclagem e matérias-primas secundárias como proxy da inovação.

Em termos de produção e consumo, apresentam-se os indicadores disponíveis de produção de resíduos em Portugal e na UE 27 no **Quadro 7**.

Quadro 7 – Indicadores de produção em Portugal de RSU per capita, por unidade de PIB e excluindo os principais resíduos minerais por consumo de material doméstico

Indicador	Último ano de reporte	Portugal	UE 27
Produção de RSU per capita (EUROSTAT, 2021a)	2018	508 kg/per capita	492 kg/per capita
Produção de resíduos, excluindo os principais resíduos minerais por unidade de PIB (EUROSTAT, 2021d)	2018	72 Kg/mil euros	66 Kg/mil euros
Produção de resíduos, excluindo os principais resíduos minerais por consumo de material doméstico (EUROSTAT, 2021c)	2018	7.7 %*	12.8 %*

*O indicador é definido como todos os resíduos produzidos num país (em unidade de massa), excluindo os principais resíduos minerais, divididos pelo consumo de material doméstico de um país. A proporção é expressa em percentagem (%), pois ambos os termos são medidos na mesma unidade, ou seja, toneladas.

Do **Quadro 7** anterior pode-se verificar que Portugal apresenta valores de produção de resíduos per capita ligeiramente superiores ao valor da UE dos 27.

Os indicadores de gestão de resíduos em Portugal, considerando os últimos dados disponíveis da EUROSTAT, são apresentados no **Quadro 8**.

Quadro 8 – Indicadores de gestão de resíduos em Portugal

Indicador	Último ano de reporte	Portugal	UE 27
Reciclagem de RSU (EUROSTAT, 2021b)	2018	28,9 %	47,4 %
Taxa de reciclagem de resíduos, excluindo os principais resíduos de minério (EUROSTAT, 2021i)	2016	52 %	56 %
Taxa de reciclagem de resíduos de embalagens por tipo de embalagem (EUROSTAT, 2021h)	2017	55.3 %	67.5 %
Taxa de reciclagem de resíduos eletrónicos (EUROSTAT, 2021g)	2017	43.5 %	39.5 %

Indicador	Último ano de reporte	Portugal	UE 27
Reciclagem de resíduos biológicos (EUROSTAT, 2021f)	2018	83 kg/per capita	85 kg/per capita
Taxa de recuperação de RCD (% de RCD reciclados) (EUROSTAT, 2021k)	2016	93 %	88 %

Do **Quadro 8** pode-se verificar que a taxa de reciclagem de RSU é bastante inferior ao nível da UE dos 27. Os restantes indicadores apresentam valores bastante próximos dos valores da UE dos 27, destacando-se, no entanto, o valor bastante próximo dos 100% e superior ao valor da UE dos 27 em termos de taxa de recuperação de RCD.

Em termos de Matérias-primas secundárias, apresenta-se no **Quadro 9** os indicadores.

Quadro 9 – Indicadores de matérias-primas secundárias em Portugal

Indicador	Último ano de reporte	Portugal	UE 27
Taxa de uso circular de material (% do total) (EUROSTAT, 2021i)	2019	2.2 %	11.9 %
Comércio de matérias-primas recicláveis (EUROSTAT, 2021m)	2019	469.019 toneladas	8.877.945 toneladas

Do **Quadro 9** destaca-se o valor bastante reduzido, a nível Europeu mas especialmente a nível nacional, da taxa de uso circular de material, que dá uma indicação da contribuição de materiais reciclados para a procura de matérias-primas.

Por último, apresenta-se no **Quadro 10** os indicadores relacionados com a competitividade e inovação para a EC em Portugal.

Quadro 10 – Indicadores de matérias-primas secundárias em Portugal

Indicador	Último ano de reporte	Portugal	UE 27
Investimentos privados, empregos e valor agregado bruto relacionados com os setores da EC (EUROSTAT, 2021j)	2017	1548.3 milhões de euros	125 766 milhões de euros
Patentes relacionadas com a reciclagem e matérias-primas secundárias como proxy da inovação (EUROSTAT, 2021o)	2016	0	269.14

É de notar que o valor do investimento em Portugal tem apresentado uma tendência positiva (aumentado o valor do investimento), sendo que em 2011 foi de 1284.5 milhões de euros e em 2017 foi de 1548.3 milhões de euros (EUROSTAT, 2021j).

Considerando a existência de projetos já bastante desenvolvidos que permitem a análise e tratamento de dados de MPC por país, apresenta-se abaixo as informações da EU-MKDP para Portugal.

Em termos de produção, em Portugal, de acordo com a EU-MKDP, apenas existe, da lista de MPC, a produção de tungsténio e lítio. Os dados vão de 2004 a 2018, e apresentam-se no **Quadro 11**.

Em termos de importação, pode-se verificar, de acordo com a EU-MKDP, que existe a importação de antimónio, tungsténio, elementos terras raras, tântalo e titânio. Os dados vão de 2004 a 2018 e apresentam-se no **Quadro 12**.

Já em termos de exportação, pode-se verificar, de acordo com a EU-MKDP, que existe a exportação de antimónio, tungsténio, elementos das terras raras, tântalo e titânio. Os dados vão de 2004 a 2018 e apresentam-se no **Quadro 13**.

Quadro 11 – Produção de MP em Portugal de 2004 a 2018 (adaptado da EU-MKDP)

Commodity	Sub-commodity	Unidade	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Tungsténio (produção de minério) – Wolframite e Scheelite	-	t (mc)	746	816	780	846	981	823	799	818	763	692	671	474	549	669	715
Minerais de Lítio	Lepidolite	Ton	28696	26185	28497	34755	34888	37359	4109	37534	20698	19940	17459	19275	40758	65743	76818

Quadro 12 – Importação de MPC em Portugal de 2004 a 2018 (adaptado da EU-MKDP)

Commodity	Sub-commodity	Unidade	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Antimónio	Óxidos	t	242	137	166	172	161	146	240	184	239	229	239	291	356	431	392
Metal de tungsténio	Metal	t	153	179	106	122	251	193	277	206	151	147	70	100	70	64	70
Carbeto de Tungsténio	Carbeto	t	109	105	97	119	169	46	110	106	79	93	76	79	58	92	114
Minério e concentrados de Tungsténio	Minérios e concentrados (peso bruto)	t	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	200	885	90
Compostos das Terras Raras	Compostos de Cério	t	13	46	46	97	7	2	5	18	3	3	3	5	3	3	3
Terras Raras	Ferro-cério e outras ligas pirofóricas	t	3	4	5	0	0	0	1	87	-	-	1	1	1	33	476
Metal de Titânio	Metal	t	-	-	-	-	-	-	46	28	38	32	226	261	220	79	137
Minerais de Titânio	Minerais de titânio	t	-	-	47	412	263	358	714	807	429	517	885	828	787	563	325

Quadro 13 – Exportação de MPC em Portugal de 2004 a 2016 (adaptado da EU-MKDP)

Commodity	Sub-commodity	Unidade	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Minérios e concentrados de tungsténio	Minérios e concentrados de Tungsténio	t	900	1425	1305	1466	1705	1407	1289	1324	1325	1253	1070	847	1185	1163	1792
Metal de Tungsténio	Metal	t	217	-	-	16	17	20	6	131	51	10	70	30	27	19	8
Óxidos de titânio	Óxidos	t	431	512	840	1064	1189	1166	1091	3422	5322	6733	6934	8641	5570	7892	6114
Antimónio	Metal	t	26	1	646	267	60	119	138	70	277	138	51	170	80	105	100
Elementos das Terras Raras	Outros Elementos das Terras Raras	t	0	0	0	0	0	20	9	2	0	0	0	0	0	0	0
Metal de Tântalo	-	t	42	15	4	63	48	49	98	81	50	27	12	21	0	0	0
Óxidos de Tântalo	Óxidos	t	431	512	840	1064	1189	1166	1091	3422	5322	6733	6934	8641	5570	7892	6114

De recursos e reservas, de acordo a EU-MKDP, Portugal apresenta como recursos históricos estimados 9.3 milhões de toneladas de lítio, 8 milhões de toneladas de nióbio, 8.04 milhões de toneladas de tântalo, 2.4 milhões de toneladas de elementos das terras raras, 690000 m³ de titânio e 68.728 de milhões de toneladas de tungsténio.

O projeto ProSUM (ProSUM, 2021) disponibiliza a primeira plataforma de dados de conhecimento de mina urbana (EU-UMKDP, 2015-2018), que centraliza um conjunto de dados e informações disponíveis sobre colocação no mercado, stocks, fluxos e tratamento de resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos (EEE), veículos em fim de vida (VFV), baterias e resíduos mineiros.

Esta plataforma de acesso aberto contém de forma centralizada todos os dados sobre colocação no mercado, stocks em uso e “hibernados”, composições e fluxos de resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos (EEE), veículos e baterias, para todos os países da UE-28, e adicionalmente para a Suíça e Noruega.

Um conjunto de tabelas dinâmicas permite aceder a dados sobre:

1. A Mina Urbana, representando o número e o tipo de produtos colocados no mercado, em stock (em uso e hibernados) e gerados como resíduos.
2. As composições específicas dos principais componentes, materiais e elementos, como alumínio, cobre, ouro ou neodímio, contidos em baterias, EEE e veículos.
3. Os fluxos de resíduos, incluindo os valores de recolha reportados pelos estados-membros, estimativas para pequenas baterias e EEE em resíduos sólidos municipais não classificados, certas baterias complementares e fluxos de reciclagem de EEE, veículos usados exportados e de localização desconhecida, baterias e eletrónicos.

Estes dados podem ser desagregados por país, dando importantes *inputs* de colocação no mercado de produtos, stocks de produtos, componentes e elementos, bem como de resíduos gerados.

No âmbito deste trabalho, efetuou-se uma caracterização dos elementos colocados no mercado, em stock e gerados como resíduo em cada um dos grandes grupos de produtos avaliados no projeto ProSUM (Veículos, Baterias e EEE) e disponibilizado através da EU-UMKDP.

No **Quadro 14** apresentam-se as MPC colocadas no mercado, em stock e geradas como resíduo em Portugal para o grupo dos EEE em 2000 e 2020.

Quadro 14 – MPC colocadas no mercado, em stock e gerados como resíduo em Portugal para o grupo dos EEE (adaptado da EU-UMKDP)

MPC	Colocação no mercado (Ton)		Em Stock (Ton)		Resíduos gerados (Ton)	
	2000	2020	2000	2020	2000	2020
Antimónio	767,00	3,00	6753,00	977,00	525,39	232,55
Berílio	0,03	0,02	0,13	0,11	0,01	0,02
Bismuto	0,87	0,01	7,81	0,65	0,56	0,13
Cério	0,49	0,13	2,08	2,29	0,34	0,47
Cobalto	6,65	20,21	38,48	145,68	3,33	14,20
Disprósio	1,38	1,41	10,19	14,34	0,75	1,33
Érbio	0,02	0,04	0,07	0,15	0,01	0,03
Estrôncio	413,63	37,18	3585	1020,99	272,49	154,45
Európio	0,18	0,01	0,72	0,66	0,13	0,15
Gálio	0,09	0,07	0,53	0,63	0,05	0,08

MPC	Colocação no mercado (Ton)		Em Stock (Ton)		Resíduos gerados (Ton)	
	2000	2020	2000	2020	2000	2020
Germânio	0,01	0,01	0,05	0,04	0,01	0,01
Índio	0,31	0,35	2,10	3,78	0,20	0,44
Lantânio	0,56	0,04	2,33	2,12	0,41	0,48
Lítio	0,02	0,01	0,13	0,09	0,01	0,01
Neodímio	19,27	19,91	142,78	202,26	10,54	18,87
Nióbio	0,57	0,69	4,48	3,43	0,77	0,57
Paládio	0,11	0,09	0,62	0,67	0,07	0,09
Platina	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00
Praseodímio	0,50	0,66	2,75	4,32	0,29	0,63
Ródio	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00
Ruténio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tântalo	0,61	0,60	2,85	3,94	0,32	0,63
Térbio	0,18	0,03	0,78	0,76	0,13	0,17
Tungsténio	38,26	58,35	239,95	600,58	19,41	54,87
Vanádio	0,05	0,03	0,37	0,43	0,03	0,04
Ítrio	2,52	0,12	10,40	9,42	1,86	2,21

No

Quadro 15 apresentam-se as MPC colocadas no mercado, em stock e geradas como resíduo em Portugal para o grupo dos veículos.

Quadro 15 – MPC colocadas no mercado, em stock e gerados como resíduo em Portugal para o grupo dos Veículos (adaptado da EU-UMKDP)

MPC	Colocação no mercado (Ton)		Em Stock (Ton)		A sair do Stock (Ton)	
	2001	2020	2005	2020	2005	2020
Cério	15,27	10,30	141,46	126,87	14,95	8,51
Cobalto	2,95	6,17	73,55	134,31	4,08	4,48
Disprósio	0,44	3,65	17,97	72,07	0,99	2,47
Gálio	2,87	3,15	64,79	67,77	3,68	2,29

MPC	Colocação no mercado (Ton)		Em Stock (Ton)		A sair do Stock (Ton)	
	2001	2020	2005	2020	2005	2020
Índio	0,03	0,02	0,62	0,54	0,03	0,02
Neodímio	6,60	26,71	226,40	551,90	12,53	18,65
Nióbio	8,12	12,09	210,27	284,09	9,98	8,74
Paládio	1,49	1,08	19,76	17,40	1,56	0,84
Platina	0,15	0,28	18,93	16,32	0,35	0,08
Praseodímio	1,04	3,91	35,62	85,02	1,97	2,83
Ródio	0,18	0,12	1,45	1,31	0,17	0,10
Tântalo	0,99	0,76	18,93	16,48	1,05	0,55
Térbio	0,00	0,00	0,05	0,05	0,00	0,00
Yttrium	0,08	0,06	1,61	1,40	0,09	0,05

Por último, no **Quadro 16** apresentam-se as MPC colocadas no mercado, em stock e geradas como resíduo em Portugal para o grupo das baterias.

Quadro 16 – MPC colocadas no mercado, em stock e gerados como resíduo em Portugal para o grupo das Baterias (adaptado da EU-UMKDP)

MPC	Colocação no mercado (Ton)		Em Stock (Ton)		Resíduos gerados (Ton)	
	2010	2020	2005	2020	2005	2020
Antimónio	160	200	770	980	120	170
Cério	2	1	9	10	1	1
Cobalto	58	45	230	230	30	37
Grafite Natural	56	130	200	590	24	69
Lantânio	13	9	73	86	10	11
Lítio	13	32	49	130	6	16
Neodímio	0	0	3	3	0	0
Praseodímio	0	0	2	2	0	0

Em termos de colocação no mercado, considerando os valores projetados de 2020 e a soma de colocação no mercado de todos os grandes grupos (EEE, Veículos e Baterias), destacam-se o antimónio, grafite natural, cobalto, tungsténio, neodímio, estrôncio e o lítio (*vide*

Quadro 17). Ocupam também posições de relevância o nióbio, cério, disprósio e o praseodímio.

Quadro 17 – Soma de colocação de mercado dos grandes grupos do projeto ProSUM (EEE, Veículos e Baterias) em Portugal por MPC (adaptado da EU-UMKDP)

MPC	Colocado no mercado (2020 - projetado) Ton	MPC	Colocado no mercado (2020 - projetado) Ton	MPC	Colocado no mercado (2020 - projetado) Ton
Antimónio	203,00	Lantânio	9,04	Ródio	0,12
Grafite Natural	130,00	Disprósio	5,07	Érbio	0,04
Cobalto	71,38	Praseodímio	4,58	Vanádio	0,03
Tungsténio	58,35	Gálio	3,22	Térbio	0,03
Neodímio	46,62	Paládio	1,17	Berílio	0,02
Estrôncio	37,18	Tântalo	0,60	Európio	0,01
Lítio	32,01	Índio	0,38	Germânio	0,01
Nióbio	12,78	Platina	0,28	Bismuto	0,01
Cério	11,42	Ítrio	0,19	Ruténio	0,00

Em termos de MPC em stock, o antimónio, dado à abundante colocação no mercado na última década, apresenta um valor em stock consideravelmente superior às restantes MPC.

De seguida, em termos de relevância, surge o estrôncio, neodímio, tungsténio, grafite natural e o cobalto. O nióbio, cério, lítio, praseodímio, lantânio, disprósio e gálio apresentam também elevados valores em stock. Pode-se verificar já neste momento uma coerência entre MPC colocadas no mercado e em stock.

Quadro 18 – Soma de stock dos grandes grupos do projeto ProSUM (EEE, Veículos e Baterias) em Portugal por MPC (adaptado da EU-UMKDP)

MPC	Em Stock (2020 - projetado) Ton	MPC	Em Stock (2020 - projetado) Ton
Antimónio	1957	Paládio	18,07
Estrôncio	1020,99	Platina	16,33
Neodímio	757,16	Ítrio	9,42
Tungsténio	600,58	Índio	4,32

MPC	Em Stock (2020 - projetado) Ton	MPC	Em Stock (2020 - projetado) Ton
Grafite Natural	590,00	Ítrio	1,4
Cobalto	509,99	Ródio	1,33
Nióbio	287,52	Térbio	0,81
Cério	139,16	Európio	0,66
Lítio	130,09	Bismuto	0,65
Praseodímio	91,34	Vanádio	0,43
Lantânio	88,12	Érbio	0,15
Disprósio	86,41	Berílio	0,11
Gálio	68,4	Germânio	0,04
Tântalo	20,42		

A tendência observada mantém-se para as MPC a sair de stock (exportado para uso fora do país, no caso de veículos, ou gerado como resíduo), com destaque para o antimónio e para o estrôncio.

Quadro 19 – Soma de a sair de stock dos grandes grupos do projeto ProSUM (EEE, Veículos e Baterias) em Portugal por MPC (adaptado da EU-UMMKDP)

A sair do stock (exportado ou resíduo, 2020 - projetado)									
Antimónio	402,55	Lítio	16,01	Gálio	2,37	Európio	0,15	Érbio	0,03
Estrôncio	154,45	Lantânio	11,48	Ítrio	2,21	Bismuto	0,13	Berílio	0,02
Grafite Natural	69	Cério	9,98	Tântalo	1,18	Ródio	0,1	Germânio	0,01
Cobalto	55,68	Nióbio	9,31	Paládio	0,93	Platina	0,08		
Tungsténio	54,87	Disprósio	3,8	Índio	0,46	Ítrio	0,05		
Neodímio	37,52	Praseodímio	3,46	Térbio	0,17	Vanádio	0,04		

3º Capítulo

3.1 *Ferramentas multicritério de apoio à decisão*

As avaliações a efetuar no âmbito da sustentabilidade necessitam da gestão de diversos tipos de informação e as metodologias multicritério de apoio à decisão (MMAD) têm demonstrado a sua utilidade em muitos problemas de gestão e de sustentabilidade (capítulo 23 de Munda, 2005; Cinelli et al., 2014; Kandakoglu et al., 2019; entre outros).

Existem vários tipos de métodos multicritério que têm vindo a ser utilizados com essa finalidade. Cinelli et al. (2014) efetuaram uma revisão onde apresentam o desempenho de vários métodos multicritério e abordam as questões relacionadas com perspectiva de ciclo de vida, limites e gestão de incertezas, software de suporte e facilidade de uso. Pode-se dizer que MMAD é um subcampo da investigação operacional que lida com problemas de avaliação de um conjunto de alternativas em termos de múltiplos, geralmente conflitantes, critérios de decisão (Greco et al., 2016). É especialmente adequado para problemas de tomada de decisão na área da sustentabilidade por vários motivos:

- a) torna possível considerar simultaneamente o impacto económico, social e ambiental de alternativas no processo de tomada de decisão,
- b) oferece a capacidade de processar avaliações quantitativas e qualitativas de alternativas que são comuns em contextos de sustentabilidade. Para cada alternativa a avaliação pode ser quantitativa (avaliada numa escala de razão ou intervalo) ou qualitativa (avaliada numa escala ordinal ou usando variáveis linguísticas),
- c) as decisões de sustentabilidade envolvem pontos de vista diferentes e, muitas vezes conflitantes. Kandakoglu et al. (2019) efetuaram uma revisão bibliográfica onde se evidencia que os métodos MMAD têm vindo a ganhar destaque para classificar e priorizar opções sob os imperativos de sustentabilidade. Estes métodos têm atraído o interesse de um número cada vez maior de empresas e investigadores pois tornam possível contabilizar objetivos conflitantes à medida que ocorrem em problemas específicos do mundo real e porque essas técnicas podem lidar com a incomensurabilidade de valores.

A incomensurabilidade técnica vem da natureza multidimensional das questões de sustentabilidade. Deve-se notar que a construção de um modelo descritivo de um sistema do mundo real depende de uma forte suposição sobre o propósito desta construção, por ex. para avaliar a sustentabilidade de uma dada localização geográfica, de um país, de uma cidade, etc..., o conjunto de dimensões, objetivos e critérios utilizados para o processo de avaliação etc. Em resumo, a avaliação multicritério estabelece preferências entre opções em relação a um conjunto de objetivos identificados como significativos pela equipa de tomada de decisão e para os quais estabeleceu critérios mensuráveis de forma a avaliar até que ponto esses objetivos foram atingidos (Munda, 2005).

O uso de uma abordagem multicritério é muito eficiente para implementar uma estrutura multi / interdisciplinar. Quando os especialistas envolvidos têm várias origens numa fase inicial o processo de comunicação é sempre muito difícil; no entanto, é surpreendente perceber que, quando uma estrutura multicritério é usada, gera-se normalmente uma linguagem comum.

Esta virtude das abordagens multicritério foram corroboradas num grande número de estudos de caso do mundo real abordado por meio de uma variedade de métodos como por exemplo Beinat (1997) que usa principalmente abordagens do tipo MAUT (Multi Attribute Utility Theory), Maystre et al. (1994) que lidou com esta temática fazendo uso dos métodos ELECTRE, Moreno-Jiménez et al. (1999) com a utilização do método AHP, ou Salminen (1998) que utilizou a técnica SMART, entre muitos outros exemplos de métodos multicritério que têm vindo a ser usados para lidar com as questões do desenvolvimento sustentável numa perspetiva multicritério.

3.2 Tipos de métodos de avaliação multicritério

Esta seção fornece uma breve descrição das principais características de vários métodos multicritério de apoio à decisão que têm vindo a ser utilizados em estudos de sustentabilidade.

3.2.1 Analytical Hierarchy Process (AHP)

O Analytic Hierarchy Process (AHP) é um método multicritério de apoio à decisão desenvolvido por Saaty (1980). Este método consiste em decompor um problema multicritério complexo e estruturá-lo hierarquicamente e posteriormente determinar coeficientes de ponderação para cada um dos elementos, em cada nível da hierarquia, através da comparação de todos os pares possíveis (Belton & Stewart, 2002; Figueira et al. 2005; Goodwin & Wright 2007; Wang et al. 1998; Zakarian & Kusiak 1999).

Na base do Analytical Hierarchy Process (AHP) está um método para converter avaliações subjetivas de importância relativa num conjunto de pontuações ou pesos (Freudenberg, 2003).

Este método provou ser um dos métodos de análise multicritério mais amplamente aplicados em múltiplas aplicações mas contudo, ao mesmo tempo, atraiu críticas substanciais de vários especialistas de métodos de análise multicritério (Dodgson, 2009).

Os inputs fundamentais para o AHP são as respostas do decisor a uma série de questões, como por exemplo "Qual a importância do critério A relativamente ao critério B?". Questões como esta e semelhantes podem ser utilizadas para estabelecer os pesos dos critérios e pontuações para as opções nos diferentes critérios em avaliação no processo da tomada de decisão. Exemplos de softwares que implementam o método AHP são o EXPERT CHOICE (Saaty & Forman, 1983) e o HIPRE3+ (Mustajoki & Hamalainen, 2000).

O procedimento para aplicação do método AHP passa por:

1. Estabelecer a hierarquia do problema de decisão – Árvore de critérios e opções;
2. Efetuar comparações emparelhadas entre os critérios e as alternativas (opções);
3. Transformar as comparações em pesos e verificar a consistência das comparações efetuadas pelos decisores;
4. Utilizar os pesos para obter os scores/pontuações das diferentes alternativas e efetuar uma decisão provisória;
5. Efetuar a análise de sensibilidade.

A grande diferença da árvore no método AHP dos restantes é que neste as alternativas/opções aparecem ao nível hierárquico mais baixo. A escala proposta por Saaty para a comparação entre critérios e alternativas é:

- Igualmente importante – 1;
- Fracamente mais importante – 3;
- Fortemente mais importante – 5;
- Muito fortemente mais importante – 7;
- Extremamente mais importante – 9.

O método depois converte as respostas dos decisores em pontuações, de acordo com a escala desenvolvida permitindo também a atribuição de valores intermédios. Alternativamente, o decisor (ou decisores) pode dar um input numérico na escala de 1 até 9. Após todas as comparações serem efetuadas o método AHP converte os valores em pesos, que são normalizados para que a sua soma dê 1. Posteriormente, os pesos e pontuações das diferentes opções permite obter o valor global de cada opção e tomar uma decisão provisória, sendo que a opção que tem o maior valor será, à partida, a preferencial.

Os axiomas do método AHP são:

- O axioma da reciprocidade: Se A e B são opções ou critérios na hierarquia do problema de decisão e A é n vezes mais preferível (ou mais importante ou mais provável) do que B, então B tem de $(1/n)$ vezes tão preferível (ou importante ou provável) quanto A.
- O Axioma da homogeneidade: Os elementos a comparar não devem diferir de quantidades extremas num dado critério.
- O axioma de síntese: Os julgamentos sobre a importância dos elementos na hierarquia não dependem dos elementos que se encontram abaixo deles.

- O axioma das expectativas: Os decisores têm de garantir que as suas ideias estão de uma forma adequada representadas no modelo de decisão.

O software EXPERT CHOICE (Saaty & Forman, 1983), a título de exemplo, permite depois efetuar a análise de sensibilidade e verificar a robustez dos resultados obtidos.

Existem diversos trabalhos de aplicação do método AHP nas áreas de sustentabilidade, como é caso de Waris et al. (2019), Kumar et al. (2015), Ke (2020), entre muitos outros.

3.2.2 Métodos Outranking

Uma abordagem bastante diferente foi desenvolvida em França por Bernard Roy (Roy, 1974) na década de 1960 e alcançou um bom grau de aplicação em alguns países da Europa continental, e depende do conceito de *Outranking*.

A ideia de dominância dos métodos de *outranking* utiliza os pesos para dar mais influência a alguns critérios do que outros.

Diz-se que uma alternativa supera outra se a supera em número suficiente de critérios considerados de importância (conforme refletido pela soma do critério “peso”) e não é superado por outra opção no sentido de ter um desempenho significativamente inferior em qualquer um dos critérios.

Os principais métodos de *Outranking* assumem a disponibilidade de dados como input semelhante ao exigido para qualquer modelo de análise multicritério. Ou seja, estes exigem a existência de opções especificadas e a avaliação do seu desempenho para uma série de critérios e pesos que expressam a importância relativa dos critérios.

Tal como já referido, *Outranking* é um conceito desenvolvido por Bernard Roy e que pode ser definido da seguinte forma: A opção A supera a opção B se, pelo que é o entendimento por preferências pelo tomador (ou tomadores) de decisão, pela qualidade da avaliação das opções e o contexto do problema há argumentos suficientes para decidir que A é pelo menos tão bom quanto B, embora não haja nenhuma razão esmagadora para refutar essa declaração (Freudenberg, 2003).

Assim, o *outranking* é definido fundamentalmente ao nível da comparação de pares entre cada par de opções em consideração.

Com base nesta ideia geral, foram desenvolvidos uma série de procedimentos para operacionalizar este *outranking* como uma forma de apoiar a decisão multicritério. Normalmente, estes envolvem 2 etapas:

1. Primeiro, a especificação de que maneira uma alternativa supera outra;
2. Em segundo lugar, a determinação de como a avaliação da superação entre pares pode ser combinada para sugerir uma classificação geral de preferência entre as alternativas.

Os métodos outranking estabelecem assim uma relação de preferência de várias alternativas tendo em conta os seus desempenhos num grupo de critérios e com comparações entre cada duas alternativas. Dentro dos métodos de outranking alguns dos mais conhecidos são os métodos ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité) é uma família de metodologias multicritério que permite escolher a melhor alternativa de acordo com um conjunto de critérios através da construção de relações de outranking (Figueira et al., 2005). PROMETHEE é outro tipo de método de outranking muito conhecido. O conceito PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations) foi introduzido por Brans (1982) e consiste numa metodologia de análise multicritério que permite determinar uma ordem de preferência para um conjunto de alternativas que têm desempenhos diferentes em vários critérios.

Exemplos de aplicação de métodos *outranking* na área da sustentabilidade são Frini & Ben Amor (2019), Ezbakhe & Pérez-Foguet (2021), Talukder & Hipel (2018), entre outros.

3.2.3 Método MACBETH (Measuring Attractiveness By a Categorical Based Evaluation Technique)

O MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*) é uma abordagem multicritério de apoio à decisão que utiliza apenas julgamentos qualitativos para avaliar diferenças de atratividade com o objetivo de determinar pontuações para um conjunto de alternativas e também pesos para os vários critérios (i.e. pontos de vista fundamentais).

Os julgamentos do decisor são efetuados utilizando uma escala semântica de diferenças de atratividade entre dois estímulos, que pode ser considerada: “extrema”, “muito forte”, “forte”, “moderada”, “fraca”, “muito fraca” ou “nula”. No entanto, no caso de existir discordância ou hesitação por parte dos decisores, esta abordagem permite selecionar duas ou mais categorias consecutivas.

A abordagem MACBETH (Bana e Costa et al., 2011) adota o modelo de valor aditivo como referência, garantindo a coerência da ajuda fornecida no decorrer de um processo multicritério de construção de preferências ("globais") (Bana e Costa et al., 2003). É uma abordagem que usa julgamentos semânticos sobre as diferenças de atratividade para ajudar um decisor a quantificar a atratividade relativa entre cada opção (Bana e Costa & Vansnick, 1999).

Envolve inicialmente, de forma geral, uma forma de questionamento ao decisor que compara duas opções de cada vez. Uma das grandes vantagens desta abordagem é que, embora permita comparar opções tendo por base medições de desempenho quantitativas, permite obter pontuações efetuando apenas julgamentos qualitativos de diferenças de atratividade entre as opções, sendo esta uma grande vantagem para a escolha desta técnica de avaliação multicritério pela simplicidade que traz ao decisor. Para esta diferença qualitativa é utilizado um conjunto de sete categorias semânticas de diferenças de atratividade, que são:

- Nula;
- Diferença de atratividade **Muito fraca** – C1
- Diferença de atratividade **Fraca** – C2
- Diferença de atratividade **Moderada** – C3
- Diferença de atratividade **Forte** – C4
- Diferença de atratividade **Muito forte** – C5
- Diferença de atratividade **Extrema** – C6

A abordagem MACBETH propõe ao decisor certas hipóteses lógicas de trabalho na elaboração de juízos de diferença de atratividade entre opções (alternativas ou ações), que se traduzem na verificação de aspetos relacionados com a consistência dos juízos expressos (Bana e Costa & Vansnick, 1995).

As várias fases chave do processo multicritério de apoio à decisão suportado pelo MACBETH pode ser agrupado em três etapas principais:

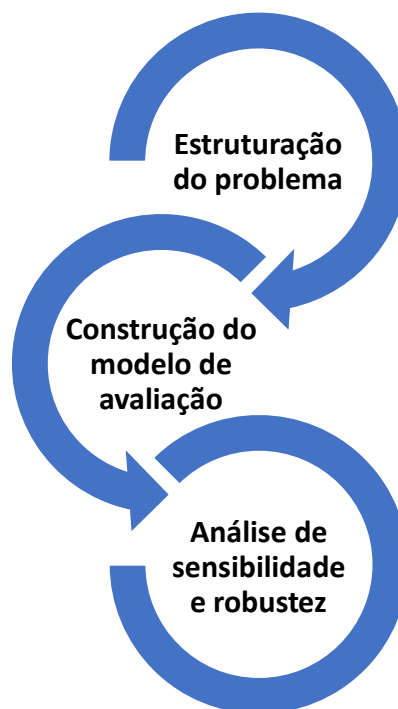


Figura 13 – Processo MACBETH de apoio à decisão

Na fase da **estruturação** do problema são definidos os decisores e intervenientes no processo da tomada de decisão, são estruturados os pontos de vista, identificados os critérios de avaliação e definidas as opções a comparar no modelo de avaliação.

A **construção do modelo de avaliação** passa por avaliar a atratividade de cada opção em cada critério e efetuar a ponderação dos vários critérios de acordo com o procedimento de ponderação MACBETH.

Por último, a **análise de sensibilidade e robustez** tem como objetivo explorar os resultados obtidos do modelo e analisar a sensibilidade e robustez dos resultados à luz de vários tipos de incertezas dos dados.

O MACBETH é uma ferramenta Humanística, Interativa e Construtiva (Bana e Costa et al., 2003):

- Humanística, no sentido que deve ser usada para ajudar os decisores a ponderar, comunicar e discutir os seus sistemas de valores e preferências;
- Interativa, porque o seu processo de reflexão e aprendizagem pode ser estendido através de uma facilitação social sustentada por protocolos simples de pergunta-resposta;
- Construtiva porque assenta na ideia de que nem os decisores nem cada membro de um grupo de decisão têm convicções fortes sobre o tipo de decisão a ser tomada, mas é possível fornecer-lhes ajuda para formar essas convicções e construir preferências robustas acerca das diferentes opções para resolver o problema.

Geralmente, o processo é iniciado com a comparação da opção mais atrativa e menos atrativa segundo um determinado critério de avaliação, seguida da comparação entre a segunda mais atrativa com a menos atrativa, e por aí em diante, até que seja completada, de cima para baixo, a última coluna da matriz de desempenho do critério em avaliação.

De seguida, é comparada a opção mais atrativa com as restantes (duas a duas), até completar a primeira linha, da direita para a esquerda, da matriz de desempenho.

Posteriormente, é comparada a segunda menos atrativa com a terceira menos atrativa, a terceira menos atrativa com a quarta menos atrativa, e por aí em diante até completar a borda diagonal da porção triangular superior da matriz.

Por último, são introduzidos e efetuados os restantes julgamentos entre opções até completar a matriz de desempenho.

Há medida que os julgamentos são efetuados o software M-MACBETH (BANA Consulting, 2017) verifica automaticamente a consistência dos julgamentos e, sempre que se verifiquem inconsistências, o software sugere modificações que permitem eliminar estas inconsistências (Bana e Costa et al., 2017).

O M-MACBETH cria depois uma escala numérica com base nos julgamentos efetuados, que deve ser analisada de modo a verificar se é uma representação adequada dos julgamentos efetuados pelo decisor ou equipa decisória.

Este processo é então repetido para avaliar todas as opções segundo todos os critérios de avaliação. No final deste processo é efetuado o procedimento de ponderação MACBETH com vista à ponderação dos critérios, isto é, são determinadas as constantes de escala de cada critério no sentido de refletir a importância de cada um no contexto decisório. O resultado dos julgamentos efetuados em todos os critérios, criação das escalas numéricas e ponderação dos critérios, culmina no cálculo da pontuação global de cada opção.

Esta pontuação global de cada opção, obtida para todas as opções, permite tomar uma decisão provisória, sendo que a opção com maior pontuação será a “melhor” escolha a tomar, se for esse o objetivo do problema de decisão.

Os resultados devem ser avaliados com base numa análise de sensibilidade e robustez, permitindo verificar como a mudança na ponderação dos critérios afeta os resultados obtidos e, se for pertinente, verificar de que forma a alteração dos pesos dos vários critérios altera a pontuação global das várias opções. Se fizer sentido para o decisor isso poderá levar a uma discussão sobre os pesos e reavaliação dos juízos efetuados de forma que as ponderações dos critérios reflitam efetivamente aquilo que são os juízos dos decisores naquele contexto de decisão..

Do ponto de vista matemático, a abordagem MACBETH adota o modelo aditivo de agregação de valor como referência, que garante uma ajuda no decorrer do processo de construção de preferências multicritério.

$$V(x) = \sum_{i=1}^n k_i v_i(x), \text{ com } \begin{cases} v_i(\text{bom}_i) = 100 \\ v_i(\text{neutro}_i) = 0 \end{cases}, \sum_{i=1}^n k_i = 1$$

Os parâmetros k_i ($i=1,2,\dots,n$) são **contantes de escala** usualmente denominados de “**pesos**”.

Os pesos permitem converter as pontuações parciais segundo cada critério, $v_i(x)$ em unidades de pontuação global.

Considerando que se tem um conjunto de opções X, o procedimento MACBETH passa por obter “informação cardinal” (em relação à atratividade dos elementos de X) para as opções x de X.

Pode-se dizer que temos “informação ordinal” (em relação à atratividade dos elementos de X) quando esses elementos são classificados de forma decrescente de atratividade (Bana e Costa et al., 2003).

Nesse caso, é possível associar a cada elemento de X um número $[v(x)]$ que satisfaz as condições de mensuração ordinal:

1. CM1: $\forall x, y \in X: [x \text{ é mais atrativo que } y \leftrightarrow v(x) > v(y)]$;
2. CM2: $\forall x, y \in X: [x \text{ é tão atrativo como } y \leftrightarrow v(x) = v(y)]$.

Uma escala numérica $v: X \rightarrow \mathfrak{R}: x \rightarrow v(x)$ que satisfaça as condições de mensuração ordinal é única até uma transformação estritamente crescente, o que significa que:

1. se v satisfaz as condições de mensuração ordinal (CM1 e CM2), então, para cada função estritamente crescente $\varphi: \mathfrak{R} \rightarrow \mathfrak{R}$, ($\varphi \circ v$) também satisfaz as condições de mensuração ordinal.
2. se v^* e v^{**} são duas funções $X \rightarrow \mathfrak{R}$ satisfazendo as condições de mensuração ordinal, então, existe uma função estritamente crescente $\varphi^*: \mathfrak{R} \rightarrow \mathfrak{R}$ de tal modo que $\varphi^* \circ v^* = v^{**}$.

Esta escala é uma escala ordinal.

É de referir que, se P é a relação binária definida em X por

$$[\forall x, y \in X: xPy \Leftrightarrow x \text{ é mais atrativo que } y],$$

então pode-se provar que P determina uma informação ordinal se e somente se:

- P for assimétrico e negativamente transitivo
- P é assimétrico e transitivo e I é transitivo,

onde I é a relação reflexiva binária definida em X por:

$$[\forall x, y \in X: xIy \Leftrightarrow xPy \text{ e } yPx].$$

Por outro lado, diz-se que se tem “informação cardinal” (a respeito da atratividade dos elementos de X) quando

1. se tem informação ordinal (em relação a esta atratividade)
2. $\forall (x, y), (z, w) \in P$, temos um número estritamente positivo que escreveremos $R((x, y) / (z, w))$ (“medindo” a razão das diferenças de atratividade entre x e y por um lado, e z e w por outro), esses números satisfazendo as seguintes condições:
 - a. $\forall (u, w), (w, x), (s, t) \in P: R((u, w) / (s, t)) + R((w, x) / (s, t)) = R((u, x) / (s, t))$
 - b. $\forall (u, w), (x, y), (s, t) \in P: R((u, w) / (s, t)) \times R((s, t) / (x, y)) = R((u, w) / (x, y))$.

Quando temos esta informação disponível, é possível associar um número $v(x)$ a cada elemento de X satisfazendo as seguintes condições de medição (condições de mensuração cardinal):

1. CM1: $\forall x, y \in X: [xPy \Leftrightarrow v(x) > v(y)]$
2. CM2: $\forall x, y \in X: [xIy \Leftrightarrow v(x) = v(y)]$
3. CM3: $\forall (x, y), (z, w) \in P: R((x, y) / (z, w)) = [v(x) - v(y)] / [v(z) - v(w)]$.

Uma escala numérica $v: X \rightarrow \mathfrak{R}: x \rightarrow v(x)$ satisfazendo as condições de mensuração cardinal é única até uma transformação polinomial positiva, o que significa que:

1. se v satisfaz CM1, CM2 e CM3, então, $\forall \alpha, \beta \in \mathfrak{R}$ com $\alpha > 0$, $\alpha.v + \beta$ também satisfaz CM1, CM2 e CM3

2. se v^* e v^{**} são duas funções $X \rightarrow \mathfrak{R}$ satisfazendo CM1, CM2 e CM3, então existem dois números reais, α^* e β^* com $\alpha^* > 0$, de modo que $\forall x \in X: v^{**}(x) = \alpha^* \cdot v^*(x) + \beta^*$.

Essa escala é chamada de escala de intervalo.

Uma forma de fornecer informação cardinal (sobre a atratividade dos elementos de um conjunto finito X) consiste em colocar os elementos de X num eixo vertical de modo que:

1. $\forall x, y \in X: xPy \Leftrightarrow x$ está posicionado acima de y no eixo vertical.
2. $\forall (x, y), (z, w) \in P, R((x, y) / (z, w)) = d(x, y) / d(z, w)$, onde $\forall s, t \in X, d(s, t)$ é a medição, numa determinada unidade, da distância que separa os elementos s e t no eixo vertical.

A transição de informação ordinal para informação cardinal constitui um salto considerável em termos de riqueza de informação. Quando se tem informação ordinal sobre a atratividade dos elementos de um conjunto finito X , a passagem para informação cardinal revela a origem da noção de força de preferência, que é designada no MACBETH por “diferença de atratividade”, para evitar qualquer confusão outras abordagens que utilizam outro tipo de informação cardinal preferencial, como por exemplo *ratio judgements*.

Para mais informações sobre o método MACBETH e o software M-MACBETH, que pode ser usado para implementar o método MACBETH, consultar Bana e Costa et al. (2011) e BANA Consulting (2017).

O capítulo 4 apresenta o problema de avaliação das principais matérias-primas em Portugal utilizando para tal o método MACBETH.

4º Capítulo

4.1 *Avaliação de matérias-primas críticas para Portugal*

O problema que se pretende explorar consiste na avaliação das principais matérias-primas críticas para Portugal. De forma a proceder à avaliação das matérias-primas críticas a primeira etapa consiste na estruturação. Uma vez definido o problema, a atividade de apoio à decisão centra-se na estruturação dos pontos de vista segundo os quais se pretende analisar os impactos e a atratividade das várias alternativas em avaliação. Os objetivos dos atores e as características das alternativas têm papéis diferentes, mas complementares, no processo de estruturação de um modelo multicritério (Bana e Costa & Beinat, 2010).

A partir da estruturação do problema cria-se um modelo representativo do problema em causa. Numa primeira fase o objetivo consistiu assim em identificar os pontos de vista fundamentais (i.e. critérios de avaliação) sobre os quais a avaliação das matérias-primas críticas (i.e. que neste contexto constituem as alternativas) seriam avaliadas. De modo a poder efetuar a avaliação das principais matérias-primas e hierarquizar as 3 matérias-primas críticas para Portugal foi necessário definir critérios de avaliação e a metodologia de quantificação das várias alternativas em estudo.

A tomada de decisão ou escolha de alternativas entre um leque vasto destas pode ser uma tarefa árdua. Vários fatores contribuem para a complexidade da tomada de decisão, podem existir múltiplos objetivos, fatores intangíveis, risco e incerteza, entre outros, que dificultam o processo de tomada de decisão.

Esta etapa de estruturação é fundamental para que a tomada de decisão seja robusta, sendo que é imperativo criar uma estrutura de diálogo entre os vários atores intervenientes no processo de construção do modelo de avaliação de modo a obter o máximo de informação possível sobre o problema em causa, as alternativas consideradas e os pontos de vista fundamentais a considerar no problema de tomada de decisão.

Este diálogo entre os intervenientes do processo é fundamental também para modificar e/ou validar julgamentos efetuados no decorrer do processo de construção do modelo multicritério de avaliação das matérias-primas críticas em Portugal. De forma a consolidar a estruturação do problema, o autor deste trabalho teve o apoio de uma equipa multidisciplinar do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), que prestou um forte contributo força da sua especialização em economia circular e recursos geológicos.

Na fase de estruturação o contributo dos vários especialistas foi fundamental e decorreu através de um conjunto de reuniões e sessões realizadas com o intuito de obter informação para auxiliar na estruturação do problema e posterior avaliação. O processo de tomada de decisão com recurso ao software MACBETH foi efetuado através de trocas de emails e reuniões com o objetivo de validar a informação obtida e os julgamentos entre as alternativas para cada um dos critérios.

Toda a informação recolhida durante as reuniões foi devidamente registada, explorada e tratada. Numa fase inicial definiram-se as matérias-primas consideradas críticas de forma a proceder à sua avaliação segundo o conjunto de critérios de avaliação que serão utilizados para a sua avaliação,

A abordagem MACBETH designa por opção (i.e alternativa) de avaliação qualquer ação potencial ou alternativa de decisão. Portanto, uma boa tomada de decisão requer que se comece por identificar as alternativas que serão objeto de avaliação , e identificar os quais os pontos de vista com interesse (critérios de avaliação) para a avaliação, (Bana e Costa et al., 2017).

De forma a avaliar as alternativas selecionou-se como ponto de partida a lista das 30 matérias-primas críticas da UE [COM(2020) 474 final]. Numa primeira fase, foram definidos os critérios para posterior primeira triagem grosseira daquelas que são as MPC avaliadas no modelo.

4.2 *Identificação dos pontos de vista fundamentais*

O processo de análise multicritério requer a identificação dos pontos de vista fundamentais a considerar para o problema em análise.

Os pontos de vista fundamentais constituem os critérios de avaliação com interesse num determinado contexto específico.

Neste caso particular, cujo objetivo consiste em fazer uma avaliação das principais matérias-primas críticas no contexto nacional, estes critérios de avaliação têm de ser identificados e definidos de uma forma mais ou menos abrangente. A estruturação dos vários pontos de vista identificados é feita na forma de árvore, o que permite a visualização de uma forma organizada dos vários critérios em análise. Cada critério de avaliação/ponto de vista fundamental é utilizado posteriormente para possibilitar a avaliação do desempenho das várias alternativas, definidas no ponto 4.3.

Para a identificação e definição dos critérios/pontos de vista fundamentais, foram consideradas as várias etapas do ciclo de vida das MPC e dos produtos que contém essas mesmas matérias-primas. O principal objetivo desta abordagem foi incluir um conjunto de critérios de avaliação que permitam avaliar toda a cadeia de valor das MPC e/ou dos produtos em que são utilizadas.

Um ponto fulcral é que os critérios devem ser desdobrados a um nível de especificidade que permita avaliar o desempenho das várias matérias-primas críticas em cada um dos critérios definidos. A identificação e definição dos critérios constitui uma etapa chave de todo o processo e da própria construção do modelo de avaliação uma vez que estes compõem o modelo de análise multicritério que vai ser usado para a avaliação das matérias-primas críticas. A identificação e definição dos critérios de avaliação resultaram da pesquisa bibliográfica efetuada no capítulo 2, relacionada com a temática da sustentabilidade e do desenvolvimento sustentável. De forma a sustentar a seleção dos pontos de vista considerados fundamentais para o problema de avaliação das matérias-primas críticas, as implicações dos critérios de avaliação selecionados foram alvo de análise e discussão com uma equipa de especialistas do LNEG em economia circular

Os critérios definidos apresentam-se no **Quadro 20**, bem como o objetivo/finalidade dos mesmos.

Quadro 20 – Critérios/Pontos de vista fundamentais

Ponto de vista fundamental	Objetivo/Finalidade
Potencial extrativo em Portugal	Determinar, de entre as opções, quais apresentam maior potencial de extração pelas reservas/recursos estimados e/ou medidos em Portugal.
Importação de MPC para Portugal	Verificar que MPC são importadas em maior quantidade para Portugal e deste modo determinar, de entre as opções, as MPC de que Portugal mais depende para a sua estabilidade económica.
Exportação de MPC de Portugal para outros países	Verificar que MPC são exportadas em maior quantidade de Portugal para outros países, sendo também uma fonte económica importante e uma forma indireta de avaliar a dependência nacional de MPC.
Relevância Económica da MPC	A relevância económica da MPC indica a possível consequência no caso de fornecimento inadequado de uma determinada MPC. É um dos critérios para a definição da lista de MPC da UE.
Impacte ambiental da extração	Este critério tem como principal objetivo comparar as várias opções em termos dos impactes ambientais associados à sua extração e produção até à saída da fábrica (<i>cradle-to-gate</i>), onde serão posteriormente incorporados em produtos. O motivo para a restrição desta avaliação até à incorporação das MPC nos produtos prende-se com o facto de que uma mesma MPC pode ser incorporada em produtos distintos que têm impactes ambientais ao longo do seu ciclo de vida que podem ser bastante distintos (p.ex impacte ambiental de um painel solar vs de uma bateria).
Dependência da MPC	A dependência da MPC, neste âmbito, permitirá comparar entre as opções a avaliar aquelas que apresentam a nível global uma maior dependência, sendo este um dos critérios utilizados para definir a lista de MPC da UE.
Produção de MPC em Portugal	Determinar que MPC são produzidas em maior quantidade em Portugal.

Ponto de vista fundamental	Objetivo/Finalidade
Impacte/relevância da MPC nos setores de importância para a neutralidade carbónica e o combate às AC	Avaliar o potencial/relevância das MPC para atingir uma economia de baixo carbono.
MPC em utilização/stock em Portugal	Avaliar, de entre as MPC, aquelas que são utilizadas em maior quantidade em produtos utilizados em Portugal.
Quantidade MPC a sair de stock (exportação e/ou geradas como resíduos)	Comparar as MPC críticas em termos de exportação após primeira utilização e geradas como resíduo, isto é, a sair de em utilização/stock.
Potencial de Pós-utilização	Avaliar e comparar as MPC em termos de potencial de utilização após recolha dos produtos que as contém, através de técnicas de valorização e considerando as estratégias de circularidade atualmente implementadas e/ou previstas.

Na fase de estruturação do problema é fulcral a visualização dos pontos de vista fundamentais para o problema em análise. Os nós que se encontram abaixo do nó raiz (i.e. Avaliação e seleção das matérias-primas críticas para Portugal) correspondem aos pontos de vista que selecionados para a avaliação.

Apresenta-se na **Figura 14** a árvore de valores construída no software M-MACBETH, com bases nos critérios definidos.

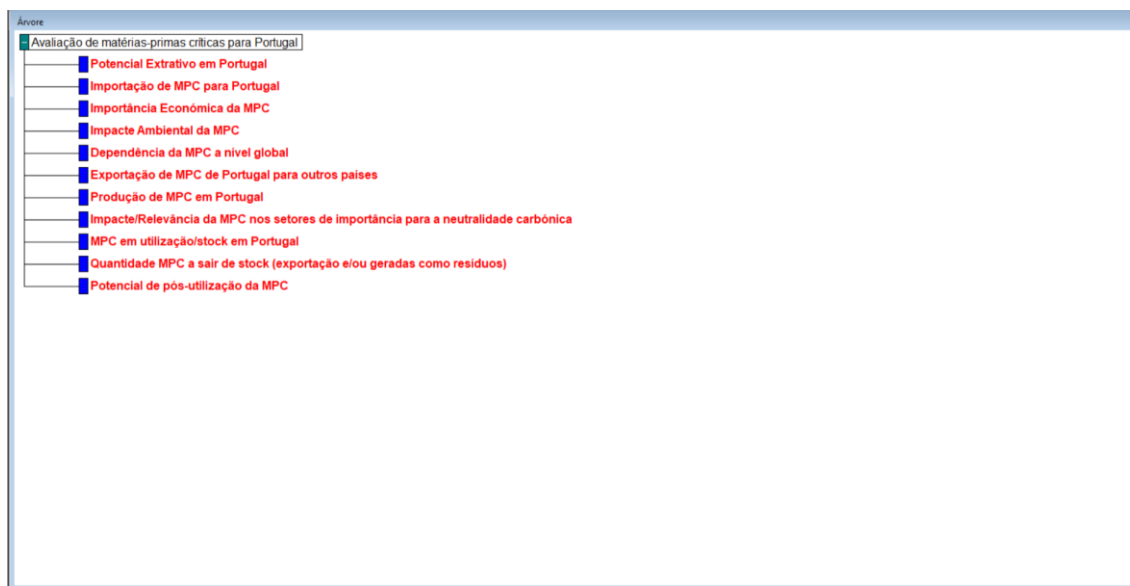


Figura 14 - Árvore de pontos de vista fundamentais construída no software M-MACBETH

4.3 Definição das alternativas a avaliar

Para a definição das alternativas a avaliar, efetuou-se uma triagem à lista de 30 MPC da EU [COM(2020) 474 final], no sentido de identificar e separar as *vital few* das *tivial many*.

Para tal, considerou-se a análise efetuada no ponto 2.4.2, nomeadamente a utilização das MPC em setores considerados de elevada relevância para o setor nacional (Equipamentos Elétricos e Eletrónicos (EEE), Baterias, Setor automóvel, Energias renováveis), os dados recolhidos no ponto 2.4.3, bem como os critérios (i.e pontos de vista fundamentais) definidos na secção anterior.

Desta triagem resultou a identificação das seguintes alternativas a avaliar:

1. Antimónio (Sb);
2. Lítio (Li);
3. Tungsténio (W);
4. Grafite Natural (Gn);
5. Estrôncio (Sr);
6. Neodímio (Nd);
7. Cobalto (Co);
8. Disprósio (Dy);
9. Titânio (Ti);
10. Nióbio (Nb).

Estas constituem um sub conjunto de MPC, da lista de 30 MPC da UE, para as quais existe potencial extrativo e/ou produção em Portugal, existe quantidade significativa em utilização e a entrar e/ou a sair de stock, como é caso do antimónio, lítio, tungsténio, nióbio e titânio. Para o tântalo, embora existam reservas e/ou recursos, importação e exportação, os valores colocados no mercado, em stock e a sair de stock são bastante inferiores aos das restantes MPC referidas o que significa que esta alternativa seria sempre uma alternativa dominada por qualquer das restantes alternativas no conjunto de critérios avaliados.

Para além deste fator, considerou-se um conjunto de MPC que apresentam projeções de aumento em termos de procura, bem como a sua utilização em setores que permitem a adaptação e/ou mitigação das alterações climáticas, como é exemplo a grafite natural, o lítio, disprósio, neodímio, cobalto.

De acordo com a IEA (2019), prevê-se um aumento da capacidade global de energias renováveis em 50% (1220 GW) até 2024, em relação aos 2502 GW em 2018. Esta previsão indica um forte crescimento do setor das energias renováveis num curto espaço de tempo.

Ainda de acordo com a IEA (2019), para a capacidade de energias renováveis na Europa prevê-se um aumento de 1/3 (209 GW) entre 2019-2024, liderado pela Alemanha, Espanha, França, Holanda e Turquia. O solar fotovoltaico é a tecnologia para a qual se prevê um maior crescimento, seguido da eólica *onshore*, eólica *offshore*, hídrica e bioenergia.

É ainda de salientar que muitas das MPC em avaliação são também utilizadas noutros setores de atividade, como é exemplo o cobalto, praseodímio e o neodímio no setor dos químicos e fertilizantes.

Assim, considerou-se que estas MPC são uma boa base de avaliação para a definição das 3 MPC para Portugal. Inseriu-se assim as alternativas a avaliar no software M-MACBETH, que se apresenta na **Figura 15**.

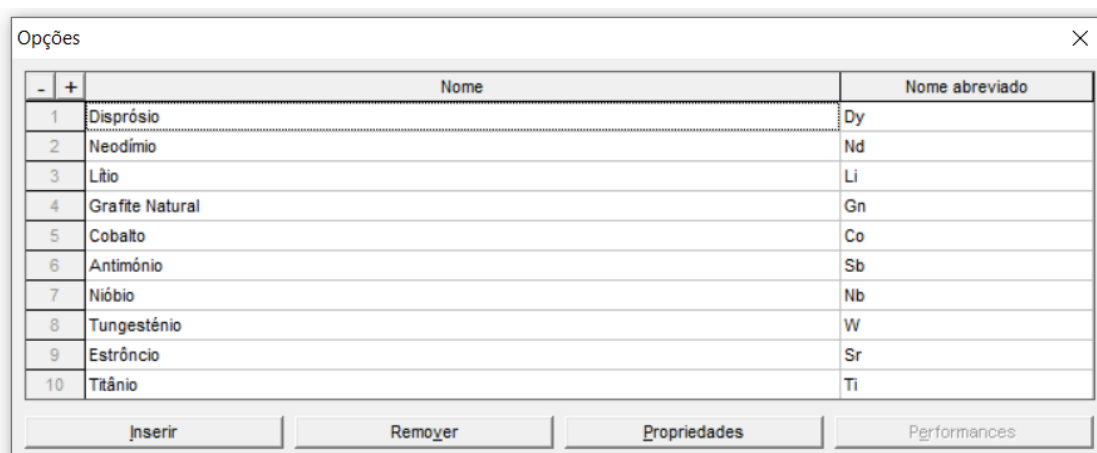


Figura 15 – Definição das alternativas em avaliação no software M-MACBETH

4.4 Avaliação das alternativas segundo cada critério

Para cada critério (i.e ponto de vista fundamental) incluído no modelo de avaliação, o software M-MACBETH permite a atribuição de uma pontuação numérica para cada alternativa em avaliação, refletindo a atratividade que essa alternativa terá segundo cada critério de avaliação. As várias alternativas (i.e. matérias-primas críticas) podem ser pontuadas de duas formas: ou através da comparação direta de opções ou por comparação indireta, na qual são usadas funções de valor que convertem o desempenho de qualquer alternativa no critério de avaliação numa pontuação numérica. As funções de valor são construídas comparando os níveis de desempenho pré-definidos para cada critério de avaliação, dois de cada vez, e isso isto pode ser feito, quer os desempenhos das várias alternativas sejam descritos de uma forma qualitativa ou quantitativa.

O software M- MACBETH permite assim a comparação das alternativas/opções segundo quatro bases de comparação:

1. As opções;
2. As opções + 2 referências;
3. Níveis qualitativos de desempenho;
4. Níveis quantitativos de desempenho.

Face ao tipo e teor de informação disponível e face à simplicidade de utilização foi decidido efetuar a comparação das próprias matérias-primas críticas que constituem as alternativas em jogo utilizando para tal uma base direta de comparação (“As opções”). As matérias-primas foram assim diretamente comparadas critério a critério, efetuando-se julgamentos de atratividade com base em informação qualitativa e/ou quantitativa recolhida sobre o desempenho das várias alternativas.

4.4.1 Potencial extrativo em Portugal

O critério “Potencial extrativo em Portugal” está diretamente relacionado com os recursos e reservas estimadas e/ou medidas em Portugal.

A fonte de informação para a avaliação do desempenho de cada matéria-prima foi o *Minerals4EU project* (Minerals4EU project).

No

Quadro 21 apresenta-se, para cada alternativa em avaliação, o seu desempenho no que toca às reservas e/ou recursos estimados e/ou medidos.

Quadro 21 –Desempenho de cada alternativa em avaliação segundo o critério “Potencial extrativo em Portugal”(adaptado de EU-MKDP)

Alternativa (i.e MPC)	Desempenho das MPC nos Recursos e/ou reservas estimadas e/ou medidas da MPC em Portugal
Tungsténio	De acordo com o <i>Minerals4EU project</i> existem recursos de tungsténio em Portugal - <i>Historic Resource Estimates</i> - 68.728 Million Tonnes
Estrôncio	De acordo com o <i>Minerals4EU project</i> não existem recursos ou reservas de estrôncio em Portugal
Disprósio	De acordo com o <i>Minerals4EU project</i> existem recursos de Elementos das Terras Raras em Portugal - <i>Historic Resource Estimates</i> - 2.4 Million Tonnes. No entanto, não existem referências ou dados disponíveis sobre recursos de disprósio em Portugal
Neodímio	De acordo com o <i>Minerals4EU project</i> existem recursos de Elementos das Terras Raras em Portugal - <i>Historic Resource Estimates</i> - 2.4 Million Tonnes. No entanto, não existem referências ou dados disponíveis sobre recursos de neodímio em Portugal

Alternativa (i.e MPC)	Desempenho das MPC nos Recursos e/ou reservas estimadas e/ou medidas da MPC em Portugal
Grafite Natural	De acordo com o <i>Minerals4EU project</i> não existem recursos ou reservas de Grafite Natural em Portugal
Cobalto	De acordo com o <i>Minerals4EU project</i> não existem recursos ou reservas de cobalto em Portugal
Antimónio	De acordo com o <i>Minerals4EU project</i> não existem recursos ou reservas de antimónio em Portugal
Titânio	De acordo com o <i>Minerals4EU project</i> existem recursos de titânio em Portugal - <i>Historic Resource Estimates</i> - 690000 m ³ . A densidade do Titânio é de aproximadamente 4500 kg/m ³ , ou seja, 3,105 milhões de toneladas
Lítio	De acordo com o <i>Minerals4EU project</i> existem recursos de lítio em Portugal - <i>Historic Resource Estimates</i> - 9.3 Million Tonnes
Nióbio	De acordo com o <i>Minerals4EU project</i> existem recursos de Nióbio em Portugal - <i>Historic Resource Estimates</i> – 8.0 Million Tonnes

Assim, em termos de maior quantidade de recursos,tem-se:

1. Tungsténio (W): 68.728 milhões de toneladas
2. Lítio (Li): 9.3 milhões de toneladas
3. Nióbio (Nb): 8 milhões de toneladas
4. Titânio (Ti): 3.105 milhões de toneladas

A comparação direta das várias matérias-primas críticas segundo o critério potencial extrativo em Portugal efetuou-se comparando as várias matérias-primas duas a duas. Para tal utilizou-se a matriz de julgamentos do software M-MACBETH. Após comparação duas a duas segundo a escala semântica MACBETH e após todos os juízos introduzidos no software as pontuações das várias opções foram geradas.

Na **Figura 16** apresenta-se a matriz no software M-MACBETH com as pontuações de todas as matérias-primas segundo o critério Potencial extrativo em Portugal.

Esta abordagem seguiu-se para a avaliação das alternativas para os restantes critérios.

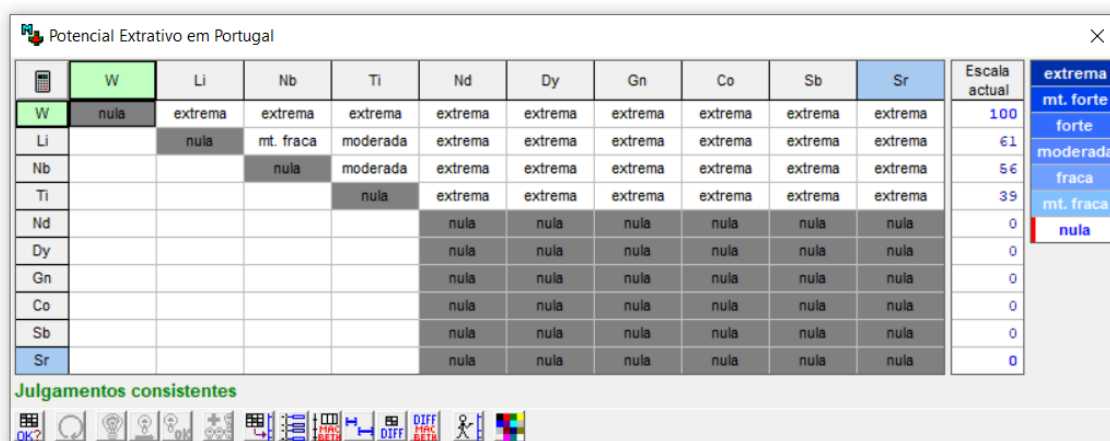


Figura 16 – Matriz de julgamentos do critério “Potencial Extrativo em Portugal” no software M-MACBETH

Obteve-se assim um valor de 100 para o tungsténio, 61 para o lítio, 56 para o nióbio e 39 para o titânio. Assim, na perspetiva do potencial extrativo em Portugal, apenas estas terão potencial com base nos pressupostos que foram tidos em consideração.

4.4.2 Importação de MPC para Portugal

O critério “Importação de MPC para Portugal” tem como principal objetivo avaliar, de entre as opções/MPC em avaliação, quais representam a maior quota de importação para Portugal e, assim, fornecer indiretamente informação sobre a dependência destas para a economia portuguesa.

No

Quadro 22 apresenta-se, para cada alternativa em avaliação, a quantidade importada no último ano disponível (2018) de acordo com o projeto Minerals4EU.

Quadro 22 – Desempenho de cada alternativa em avaliação para o critério “Importação de MPC para Portugal” (adaptado de EU-MKDP)

Alternativa (i.e MPC)	Importação da MPC para Portugal
Tungsténio	90 toneladas de minérios e concentrados de tungsténio, 114 toneladas de carvão de tungsténio e 70 toneladas de tungsténio (metal) em 2018
Estrôncio	De acordo com o projeto Minerals4EU, Portugal não importou qualquer quantidade de estrôncio em 2018
Disprósio	De acordo com o projeto Minerals4EU, Portugal não importou qualquer quantidade de disprósio em 2018
Neodímio	De acordo com o projeto Minerals4EU, Portugal não importou qualquer quantidade de neodímio em 2018
Grafite Natural	De acordo com o projeto Minerals4EU, Portugal não importou qualquer quantidade de grafite natural em 2018
Cobalto	De acordo com o projeto Minerals4EU, Portugal não importou qualquer quantidade de Cobalto em 2018
Antimónio	De acordo com o projeto Minerals4EU, Portugal importou 392 toneladas de óxidos de antimónio em 2018
Titânio	De acordo com o projeto Minerals4EU, Portugal importou 137 toneladas de metal de titânio, 325 toneladas de minerais de titânio e 25384 toneladas de óxidos de titânio em 2018
Lítio	De acordo com o projeto Minerals4EU, Portugal não importou lítio em 2018
Nióbio	De acordo com o projeto Minerals4EU, Portugal não importou qualquer quantidade de nióbio em 2018

Assim, a ordenação das opções, da maior quantidade importada para a menor, é:

1. Titânio (Ti): 25846 toneladas
2. Antimónio (Sb): 392 toneladas
3. Tungsténio (W): 274 toneladas

Face à diferença extrema dos valores de importação de titânio em comparação com as restantes MPC, foi considerada uma diferença de atratividade extrema entre o titânio e as restantes MPC em avaliação.

Ao preencher a matriz de julgamentos no software M-MACBETH obteve-se a matriz preenchida (vide **Figura 17**) para o **Importação da MPC para Portugal** e as pontuações para cada MPC segundo esse critério em avaliação.

	Ti	Sb	W	Dy	Nd	Li	Gn	Co	Nb	Sr	Escala actual	
Ti	nula	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	100	extrema
Sb		nula	fraca	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	57	mt. forte
W			nula	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	43	forte
Dy				nula	nula	nula	nula	nula	nula	nula	0	moderada
Nd					nula	nula	nula	nula	nula	nula	0	fraca
Li						nula	nula	nula	nula	nula	0	mt. fraca
Gn							nula	nula	nula	nula	0	nula
Co								nula	nula	nula	0	
Nb									nula	nula	0	
Sr										nula	0	

Figura 17 – Matriz de julgamentos do critério “Importação de MPC para Portugal” no software M-MACBETH

Obteve-se deste modo uma pontuação de 100 para o titânio, 57 para o antimónio e 43 para o tungsténio, sendo assim estas as únicas com potencial no que respeita ao critério “Importação de MPC para Portugal).

4.4.3 Importância Económica da MPC

Para este critério foram utilizados os valores obtidos para a importância económica da avaliação de criticidade de 2020 (European Commission, 2020) para cada uma das MPC em avaliação:

- Tungsténio (W): 8.1
- Disprósio (Dy): 7.2
- Nióbio (Nb): 6.0
- Cobalto (Co): 5.9
- Neodímio (Nd): 4.8
- Antimónio (Sb): 4.8
- Titânio (Ti): 4.7
- Estrôncio (Sr): 3.5
- Grafite Natural (Gn): 3.2
- Lítio (Li): 3.1

Assim, efetuaram-se as comparações emparelhadas das MPC segundo o critério em avaliação no M-MACBETH considerando as diferenças de atratividade, obtendo-se a matriz apresentada na **Figura 18**.

	W	Dy	Nb	Co	Nd	Sb	Ti	Sr	Li	Gn	Escala actual	
W	nula	moderada	forte	mt. forte	mt. forte	mt. forte	mt. forte	extrema	extrema	extrema	100	extrema
Dy		nula	fraca	moderada	moderada	moderada	moderada	forte	forte	forte	63	forte
Nb			nula	mt. fraca	fraca	fraca	fraca	moderada	moderada	moderada	37	moderada
Co				nula	fraca	fraca	fraca	moderada	moderada	moderada	33	fraca
Nd					nula	nula	mt. fraca	fraca	fraca	fraca	19	mt. fraca
Sb						nula	nula	mt. fraca	fraca	fraca	19	nula
Ti							nula	mt. fraca	mt. fraca	mt. fraca	11	
Sr								nula	mt. fraca	mt. fraca	4	
Li									nula	nula	0	
Gn										nula	0	

Figura 18 – Matriz de julgamentos do critério “Importância Económica da MPC” no software MACBETH

4.4.4 Impacte ambiental da extração

Para a o critério “Impacte ambiental da extração”, utilizou-se como referência um artigo que efetua uma síntese da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de 64 metais (Nuss & Eckelman, 2014), de acordo com a avaliação *cradle-to-gate*, isto é, desde a extração do recurso até à porta da empresa (antes da distribuição para os consumidores). A Figura 2 deste artigo apresenta a tabela periódica do Potencial de Aquecimento Global (PAG) dos 64 metais avaliados em termos de kg CO₂eq/kg.

Para além deste indicador, apresenta-se em Nuss & Eckelman (2014) um conjunto de outras categorias de impacte ambiental típicas da realização de uma ACV, nomeadamente:

- Acidificação terrestre;
- Eutrofização de água doce;
- Toxicidade humana, e
- Necessidades cumulativas de energia.

Para a grafite natural, poucos estudos existem que permitam uma perceção clara das emissões de CO₂ para as fronteiras *cradle-to-gate*. Em Robinson et al. (2017), é referido que a grafite natural tem uma pegada de carbono substancialmente menor considerando tanto as emissões de CO₂ como consumo de energia durante a extração de minério e processamento, quando comparado com outras *commodities* minerais, como por exemplo o alumínio ou o cobre.

Considerando que o estudo de Avaliação de Ciclo de Vida de 64 metais (Nuss & Eckelman, 2014), referido acima, o alumínio apresenta um PAG de 8.2 kg CO₂-eq/kg e o Cobre de 2.8 kg CO₂-eq/kg.

Tendo a grafite natural uma pegada de carbono menor que estes metais, considera-se que esta MPC apresenta o menor impacte ambiental das MPC em avaliação, seguindo-se do estrôncio (*vide*

Quadro 23).

Considerando o foco deste trabalho e a ligação já referida entre a aplicação de estratégias de circularidade para o combate às AC, será efetuada a comparação entre opções com base nos valores de PAG.

Entende-se por uma maior atratividade entre opções a que apresenta um maior impacte ambiental, uma vez que as MPC em avaliação com maior impacte ambiental consideram-se aquelas em que a adoção de estratégias de EC é mais urgente.

Quadro 23 – Potencial de aquecimento global para cada alternativa avaliada (Nuss P, Eckelman MJ 2014)

Alternativa (i.e MPC)	Potencial de Aquecimento Global (kg CO ₂ eq/kg)
Disprósio (Dy)	59,6

Alternativa (i.e MPC)	Potencial de Aquecimento Global (kg CO _{2eq} /kg)
Neodímio (Nd)	17,6
Antimónio (Sb)	12,9
Tungsténio (W)	12,6
Nióbio (Nb)	12,5
Cobalto (Co)	8,3
Titânio (Ti)	8,1
Lítio (Li)	7,1
Estrôncio (Sr)	3,2
Grafite Natural (Gn)	-

Como se pode verificar, o disprósio apresenta um impacte ambiental substancialmente maior, em termos de PAG, que as restantes opções em estudo.

Assim, efetuou-se a avaliação das MPC segundo este critério recorrendo ao software M-MACBETH considerando as diferenças de atratividade das opções segundo o critério em avaliação e obteve-se a matriz apresentada na **Figura 19**, de onde se verifica uma diferença bastante significativa do disprósio para as restantes alternativas em avaliação.

	Dy	Nd	Sb	W	Nb	Co	Ti	Li	Sr	Gn	Escala actual	
Dy	nula	mt. forte	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	100	extrema
Nd		nula	moderada	forte	forte	mt. forte	mt. forte	extrema	extrema	extrema	64	forte
Sb			nula	mt. fraca	mt. fraca	moderada	moderada	moderada	forte	extrema	40	moderada
W				nula	nula	fraca	fraca	moderada	forte	forte	35	fraca
Nb					nula	nula	fraca	moderada	forte	forte	35	mt. fraca
Co						nula	mt. fraca	fraca	moderada	forte	27	nula
Ti							nula	fraca	moderada	forte	25	
Li								nula	moderada	moderada	18	
Sr									nula	fraca	7	
Gn										nula	0	

Julgamentos consistentes

Figura 19 – Matriz de julgamentos do critério “Impacte ambiental da MPC” no software MACBETH com consistências

4.4.5 Dependência da MPC a nível global

A base de informação para este critério é, à semelhança do critério “Importância Económica”, a avaliação de criticidade de 2020 (European Commission, 2020) para cada uma das alternativas em avaliação:

- Disprósio (Dy): 6.2
- Neodímio (Nd): 6.1
- Nióbio (Nb): 3.9
- Estrôncio (Sr): 2.6
- Cobalto (Co): 2.5

- Grafite Natural (Gn): 2.3
- Antimónio (Sb): 2.0
- Tungsténio (W): 1.6
- Lítio (Li): 1.6
- Titânio (Ti): 1.3

Assim, e após construção da matriz de juízos de avaliação no M-MACBETH considerando as diferenças de atratividade das MPC segundo o critério de avaliação, obteve-se a matriz apresentada na **Figura 20**.

	Dy	Nd	Nb	Sr	Co	Gn	Sb	W	Li	Ti	Escala actual	
Dy	nula	mt. fraca	moderada	forte	forte	forte	mt. forte	extrema	extrema	extrema	100.00	extrema
Nd		nula	moderada	forte	forte	forte	mt. forte	extrema	extrema	extrema	97.30	mt. forte
Nb			nula	fraca	fraca	moderada	moderada	forte	forte	mt. forte	67.57	forte
Sr				nula	mt. fraca	fraca	fraca	moderada	moderada	forte	51.35	moderada
Co					nula	mt. fraca	mt. fraca	fraca	fraca	moderada	40.54	fraca
Gn						nula	mt. fraca	fraca	fraca	moderada	35.14	mt. fraca
Sb							nula	mt. fraca	mt. fraca	fraca	27.03	nula
W								nula	nula	mt. fraca	13.51	
Li								nula	nula	mt. fraca	13.51	
Ti										nula	0.00	

Figura 20 – Matriz do critério “Dependência da MPC a nível global” no software MACBETH

4.4.6 Exportação de MPC de Portugal para outros países

O critério “Exportação de MPC de Portugal para outros países” tem como principal objetivo avaliar, entre as opções/MPC em avaliação, quais representam a maior quota de exportação de Portugal para outros países, e assim fornecer indiretamente informação sobre a dependência destas para a Economia portuguesa.

De acordo com o projeto a EU-MKDP), Portugal exportou, das alternativas em avaliação:

- 90 toneladas de antimónio em 2018;
- 6445 toneladas de tungsténio (metal e minérios e concentrados de tungsténio) em 2018.

Assim, e após construção da matriz no software M-MACBETH, considerando as diferenças de atratividade das várias MPC segundo o critério em avaliação, foi possível obter a matriz que se apresenta na **Figura 21**.

	W	Sb	Dy	Nd	Li	Gn	Co	Nb	Sr	Ti	Escala actual	
W	nula	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	100	extrema
Sb		nula	forte	forte	forte	forte	forte	forte	forte	forte	40	mt. forte
Dy			nula	nula	nula	nula	nula	nula	nula	nula	0	forte
Nd				nula	nula	nula	nula	nula	nula	nula	0	moderada
Li					nula	nula	nula	nula	nula	nula	0	fraca
Gn						nula	nula	nula	nula	nula	0	mt. fraca
Co							nula	nula	nula	nula	0	nula
Nb								nula	nula	nula	0	
Sr									nula	nula	0	
Ti										nula	0	

Figura 21 – Matriz do critério “Exportação de MPC para outros países” no software MACBETH

O tungsténio (W) apresenta, para o presente critério, uma pontuação de 100, o antimónio (Sb) de 40 e as restantes alternativas de zero.

4.4.7 Produção de MPC em Portugal

A fonte de informação para a produção de MP em Portugal foi o *World Mining Data (n.d.)*. De acordo com esta base de dados, pode-se verificar que Portugal apenas produziu, das MPC em avaliação, em 2019, 710 toneladas de lítio e 518 toneladas de tungsténio.

O software M-MACBETH foi usado para a construção da matriz de julgamentos para o critério “Produção de MPC em Portugal” e as diferenças de atratividade para as várias alternativas segundo o critério em avaliação conduzirão às pontuações que se apresentam na **Figura 22**.

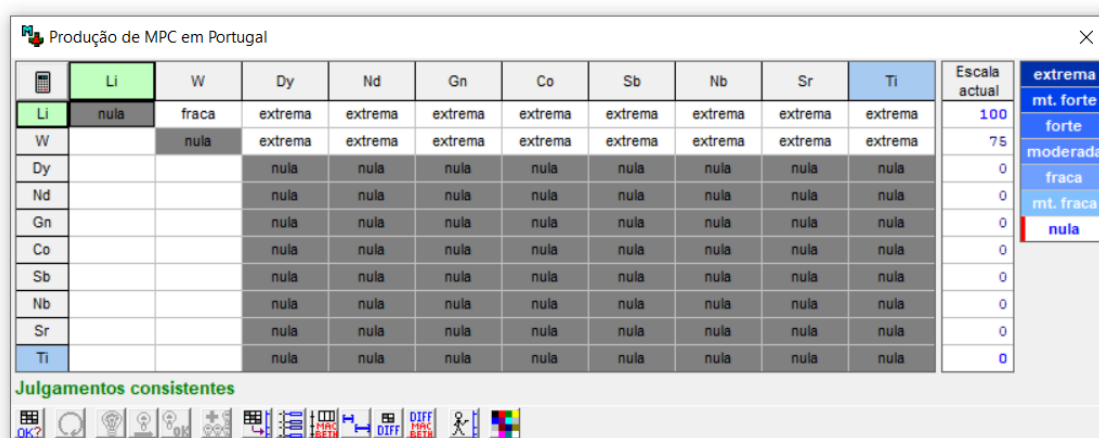


Figura 22 – Matriz do critério “Produção de MPC em Portugal” no software MACBETH

Deste modo, o lítio (Li) apresenta uma pontuação de 100, o tungsténio (W) de 75 e as restantes alternativas de zero.

4.4.8 Impacte/relevância da MPC nos setores de importância para a neutralidade carbónica e o combate às AC

Algumas das MPC da lista de MPC da UE são consideradas de grande importância/relevância para tecnologias de baixo carbono, tanto pela sua dependência para esses setores como pelo expectável crescimento da sua procura.

A **Figura 10** apresenta a procura atual (2012) e estimada (2030) de matérias-primas usadas para tecnologias de energia de baixo carbono selecionadas (*Wind, Solar PV e Biofuel*).

No **Quadro 24** apresentam-se os valores percentuais de aumento projetados para 2030 das MPC em avaliação de acordo com os dados da **Figura 10**.

Quadro 24 – Projeções de procura estimada em 2030 de MPC em avaliação de acordo com a Figura 10

Alternativa (i.e MPC)	Projeções de procura em 2030 (% de aumento) por ordem crescente
Cobalto	+34900

Alternativa (i.e MPC)	Projeções de procura em 2030 (% de aumento) por ordem crescente
Neodímio	+2193
Disprósio	+664

Já para o setor da mobilidade elétrica (setor automóvel e das baterias), das MPC em avaliação destacam-se o cobalto, a grafite natural, o nióbio, o praseodímio e o disprósio.

No **Quadro 25** apresentam-se os valores percentuais de aumento projetados para 2030 das MPC em avaliação de acordo com os dados da **Figura 8**.

Quadro 25 – Projeções de procura estimada em 2030 de MPC em avaliação de acordo com a Figura 8

Alternativa (i.e MPC)	Projeções de procura em 2030 (% de aumento) por ordem decrescente
Grafite Natural	+2577
Lítio	+2565
Cobalto	+2382
Neodímio	+954
Disprósio	+937

Para as restantes, embora utilizadas direta ou indiretamente em tecnologias de baixo carbono, não são consideradas tão relevantes como as restantes.

De acordo com a previsão de procura de MPC na UE para veículos híbridos e elétricos (*vide Figura 8*), projeta-se um aumento significativo de procura de grafite natural, lítio e cobalto. Já no âmbito das energias renováveis, destaca-se o cobalto e o neodímio.

Assim, colocou-se abaixo por ordem decrescente de relevância de utilização as MPC utilizadas nos setores de importância para a neutralidade carbónica e o combate às AC:

1. Cobalto (Co);
2. Neodímio (Nd);
3. Lítio (Li);
4. Grafite Natural (Gn);
5. Disprósio (Dy);
6. Antimónio (Sb);
7. Nióbio (Nb);
8. Titânio (Ti);
9. Estrôncio (Sr);
10. Tungsténio (W).

O cobalto é a MPC para a qual se verifica o maior aumento percentual de procura face ao valor de 2012 até 2030, associado aos biocombustíveis (utilizado em catalisadores necessários nestes processos) e representa o segundo maior aumento percentual associado ao setor da mobilidade elétrica (veículos híbridos e elétricos).

O neodímio apresenta uma projeção de aumento significativa de procura associada tanto ao setor das energias renováveis como no setor da mobilidade elétrica, seguindo-se, portanto, ao cobalto.

Já o lítio e a grafite natural, apresentam uma previsão de aumento percentual na procura bastante significativa no setor da mobilidade elétrica, cinge-se a este, não estando associado às energias renováveis, sendo colocado abaixo das referidas no parágrafo anterior.

O disprósio, embora o aumento se preveja tanto no setor das energias renováveis como no setor da mobilidade elétrica, considera-se este aumento menos significativo que o da grafite natural e lítio.

Para as restantes MPC, a ordenação baseou-se nas utilizações principais destas MPC e na % de utilização destas (quando disponível) em setores de relevância nas tecnologias de baixo carbono, nomeadamente na indústria automóvel, das baterias e das energias renováveis.

O antimónio, apesar de largamente usado no setor dos EEE (41%) e das baterias (32%), tem visto o seu uso diminuído e substituído como aditivo pelo cálcio, pela maior longevidade e desempenho que o cálcio apresenta. O nióbio é utilizado no setor automóvel como um microligante eficiente para o aço, muito utilizado na indústria automóvel, e o titânio utilizado como ânodo em baterias (Bobba et al, 2020).

Por último, o estrôncio é utilizado na composição dos ânodos das células de combustíveis e o tungsténio associado ao setor dos EEE e largamente utilizado em máquinas-ferramentas.

Para este critério em específico, foram ordenadas as alternativas no software M-MACBETH em termos de preferência de atratividade e validada a ordenação. Ao validar a ordenação, a matriz de julgamentos é preenchida automaticamente, tendo somente em consideração as condições de mensuração ordinais.

A matriz obtida apresenta-se na **Figura 23**.

	Co	Nd	Li	Gn	Dy	Sb	Nb	Ti	Sr	W	Escola actual	
Co	nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	100	extrema
Nd		nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	85	mt. forte
Li			nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	78	moderada
Gn				nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	67	fraca
Dy					nula	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	56	mt. fraca
Sb						nula	positiva	positiva	positiva	positiva	44	nula
Nb							nula	positiva	positiva	positiva	33	
Ti								nula	positiva	positiva	22	
Sr									nula	positiva	11	
W										nula	0	

Figura 23 – Matriz de julgamentos do critério “Impacte/relevância da MPC nos setores de importância para a neutralidade carbónica e o combate às AC” no software MACBETH

Pode-se verificar que a pontuação dada a cada MPC vai reduzindo em 11 pontos, da mais preferível (cobalto, com uma pontuação de 100) para a menos preferível (tungsténio, com uma pontuação de 0) decorrente das condições de mensuração ordinais atrás assumidas.

4.4.9 MPC em utilização/stock em Portugal

Para a definição da diferença de atratividade para o critério “MPC em utilização/stock em Portugal”, teve-se como base o

Quadro 18, apresentando-se de seguida, por ordem decrescente, as MPC em avaliação de acordo com as quantidades em utilização/stock:

1. Antimónio (Sb): 1957 toneladas
2. Estrôncio (Sr): 1020,99 toneladas
3. Neodímio (Nd): 757,16 toneladas
4. Tungsténio (W): 600,58 toneladas
5. Grafite Natural (Gn): 590 toneladas
6. Cobalto (Co): 509,99 toneladas
7. Nióbio (Nb): 287,52 toneladas

8. Lítio (Li): 130,09 toneladas
9. Disprósio (Dy): 86,41 toneladas
10. Titânio (Ti): Sem dados disponíveis

Foram efetuadas as comparações entre as opções em termos de diferença de atratividade com base nas informações disponíveis em termos de quantidade em stock em Portugal e, por recurso ao software M-MACBETH foram consideradas as diferenças de atratividade entre as alternativas para o critério em avaliação, segundo a matriz que se apresenta na **Figura 24**.

	Sb	Sr	Nd	W	Gn	Co	Nb	Li	Dy	Ti	Escala actual	
Sb	nula	moderada	mt. forte	mt. forte	mt. forte	mt. forte	extrema	extrema	extrema	extrema	100	extrema
Sr		nula	forte	mt. forte	mt. forte	mt. forte	extrema	extrema	extrema	extrema	92	mt. forte
Nd			nula	moderada	moderada	forte	mt. forte	mt. forte	extrema	extrema	78	forte
W				nula	mt. fraca	fraca	mt. forte	mt. forte	extrema	extrema	69	moderada
Gn					nula	fraca	mt. forte	mt. forte	extrema	extrema	67	fraca
Co						nula	forte	mt. forte	mt. forte	extrema	63	mt. fraca
Nb							nula	moderada	forte	mt. forte	43	nula
Li								nula	moderada	mt. forte	35	
Dy									nula	mt. forte	22	
Ti										nula	0	

Figura 24 – Matriz do critério “MPC em utilização/stock em Portugal” no software MACBETH

Por análise das pontuações parciais obtidas para as várias matérias-primas críticas segundo o critério em avaliação pode-se verificar que o antimónio tem uma pontuação de 100, seguido de perto pelo estrôncio com uma pontuação de 92 pontos. O titânio apresenta uma pontuação de zero em virtude da não existência de dados disponíveis pelo que se assume que as quantidades são desprezáveis em comparação com as restantes.

4.4.10 Quantidade MPC a sair de stock (exportação e/ou geradas como resíduos)

Para a definição da diferença de atratividade para o critério “Quantidade MPC a sair de stock (exportação e/ou geradas como resíduos)”, tem-se como base o **Quadro 19**, apresentando-se de seguida, por ordem decrescente, as MPC em avaliação de acordo com as quantidades a sair de stock:

1. Antimónio (Sb): 402,55 toneladas
2. Estrôncio (Sr): 154,45 toneladas
3. Grafite Natural (Gn): 69 toneladas
4. Cobalto (Co): 55,68 toneladas
5. Tungsténio (W): 54,87 toneladas
6. Neodímio (Nd): 37,52
7. Lítio (Li): 16,01 toneladas
8. Nióbio (Nb): 9,31 toneladas
9. Disprósio (Dy): 3,8 toneladas
10. Titânio (Ti): Sem dados disponíveis

Foram efetuadas as comparações entre as opções em termos de diferença de atratividade aplicando no M-MACBETH e obtida a matriz apresentada na **Figura 25**.

	Sb	Sr	Gn	Co	W	Nd	Li	Nb	Dy	Ti	Escala actual	
Sb	nula	mt. forte	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	extrema	100	extrema
Sr		nula	moderada	forte	forte	mt. forte	extrema	extrema	extrema	extrema	73	forte
Gn			nula	moderada	moderada	forte	mt. forte	extrema	extrema	extrema	62	moderada
Co				nula	mt. fraca	moderada	forte	mt. forte	extrema	extrema	51	fraca
W					nula	moderada	forte	mt. forte	extrema	extrema	49	mt. fraca
Nd						nula	moderada	forte	mt. forte	extrema	38	nula
Li							nula	moderada	forte	mt. forte	27	
Nb								nula	fraca	moderada	16	
Dy									nula	mt. fraca	7	
Ti										nula	0	

Figura 25 – Matriz do critério “Quantidade MPC a sair de stock (exportação e/ou geradas como resíduos)” no software MACBETH

4.4.11 Potencial de Pós-utilização

Para o critério “Potencial de pós-utilização” utilizou-se como principal indicador o *End-of-life recycling input rate* (Eol-RIR), que mede quanto do material total que entra no sistema de produção vem da reciclagem de “old scrap” (Mathieux et al., 2017).

Apresenta-se no **Quadro 26** os valores de Eol-RIR das opções em avaliação.

Quadro 26 – Eol-RIR das opções/MPC em avaliação (Fonte: European Commission, 2020)

Alternativa (i.e MPC)	Eol-RIR (por ordem decrescente)
Tungsténio (W)	42%
Antimónio (Sb)	28%
Cobalto (Co)	22%
Titânio (Ti)	19%
Grafite Natural (Gn)	3%
Neodímio (Nd)	1%
Estrôncio (Sr)	0%
Disprósio (Dy)	0%
Lítio (Li)	0%
Nióbio (Nb)	0%

Considerou-se, neste caso, que uma MPC que apresente menor % de EoL-RIR é mais crítica no âmbito deste critério, sendo que são as MPC que se considera a adoção de estratégias de EC mais urgente.

Para este critério, foi considerada uma diferença de atratividade nula entre o estrôncio, disprósio, lítio e nióbio, dado apresentarem todas valores de EoL-RIR 0%.

Efetuuou-se no software M-MACBETH os restantes julgamentos entre as alternativas em avaliação, obtendo-se a matriz que se apresenta na **Figura 26**.

	Nb	Li	Dy	Sr	Nd	Gn	Ti	Co	Sb	W	Escala actual	
Nb	nula	nula	nula	nula	mt. fraca	mt. fraca	forte	forte	forte	extrema	100	extrema
Li	nula	nula	nula	nula	mt. fraca	mt. fraca	forte	forte	forte	extrema	100	mt. forte
Dy	nula	nula	nula	nula	mt. fraca	mt. fraca	forte	forte	forte	extrema	100	forte
Sr	nula	nula	nula	nula	mt. fraca	mt. fraca	forte	forte	forte	extrema	100	moderada
Nd					nula	mt. fraca	forte	forte	forte	extrema	96	fraca
Gn						nula	forte	forte	forte	extrema	92	mt. fraca
Ti							nula	fraca	fraca	forte	58	nula
Co								nula	fraca	forte	46	
Sb									nula	forte	33	
W										nula	0	

Figura 26 – Matriz do critério “Potencial de Pós-utilização” no software MACBETH

4.5 Ponderação dos critérios

No M-MACBETH existem dois modos alternativos para a ponderação (Bana e Costa et al, 2017):

1. Modo simples (ou ponderação não hierárquica), no qual os pesos são atribuídos, numa única etapa, a todos os critérios simultaneamente;
2. Ponderação hierárquica, em que os pesos podem ser atribuídos em várias etapas nos diferentes níveis da árvore de valor.

Neste trabalho foi utilizado o “Modo simples” para ponderação uma vez que o modelo de avaliação é um modelo não hierárquico.

A ponderação dos critérios é uma etapa muito importante em todo o processo uma vez que os pesos são constantes de escala que permitem converter as pontuações parciais das MPC segundo cada critério de avaliação em unidades de pontuação global.

Para efetuar o procedimento de ponderação MACBETH considera-se a existência de um número de alternativas fictícias, i.e. MPC cada qual com o desempenho no critério Cr_i igual ao nível de referência superior nesse critério e o desempenho nos restantes critérios igual ao desempenho do nível de referência inferior respetivo. Considera-se também [tudo inf] uma opção hipotética com o desempenho em todos os critérios igual aos desempenhos do nível inferior nesses critérios.

$$\begin{aligned}
 [Cr_1] &= [sup_1, inf_2, \dots, inf_{11}] \\
 [Cr_2] &= [inf_1, sup_2, \dots, inf_{11}] \\
 &\dots \\
 [Cr_{11}] &= [inf_1, inf_2, \dots, sup_{11}] \\
 [tudo\ inf] &= [inf_1, inf_2, \dots, inf_{11}]
 \end{aligned}$$

O procedimento de ponderação utilizado foi realizado da seguinte forma: supondo que existe uma MPC cujo desempenho corresponde à ref. inferior em todos os critérios [tudo inf.], se o desempenho num dos critérios desta opção hipotética puder ser melhorada para o nível superior, em qual dos critérios a melhoria do nível inf para o nível sup será mais relevante? (tal corresponde a perguntar em qual critério a diferença de atratividade entre o nível inf e o sup é a maior). Na **Figura 27** estão representadas as referências de ponderação.

Referências globais	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Cr6	Cr7	Cr8	Cr9	Cr10	Cr11
[Cr9]	W	Ti	W	Dy	Dy	W	Li	Co	Sb	Sb	Nb
[Cr10]	Li	Sb	Dy	Nd	Nd	Sb	W	Nd	Sr	Sr	Li
[Cr2]	Nb	W	Nb	Sb	Nb	Dy	Dy	Li	Nd	Gn	Dy
[Cr11]	Ti	Dy	Co	W	Sr	Nd	Nd	Gn	W	Co	Sr
[Cr8]	Nd	Nd	Nd	Nb	Co	Li	Gn	Dy	Gn	W	Nd
[Cr7]	Dy	Li	Sb	Co	Gn	Gn	Co	Sb	Co	Nd	Gn
[Cr4]	Gn	Gn	Ti	Ti	Sb	Co	Sb	Nb	Nb	Li	Ti
[Cr1]	Co	Co	Sr	Li	W	Nb	Nb	Ti	Li	Nb	Co
[Cr5]	Sb	Nb	Li	Sr	Li	Sr	Sr	Sr	Dy	Dy	Sb
[Cr3]	Sr	Sr	Gn	Gn	Ti	Ti	Ti	W	Ti	Ti	W
[Cr6]											
[tudo inf.]											

Figura 27 - Referências de ponderação

Considerou-se que passar do nível de ref. inf para o nível de ref. superior era mais relevante no critério “MPC em utilização/stock em Portugal” ocupando esse critério o topo da lista de hierarquização de critérios sendo assim considerado o critério mais relevante. A mesma questão foi colocada para poder proceder à ordenação dos restantes critérios de avaliação e a ordenação alcançada foi a seguinte:

1. MPC em utilização/stock em Portugal;
2. Quantidade MPC a sair de stock (exportação e/ou geradas como resíduos);
3. Importação de MPC para Portugal;
4. Potencial de pós-utilização da MPC;
5. Impacte/Relevância da MPC nos setores de importância para a neutralidade carbónica;
6. Produção de MPC em Portugal;
7. Impacte Ambiental da MPC;
8. Potencial Extrativo em Portugal;
9. Dependência da MPC a nível Global;
10. Importância Económica da MPC;
11. Exportação de MPC de Portugal para outros Países.

Considerou-se em primeiro lugar os critérios onde se considera, em Portugal, o maior potencial de adoção de estratégias de circularidade, isto é, na fase de utilização, pós-utilização (resíduos) e importação de MPC para Portugal.

De seguida, o potencial de pós-utilização vê-se como um critério de elevada relevância, existindo o potencial de valorização das MPC a sair de stock.

O impacte/relevância da MPC nos setores de importância para a neutralidade carbónica apresenta-se de seguida, devido ao crescimento expectável destes setores e da importância no combate às AC.

Posteriormente considerou-se a produção de MPC em Portugal e o impacte ambiental associado. Embora em Portugal a extração de minério de MPC seja reduzida, a adoção de estratégias de circularidade visa, entre outros aspetos, minimizar a necessidade de extração, sendo, portanto, um critério bastante relevante quando considerado o ciclo de vida de uma MPC.

De seguida, considerou-se o potencial extrativo em Portugal. Embora possa este potencial não se materializar no presente ou num futuro próximo, a dependência europeia destas MPC pode posicionar Portugal como uma importante fonte destas para garantir a cadeia de abastecimento europeia.

A importância económica e dependência da MPC a nível global, embora bastante relevantes, são já critérios para a definição das MPC e, portanto, aparecem posteriormente ao critério de potencial extrativo.

Por último, considerou-se a exportação de MPC de Portugal, uma vez que o potencial de adoção de estratégias de circularidade terá maior sucesso nos países para que são exportadas, e não em território nacional.

A escala de ponderação obtida apresenta-se na **Figura 28**.

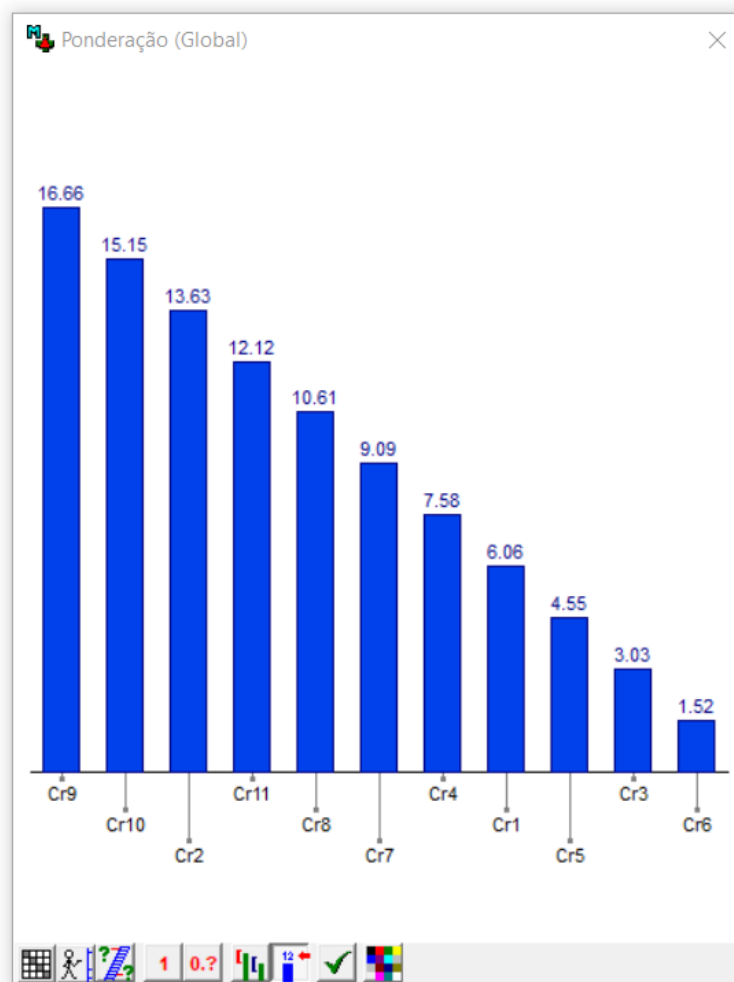


Figura 28 – Escala de ponderação (Global) obtida no software M-MACBETH

4.6 Análise dos resultados obtidos

Uma vez construído o modelo de avaliação é possível visualizar os resultados obtidos por utilização do modelo aditivo simples de uma forma concisa na **Figura 29**.

Opções	Global	Cr1	Cr2	Cr3	Cr4	Cr5	Cr6	Cr7	Cr8	Cr9	Cr10	Cr11
Dy	36.83	0.00	0.00	63.00	100.00	100.00	0.00	0.00	56.00	22.00	7.00	100.00
Nd	49.68	0.00	0.00	19.00	64.00	97.30	0.00	0.00	89.00	78.00	38.00	96.00
Li	45.08	61.00	0.00	0.00	18.00	13.51	0.00	100.00	78.00	35.00	27.00	100.00
Gn	40.41	0.00	0.00	0.00	0.00	35.14	0.00	0.00	67.00	67.00	62.00	92.00
Co	39.30	0.00	0.00	33.00	27.00	40.54	0.00	0.00	100.00	63.00	51.00	46.00
Sb	53.69	0.00	57.00	19.00	40.00	27.03	40.00	0.00	44.00	100.00	100.00	33.00
Nb	35.45	56.00	0.00	37.00	35.00	67.57	0.00	0.00	33.00	43.00	16.00	100.00
W	45.48	100.00	43.00	100.00	35.00	13.51	100.00	75.00	0.00	69.00	49.00	0.00
Sr	42.66	0.00	0.00	4.00	7.00	51.35	0.00	0.00	11.00	92.00	73.00	100.00
Ti	27.59	39.00	100.00	11.00	25.00	0.00	0.00	0.00	22.00	0.00	0.00	58.00
[tudo sup.]	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
[tudo inf.]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pesos :		0.0606	0.1363	0.0303	0.0758	0.0455	0.0152	0.0909	0.1061	0.1666	0.1515	0.1212

Figura 29 - Pontuações globais para as MPC segundo os critérios em avaliação

De referir que [tudo inf] representado corresponde à referência global que foi considerada cujo desempenho nos vários critérios é igual ao desempenho no seu nível de referência inferior. [tudo sup] por sua vez representa uma referência global para a qual o desempenho em todos os critérios é igual ao desempenho nos seus níveis de referência superiores. Estas referências globais constituem um *benchmark* para se avaliar a atratividade global intrínseca.

O termómetro global, permite visualizar graficamente as pontuações globais finais para cada MPC, que se apresenta na **Figura 30**, de onde se verifica que a MPC com maior pontuação global é o **antimónio**, com uma pontuação global de 53.69.

De seguida, em termos de pontuação global, seguem-se o neodímio (49.68) e o tungsténio (45.48).

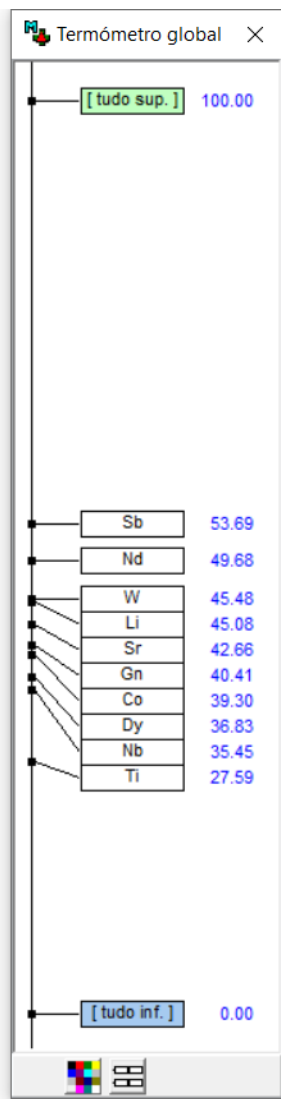


Figura 30 – Termómetro global obtido no software MACBETH

Considerando apenas a tabela de pontuações final e as pontuações globais, as 3 MPC para Portugal são:

1. Antimónio (Sb),
2. Neodímio (Nd) e
3. Tungsténio (W).

Destaca-se ainda o lítio (45.08), com uma pontuação muito próxima da obtida para o tungsténio (45.48).

No sentido de validar esta decisão, é efetuado no ponto seguinte a avaliação da robustez da decisão.

De forma a poder ter uma compreensão mais aprofundada dos resultados obtidos no modelo de avaliação, apresenta-se na **Figura 31** para melhor compreender o que faz com que MPC colocada em primeiro lugar da lista de ordenação tenha uma pontuação superior compreendendo assim quais os critérios que mais contribuem para essa pontuação global.

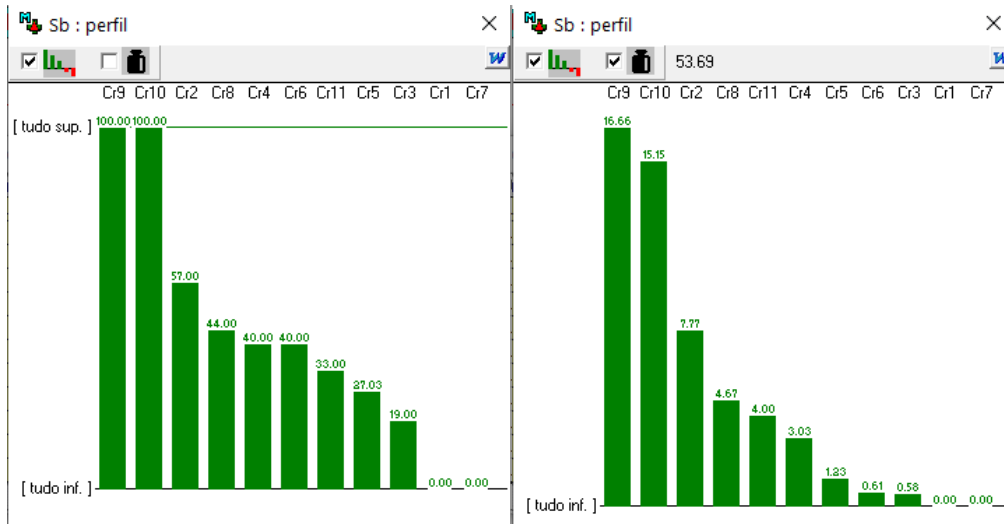


Figura 31 - Perfis e perfis ponderados para o Antimónio

Observando os perfis para o antimónio pode-se verificar graficamente quais os critérios que mais contribuem para a sua pontuação. Assim os critérios “MPC em utilização/stock em Portugal”, “Quantidade de MPC a sair de stock”, “Importância económica da MPC para Portugal” e “impacte/relevância da MPC nos setores de importância para a neutralidade carbónica” são os que mais contribuem para a sua elevada pontuação. Observando os perfis ponderados que correspondem ao produto do peso do critério correspondente pela pontuação parcial do antimónio segundo esse mesmo critério pode-se verificar que a ordem e o contributo destes três principais critérios se mantém inalterada.

Na análise dos resultados é também interessante observar as diferenças entre as duas principais matérias-primas críticas para melhor compreender as diferenças entre o antimónio e o neodímio. Na **Figura 32** apresentam-se os perfis de diferenças simples e ponderadas entre o antimónio e o neodímio para melhor se compreender quais os critérios que favorecem o antimónio face ao neodímio.

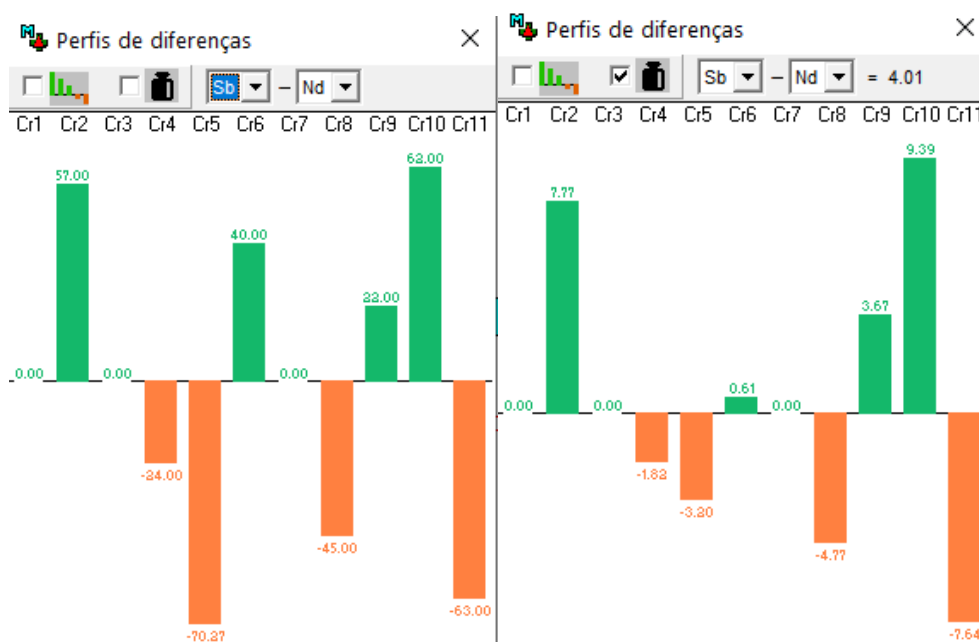
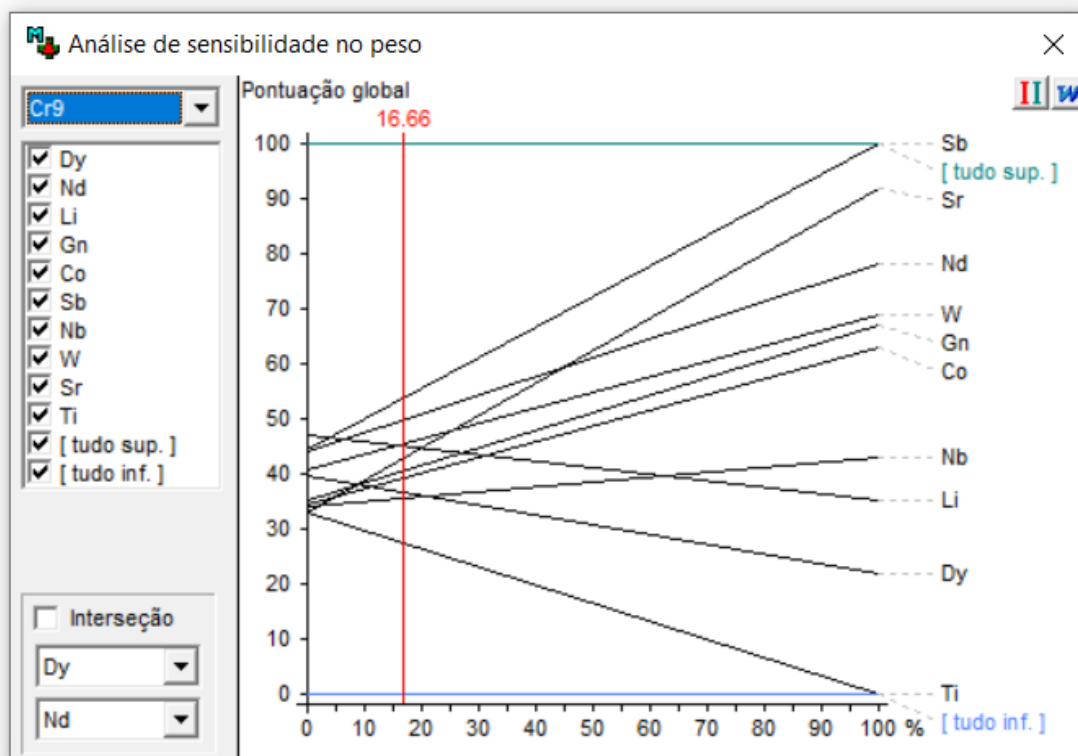


Figura 32 - Perfis de diferenças simples e ponderado entre o antimónio e o neodímio

Por análise da **Figura 32** pode-se concluir que o critério “Importação de MPC para Portugal”, o critério “Exportação de MPC de Portugal para outros países”, o critério “MPC em utilização/stock em Portugal” e o critério “Quantidade MPC a sair de stock (exportação e/ou geradas como resíduos)” são os que contribuem para que o antimónio tenha uma pontuação global superior à do neodímio.

Sendo os critérios “MPC em utilização/stock em Portugal” (i.e. critério 9) e “Quantidade MPC a sair de stock (exportação e/ou geradas como resíduos)”(i.e. critério 10) os que têm maior peso no modelo de avaliação de acordo com o histograma dos pesos (**Figura 28**) uma análise de sensibilidade ao peso destes critérios é relevante como forma de melhor compreender que impacto tem a alteração do peso destes critérios no modelo de avaliação em causa.

Assim a análise de sensibilidade ao peso do critério 9 (“MPC em utilização/stock em Portugal”) encontra-se representada na **Figura 33**.



Da análise da **Figura 33** pode-se concluir que o antimónio será a opção seleccionada mesmo que o peso do critério 9 sofra uma grande alteração. Só quando o peso do critério se aproxima de zero é que existe uma troca na ordenação o que não é uma situação a admitir uma vez que este critério foi considerado o mais relevante.

A análise de sensibilidade ao peso do segundo critério mais relevante “Quantidade MPC a sair de stock (exportação e/ou geradas como resíduos)” apresenta-se na **Figura 34**.

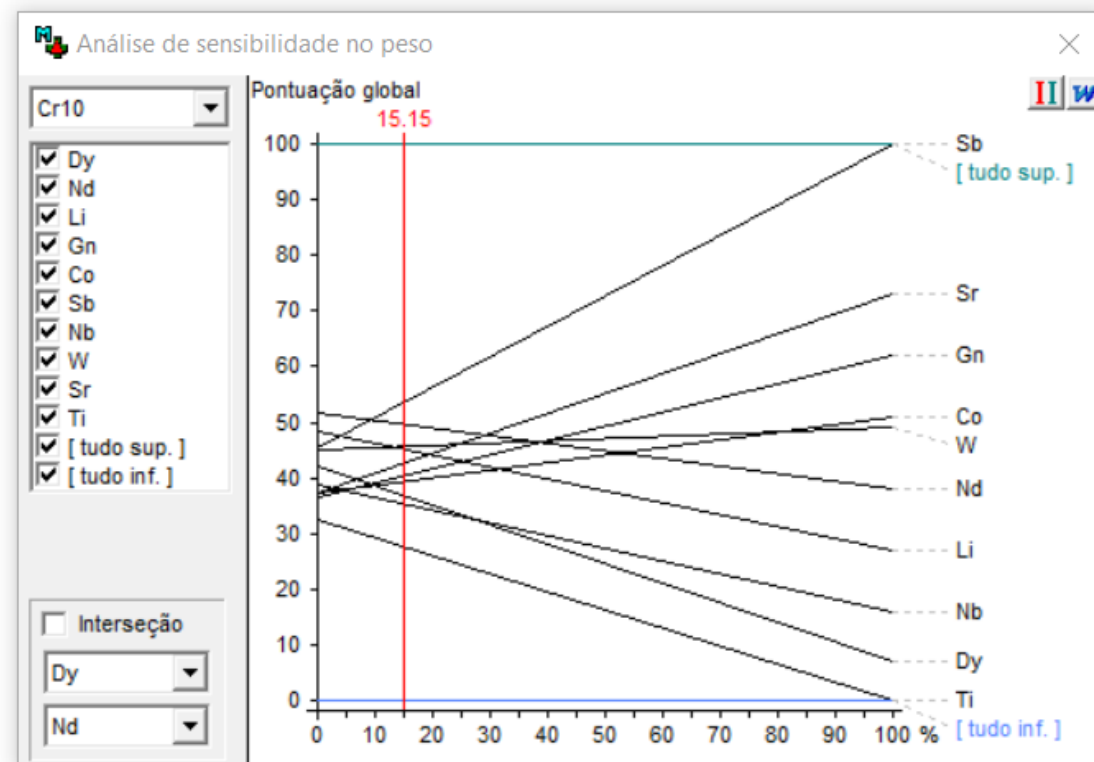


Figura 34 - Análise de sensibilidade ao peso do critério “Quantidade MPC a sair de stock (exportação e/ou geradas como resíduos)”

Através do gráfico de análise de sensibilidade (**Figura 34**) é possível verificar que se o peso do critério 10 descer abaixo de 9,3% a MPC que aparece no topo da ordenação deixará de ser o antimónio e passará a ser o neodímio.

4.7 Avaliação da robustez da decisão

A tomada de decisão envolve, com frequência, informação escassa, imprecisa ou incerta. Pode ser útil, por isso, analisar que conclusões robustas se podem extrair do modelo para níveis variados de escassez, imprecisão ou incerteza da informação, utilizando a função “Análise de Robustez” do MACBETH (Bana e Costa et al, 2017). O software MACBETH oferece assim um módulo de análise de robustez que pode ser utilizado para explorar até que ponto quais conclusões podem ser tiradas, dadas quantidades de informações e diferentes graus de imprecisão ou incerteza. O MACBETH organiza as informações inseridas no modelo em três tipos:

1. Ordinal: refere-se somente à ordenação, excluindo qualquer informação de diferença de atratividade (intensidade de preferência);
2. MACBETH: inclui os julgamentos semânticos introduzidos no modelo, mas ignora qualquer escala de pontuação ou ponderação compatível com esses julgamentos;
3. Cardinal: denota uma escala específica validada.

O símbolo ▲ representa uma situação de “dominância”, sendo que uma opção domina outra se for pelo menos tão atrativa quanto a outra em todos os critérios e se for mais atrativa do que outra em pelo menos um dos critérios.

O símbolo + representa uma situação de “dominância aditiva”, isto é, uma opção domina aditivamente outra opção se, para um determinado conjunto de restrições na informação, resultar sempre globalmente mais atrativa do que outra opção da aplicação do modelo aditivo.

A informação local diz respeito a informação específica num determinado critério ao passo que a informação global refere-se à informação de ponderação dos critérios.

O módulo de análise de robustez do M-MACBETH mostra se as relações de dominância e a preferência global se mantêm entre as opções em quantidades variáveis de informações. Através da análise de robustez, o ou os tomadores da decisão podem testar se hesitações nos parâmetros de decisão são pouco relevantes para os resultados do modelo ou, pelo contrário, os casos que valem a pena investir recursos para uma análise mais aprofundada.

No entanto, a análise de robustez também pode ser vista numa perspetiva diferente de auxílio à decisão, nas situações em que o ou os tomadores de decisão não queiram definir valores para pontuações e pesos, mas sim optar por uma pura análise qualitativa, apenas com base nos julgamentos MACBETH. Nesta perspetiva, após a introdução dos julgamentos no M-MACBETH, e estes validados, pode-se passar diretamente para as janelas de análise de robustez e selecionar as “caixas” de informação local e global na tabela de informações, para exibir a comparação global para cada par de opções.

Da análise da **Figura 35**, das 3 MPC e com informação global ordinal, é possível concluir que o antimónio domina aditivamente a grafite natural, o estrôncio, o cobalto, o nióbio e o titânio. Já o neodímio, domina aditivamente o disprósio, o cobalto, o nióbio e o titânio e o tungsténio não domina aditivamente nenhuma das outras MPC em avaliação.

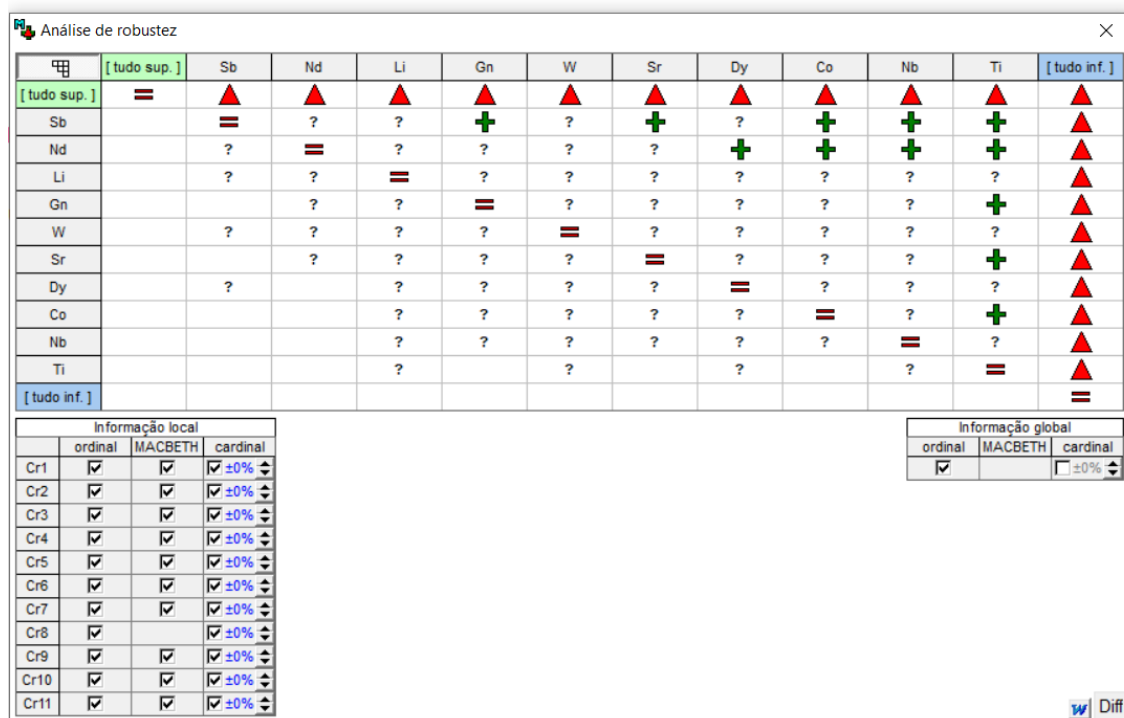


Figura 35 – Análise de Robustez (Informação local e global ordinal) obtida no software MACBETH

Assim, pode-se dizer que sem informação global cardinal não se pode concluir quais as 3 MPC com maior relevância no contexto nacional. Já com a informação global cardinal (vide **Figura 36**) chegamos à conclusão de que o antimónio é a MPC que domina aditivamente todas as outras, seguida do neodímio e do tungsténio.

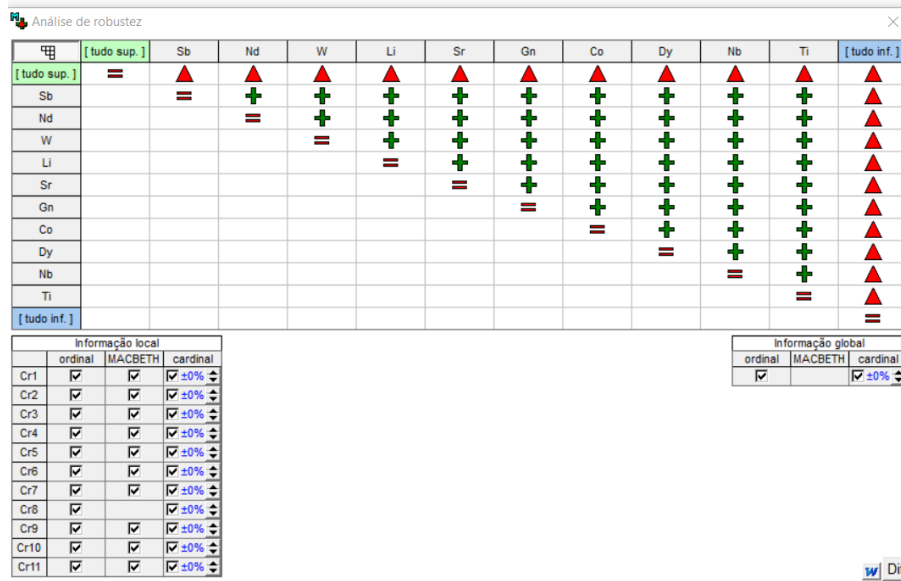


Figura 36 – Análise de Robustez (Informação local e global) obtida no software MACBETH

Efetou-se também um teste, alterando-se a ponderação dos critérios, para uma situação em que o peso dos critérios seria igual (diferença nula), obtendo-se o mesmo resultado (vide **Figura 37**), embora se verifique a alteração da posição em termos de pontuação, surgindo o tungsténio em primeiro lugar, seguido do neodímio e do antimónio. É ainda de destacar que nesta situação o lítio passa a ocupar a quinta posição em termos de pontuação.

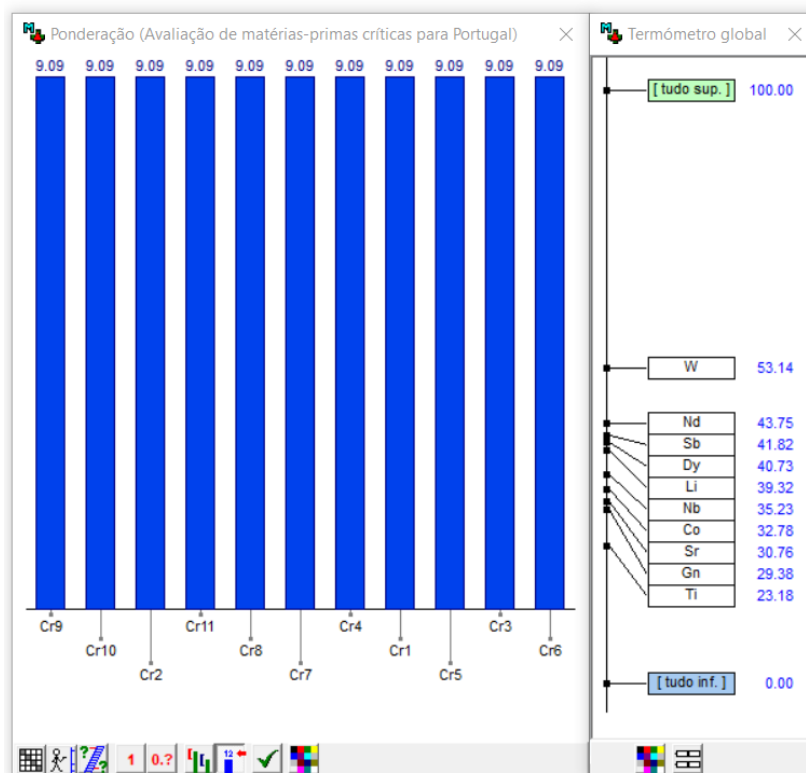


Figura 37 – Histograma de ponderação dos critérios e termómetro global obtido no software MACBETH para peso dos critérios igual

4.8 Resultados obtidos

Em suma, o processo de decisão envolve em muitas situações incertezas e imprecisões, e em função dos julgamentos efetuados e ponderação dos critérios poderão ser obtidos efetivamente resultados distintos.

No entanto, tanto os julgamentos efetuados como a ponderação dos critérios foram cuidadosamente analisados visando minimizar a incerteza associada aos resultados.

O tungsténio, de acordo com os julgamentos efetuados, apresenta uma pontuação de 100 em 3 (Potencial extrativo, importância económica da MPC e Exportação de MPC de Portugal para outros países,) dos 10 critérios (i.e. pontos de vista fundamentais) de avaliação. Apresenta ainda pontuações bastante elevadas nos critérios “Importação de MPC para Portugal”, “Impacte Ambiental da MPC”, “Produção de MPC em Portugal”, “MPC em utilização/stock em Portugal” e “Quantidade MPC a sair de stock (exportação e/ou geradas como resíduos)”, justificando-se assim como uma das MPC mais relevantes a nível nacional, face aos pressupostos assumidos.

O neodímio, embora não se verifique a MPC com maior relevância em nenhum dos critérios de avaliação, apresenta pontuações elevadas em critérios com peso elevado na decisão, caso do “MPC em utilização/stock em Portugal”, “Impacte/Relevância da MPC nos setores de importância para a neutralidade carbónica” e “Potencial de pós-utilização da MPC”.

Por sua vez, o antimónio apresenta-se como a MPC com maior pontuação nos critérios com maior peso, “MPC em utilização/stock em Portugal” e “Quantidade MPC a sair de stock (exportação e/ou geradas como resíduos)”, para além de apresentar pontuações elevadas noutros critérios com peso importante, como é caso do critério “Importação de MPC para Portugal” e “Impacte Ambiental da MPC”.

Assim, de acordo com os pressupostos assumidos e julgamentos efetuados, chega-se à identificação destas 3 MPC como as de maior relevância em território nacional.

No 5.º capítulo efetuou-se a identificação do potencial de adoção de estratégias de economia circular para estas 3 MPC. É também de salientar que as estratégias de circularidade com potencial de adoção em território nacional incluirão em determinados casos outras MPC que não estas 3, pelos setores e cadeias de abastecimento onde são utilizadas. A título de exemplo, estratégias de circularidade aplicadas ao setor da mobilidade elétrica podem contribuir para a maior circularidade do neodímio, mas também de outras que se incluem neste setor, como é caso do da grafite natural, lítio, cobalto, disprósio, entre outras.

5º Capítulo

5.1 Identificação do potencial de adoção de estratégias de economia circular às 3 matérias-primas selecionadas

Este capítulo visa efetuar uma breve descrição das aplicações na indústria das 3 MPC definidas no capítulo anterior, e potenciais estratégias de circularidade que podem ser aplicadas.

5.2 Aplicações das 3 matérias-primas na indústria

5.2.1 Tungsténio

O tungsténio (símbolo químico W), também conhecido como volfrâmio, é um metal raro e duro. É encontrado naturalmente na Terra quase exclusivamente em compostos químicos.

Os seus minérios mais importantes incluem a volframite e scheelite. É considerada uma MPC da UE desde 2011. A **Figura 38** apresenta as utilizações finais de tungsténio em percentagem e o fornecimento por país da UE, de 2012 a 2016.

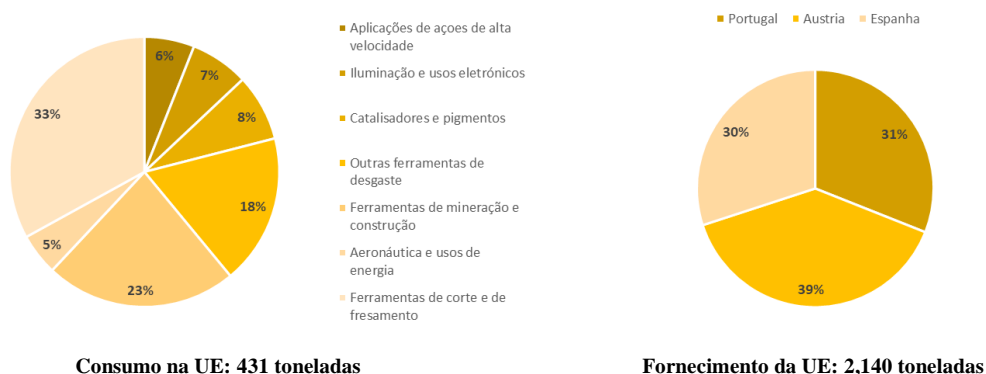


Figura 38 – Consumo (por setor) e fornecimento (por país) de Tungsténio na UE (Fonte: Adaptado de European Commission, 2020a)

Como se pode verificar da análise **Figura 38**, Portugal representa aproximadamente 1/3 do fornecimento de tungsténio de fornecedores da UE. A China é o maior produtor, exportador e consumidor de concentrados de tungsténio.

Não há previsão qualitativa sólida de oferta e procura de tungsténio para o futuro. Alguns especialistas consideram que o risco geral de abastecimento da indústria intermediária de tungsténio da UE aumentou em vez de reduzir em relação a 2017 (European Commission, 2020).

Dada as suas propriedades físicas excecionais, o tungsténio é usado numa ampla gama de aplicações e setores, como se verifica da análise da **Figura 38**.

O tungsténio apresenta um desempenho muito especial e é, na maioria das vezes, a melhor escolha de material. Portanto, existe uma substituição de muito baixo desempenho para este material na realidade industrial (European Commission, 2020).

O tungsténio secundário pode ser encontrado em dois tipos principais de fontes: em resíduos do processamento do material contendo tungsténio, bem como em produtos em fim de vida de minas urbanas e resíduos de manufatura (Yang et al., 2018). A sucata de tungsténio, devido ao seu alto teor de tungsténio em comparação com o minério, é uma fonte muito valiosa.

Como se pode verificar da análise da **Figura 39**, e de acordo com Bobba et al. (2020), o tungsténio é utilizado na robótica, drones e impressão 3D, que são tecnologias consideradas estratégicas para a UE.

No caso do setor da impressão 3D, o tungsténio é utilizado em várias ligas resistentes ao calor, em inox e endurece aços de ferramentas, lâminas de turbina e palhetas.

É de notar que o tungsténio é da lista de MPC uma das que apresenta maior EoL-RIR (*vide Quadro 26*), de 42%, sendo assim o tungsténio secundário uma importante fonte para esta indústria. Tal deve-se principalmente às suas principais utilizações na indústria e, como tal, com taxas de recolha elevadas em fim de vida.

Dado a sua ampla utilização em diversos setores e maioritariamente em âmbito industrial, o tungsténio é uma MPC com um potencial de circularidade muito elevado.

Existindo reservas a nível nacional e considerando a importância desta MPC, vê-se de extrema relevância promover a sua circularidade, trazendo por certo benefícios económicos, sociais e ambientais.










Risco de abastecimento (Supply Risk)	Material									
●	LREEs		●	●	●		●	●		●
●	HREEs		●	●	●		●	●		
●	Magnésio		●				●	●	●	●
●	Nióbio	●		●				●	●	
●	Germânio					●		●		●
●	Fósforo	●					●	●		●
●	Boratos		●	●	●	●	●	●	●	●
●	Escândio							●	●	
●	Estrôncio		●				●	●		
●	Cobalto	●	●	●			●	●	●	●
●	PGMs		●				●	●		●
●	Berílio							●		
●	Grafite Natural	●	●				●	●		●
●	Bismuto						●	●		●
●	Antimónio						●	●		
●	Índio					●	●	●		
●	Vanádio		●				●	●	●	●
●	Lítio	●	●				●	●		
●	Tungsténio						●	●	●	
●	Tântalo						●	●		
●	Espatoflúor	●					●	●		
●	Titânio	●	●				●	●	●	●
●	Gálio					●	●	●		●
●	Arsénio		●				●	●		●
●	Silício de metal	●	●		●	●	●	●	●	●
●	Háfnio							●	●	
●	Molibdénio		●	●		●	●	●	●	●
●	Manganês	●	●	●			●	●	●	●
●	Estanho	●				●	●	●		●
●	Crómio		●	●			●	●	●	●
●	Zircónio		●				●	●	●	●
●	Prata		●			●	●	●	●	●
●	Alumínio	●	●	●	●	●	●	●	●	●
●	Telúrio					●	●	●		●
●	Níquel	●	●			●	●	●	●	
●	Minério de ferro	●	●	●	●	●	●	●	●	●
●	Selénio	●	●				●	●		●
●	Zinco					●	●	●		
●	Cádmio					●	●	●		●
●	Cobre	●	●	●	●	●	●	●	●	●
●	Ouro		●				●	●		●
●	Chumbo	●		●		●	●	●		●

Figura 39 - Lista de aplicações de MPC e não críticas em diferentes tecnologias e o seu risco de fornecimento (Fonte: Adaptado de European Commission, Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020 (Fonte: Bobba, S. et al, 2020))

A **Figura 40** apresenta a cadeia de valor simplificada do Tungsténio para a UE, média de 2012 a 2016.

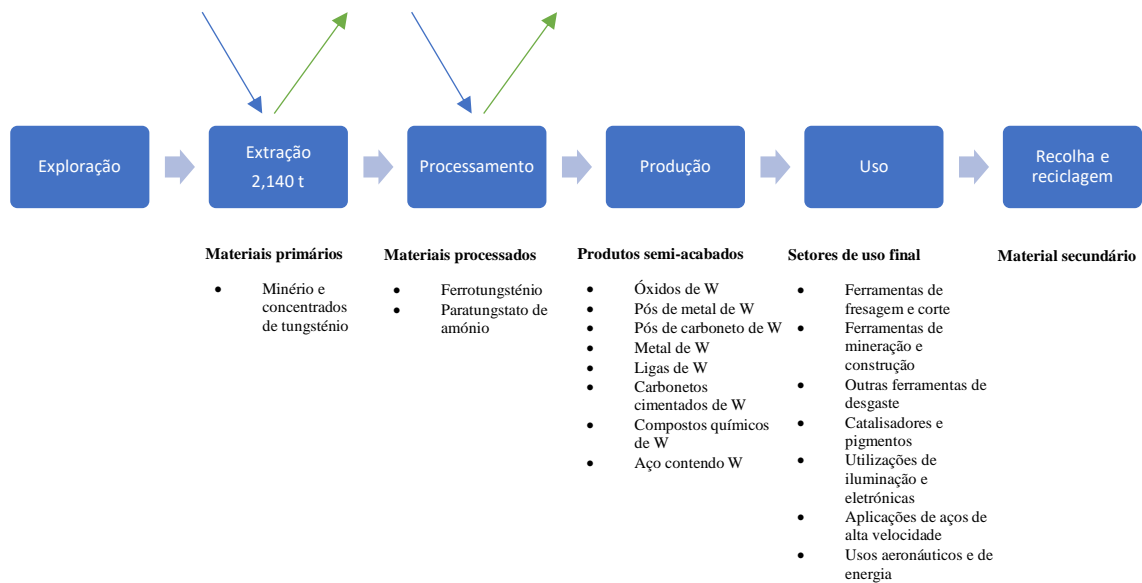


Figura 40 – Cadeia de valor simplificada do Tungsténio para a EU, média de 2012-2016 (Fonte: Adaptado de European Commission, 2020a). Importações representadas a setas pretas e exportação a setas verdes

Em suma, o tungsténio é utilizado numa variedade de setores, alguns destes considerados setores e tecnologias estratégicas na UE, como é caso da utilização para ferramentas de construção e da indústria extrativa, equipamentos elétricos e eletrónicos, indústria da defesa, impressão 3D, entre outros.

Apresenta uma EoL-RIR bastante elevada dado que os principais produtos contendo esta MPC são utilizados em ambiente industrial.

A nível nacional, esta MPC vê-se como especialmente relevante, sendo Portugal um dos principais países produtores da UE, contabilizando aproximadamente 31% do abastecimento. Portugal produz concentrado de volframite da Mina da Panasqueira.

5.2.2 Antimónio

O antimónio (Símbolo químico Sb) é um metaloide macio, brilhante e apresenta uma cor cinza prateado. É estável no ar em temperatura ambiente, mas reage com o oxigénio quando aquecido para formar trióxido de antimónio (Sb₂O₃).

Tem um ponto de fusão relativamente baixo de 630 C° e uma densidade de 6,697 g / cm³. O antimónio é raro na crosta terrestre, tendo uma abundância crustal (superior) de apenas 0,4 ppm (Rudnick & Gao, 2003), e é uma MPC da UE desde 2011.

A **Figura 41** apresenta as utilizações finais de Antimónio e o fornecimento por país para a UE, de 2012 a 2016.

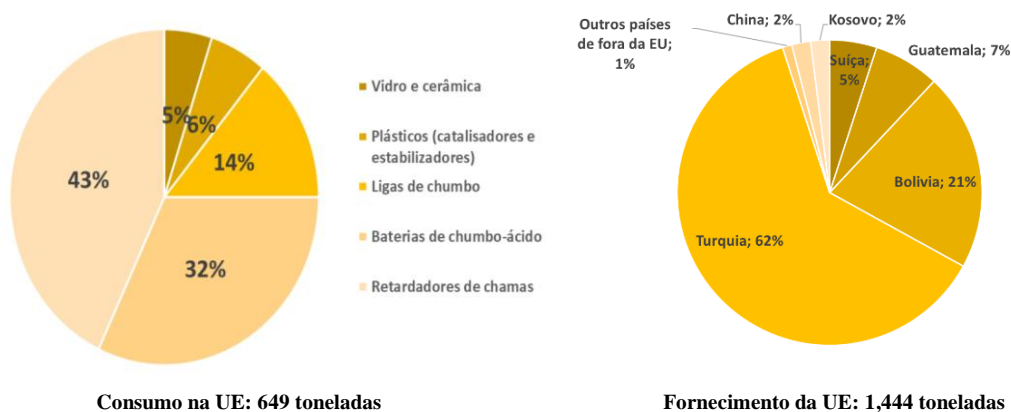


Figura 41 - Consumo (por setor) e fornecimento (por país) de Antimónio na EU (Fonte: Adaptado de European Commission, 2020a)

Como se pode verificar, a grande percentagem de antimónio é direcionada para a produção de ligas de chumbo para baterias de chumbo-ácido (32%) e retardantes de chama (43%).

De acordo com Bobba et al. (2020), ao nível das matérias-primas, é importante garantir o acesso e diversificar o abastecimento dos materiais utilizados na robótica e para a qual a UE tem nenhuma ou muito baixa produção doméstica, como o crómio, cobalto, molibdénio, grafite, níquel, magnésio, vanádio, cobre, estanho, antimónio e bismuto.

Já na etapa de processamento, a UE é um grande produtor mundial de óxido de antimónio, durante o período de 2012-2016, como se pode verificar da análise da **Figura 42**. A produção da UE de óxido de antimónio depende fortemente das importações de antimónio em formas brutas, como se pode verificar da análise da **Figura 42**, representando aproximadamente 50%.

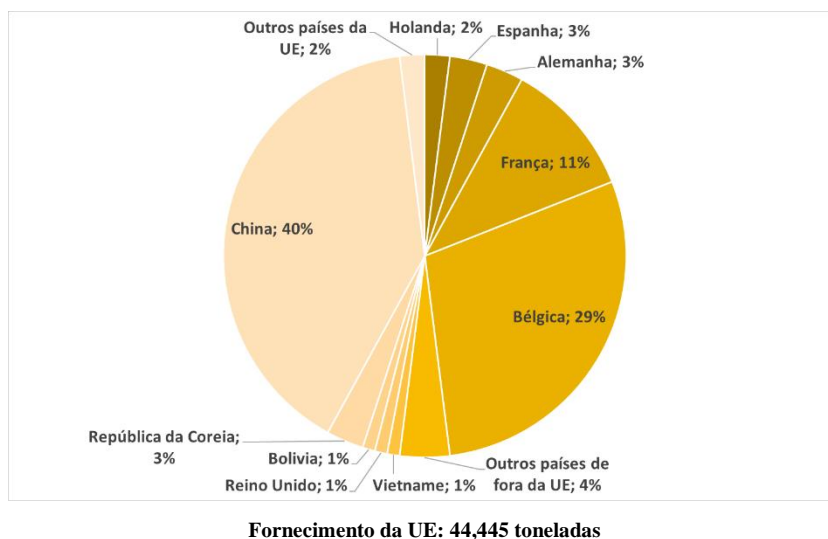


Figura 42 –Abastecimento da UE de antimónio em formas brutas e óxidos de antimónio (fase de processamento) (média anual para 2012-2016) (Fonte: European Commission, 2020a)

O consumo médio anual da UE de minérios e concentrados de antimónio foi de aproximadamente 649 toneladas por ano para o período de 2012-2016, fornecido exclusivamente por importação, predominantemente da Turquia (62%), Bolívia (20%) e Guatemala (7%) (European Commission, 2020a).

O uso contínuo de óxido de antimónio e estanho em retardadores de chama também deve ser motivado por regulamentações cada vez mais rígidas contra incêndios. O principal substituto do antimónio nas baterias de chumbo-ácido é a liga de estanho com teor de chumbo, embora essa substituição possa não ocorrer imediatamente (European Commission, 2020a).

Espera-se também um aumento da procura e fornecimento de Antimónio para os próximos 5, 10 e 20 anos (vide **Quadro 27**).

Material	Críticidade em 2020		Previsão de procura			Previsão de fornecimento		
	Sim	Não	5 anos	5 anos	10 anos	5 anos	10 anos	20 anos
Antimónio	x		+	+	+	+	+	+

Quadro 27 – Previsão qualitativa de oferta e demanda de antimónio (Adaptado de European Commission, 2017)

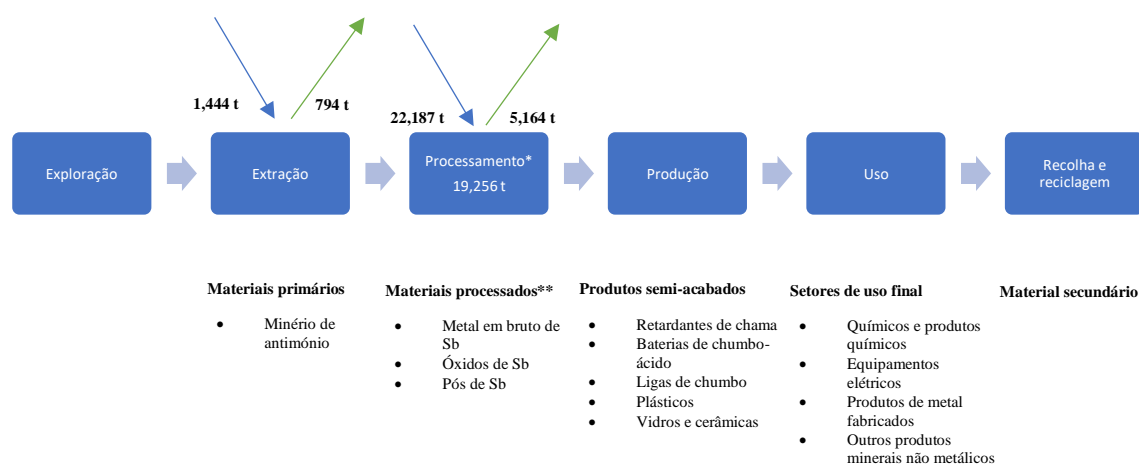
No período de 2012-2016, a UE importou 18.5000 toneladas por ano de antimónio em formas brutas. O fornecimento de antimónio em formas brutas para a UE veio principalmente da China (83%), Vietnam (4%) e Tajiquistão (4%) (European Commission, 2020a).

O antimónio é razoavelmente fácil de substituir em algumas das suas aplicações (Tercero Espinoza et al., 2015). Por exemplo, compostos de crómio, estanho, titânio, zinco e zircónio podem substituir o antimónio na fabricação de pigmentos e vidro. No entanto, na sua aplicação principal (ou seja, como um retardador de chama), o antimónio é muito mais difícil de substituir.

A extração de minérios de antimónio e a produção de concentrados de antimónio não ocorrem na UE. A UE é um importador líquido de minério e concentrados de antimónio com uma dependência de importação de 100% (European Commission, 2020a).

O antimónio secundário pode ser encontrado em dois tipos principais de fontes: em resíduos do processamento de materiais contendo antimónio, bem como em produtos em fim de vida de minas urbanas e resíduos de manufatura (Yang et al., 2018). Já a EoL-RIR do antimónio é estimada em 28% (vide **Quadro 26**).

A **Figura 43** apresenta a cadeia de valor simplificada (média de 2012-2016) do Antimónio.



* Processamento de óxidos de antimónio, estimado de dados comerciais

** Destes produtos, apenas o óxido de Sb é produzido na EU; no entanto, esta produção é de metal de Sb importado.

Figura 43 – Cadeia de valor simplificada do Antimónio para a UE, média de 2012-2016 (Fonte: Adaptado de European Commission, 2020a). Importações representadas a setas pretas e exportação a setas verdes

Em suma, o antimónio é uma MPC utilizada numa variedade de setores, tendo como principais aplicações os retardadores de chama e as baterias de chumbo-ácido. Apresenta uma EoL-RIR razoavelmente alta e é facilmente substituível, embora se preveja um aumento na procura nos próximos 20 anos. O principal fornecedor de antimónio bruto da UE é a China e a UE um importante importador e produtor de trióxido de antimónio.

Em Portugal, o antimónio foi explorado até 1967, altura em que foi encerrada a mina Barroca da Mina / Barroca da Santa. Os depósitos portugueses foram estimados em 17.700 toneladas de recursos remanescentes de antimónio (Lauri et al., 2018).

5.2.3 Neodímio

O neodímio (símbolo químico Nd) é considerado um REE leve (LREE). É um dos REE mais abundantes, junto com o lantânio e o cério.

Não ocorre naturalmente como um elemento metálico e é encontrado principalmente (para exploração comercial) nos minerais bastnasita, monazita e em argilas de adsorção. É um metal prateado macio que perde o brilho ao ar em poucos dias. O seu uso mais importante é em ímanes permanentes NdFeB (European Commission, 2020a).

Este grupo de matérias-primas é essencial na produção de produtos de alta tecnologia e de baixo-carbono, como veículos elétricos, turbinas eólicas, baterias, entre outros (European Commission, 2020a).

A **Figura 44** apresenta os usos finais na forma de misturas de óxidos de terras raras (REO) em percentagem, na UE e global.

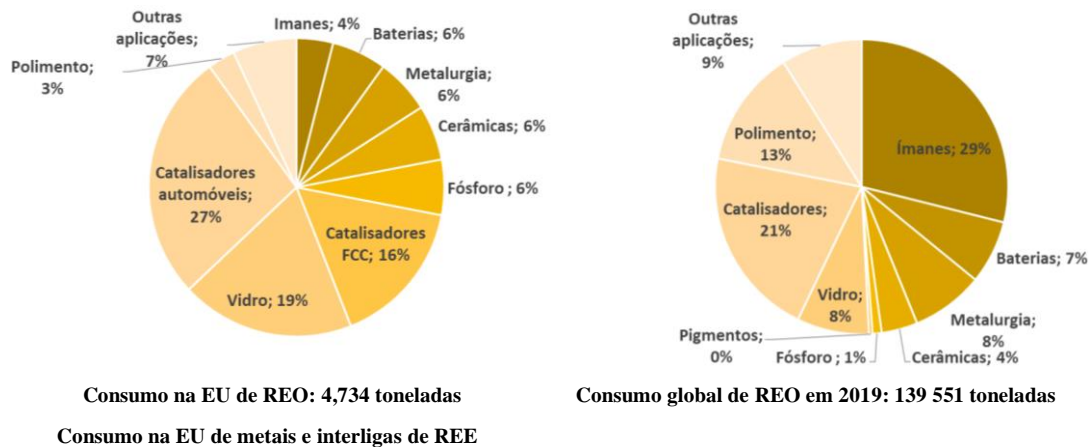


Figura 44 – Usos finais da UE e globais e consumo de REE (Fonte: Adaptado de European Commission, 2020a)

Da análise da **Figura 39** pode-se verificar que os LREE são as MP com maior risco de fornecimento e utilizadas nos setores das células de combustível, energia eólica, motores elétricos de tração, robótica, drones e tecnologias digitais.

Os materiais magnéticos neodímio e praseodímio representam 75% do valor total de REE e 20% do volume; enquanto o lantânio e o cério representam cerca de 70% do volume, mas apenas 8% do valor; e outros elementos respondem por cerca de 10% do volume e 17% do valor (European Commission, 2020).

Os REEs, neodímio, praseodímio e disprósio, são ingredientes-chave do material magnético mais poderoso, as ligas de neodímio-ferro-boro (NdFeB). Este íman é usado para fabricar geradores síncronos de íman permanente (PMSG), que são usados nas principais configurações de turbinas eólicas (Bobba et al, 2020).

São também utilizados nos setores da robótica, motores elétricos de tração, tecnologias digitais, entre outros. Para o caso específico do Neodímio, prevê-se um aumento de 2193% para 2030 (*vide Figura 10*), evidenciando a sua importância para esta transição.

Em termos de substituição, para a maioria das aplicações onde são utilizados REE, faltam substitutos com custo e desempenho comparável (European Commission, 2020a).

A UE é totalmente dependente das importações de REE para o seu consumo. As importações médias da UE durante o período 2016-2018 foram de 9.438 toneladas de compostos de REE, 1.162 toneladas de metais REE e interligas, enquanto as exportações da UE foram de 5.464 toneladas de compostos de REE e 601 toneladas de metais e ligas REE (European Commission, 2020a).

A Europa tem vários depósitos potencialmente económicos, como é o caso de Vale de Cavalos em Portugal, mas não existe de momento nenhuma operação de extração de REE na UE.

O risco de fornecimento destas MPC deve-se principalmente à dominância da China na produção, que representa entre 70% e 90% da produção mundial, controlando assim o mercado global de REE (European Commission, 2020a).

As taxas de reciclagem de REE são muito limitadas, geralmente inferiores a 1%, sendo no caso específico do Neodímio de aproximadamente 1% (*vide Quadro 26*). As principais razões são a falta de sistemas de recolha eficientes e custos proibitivos de construção de unidades de reciclagem de REE, questões tecnológicas, tempo de vida útil dos produtos e mudança química ou viabilidade comercial.

A evolução futura da procura de neodímio é impulsionada por duas forças (European Commission, 2020a):

1. Esforços empreendidos para eliminação dos REE em geral e o neodímio em particular da sua cadeia de valor após a era de restrição à exportação da china, nomeadamente por evitar tecnologias de ímanes permanentes de REE e que provou ser bem sucedido em determinados setores, nomeadamente no setor automóvel. No entanto, o desempenho dos REE permanecem superiores em muitas aplicações e devem permanecer a principal escolha desde que os preços e disponibilidade seja favorável;
2. O contexto atual de crescimento de iniciativas de energia e transporte verde.

De 2018 a 2030, a Adamas Intelligence (2019) prevê que a produção de óxido de neodímio aumente a uma taxa mais lenta do que a procura global, resultando na redução dos stocks dos produtores e, em última análise, escassez desses materiais se o fornecimento não for aumentado além o que é atualmente antecipado.

Já em termos de valor, a Adamas Intelligence (2019a) prevê que os preços de elementos como o neodímio, praseodímio, disprósio e térbio, aumentarão para pagar as perdas que os produtores apresentam pela produção de cério, lantânio e outras terras raras excedentes não passíveis de venda atualmente pela falta de outros usos finais e aplicações.

A **Figura 45** apresenta a cadeia de valor simplificada (média de 2012-2016) dos REE.

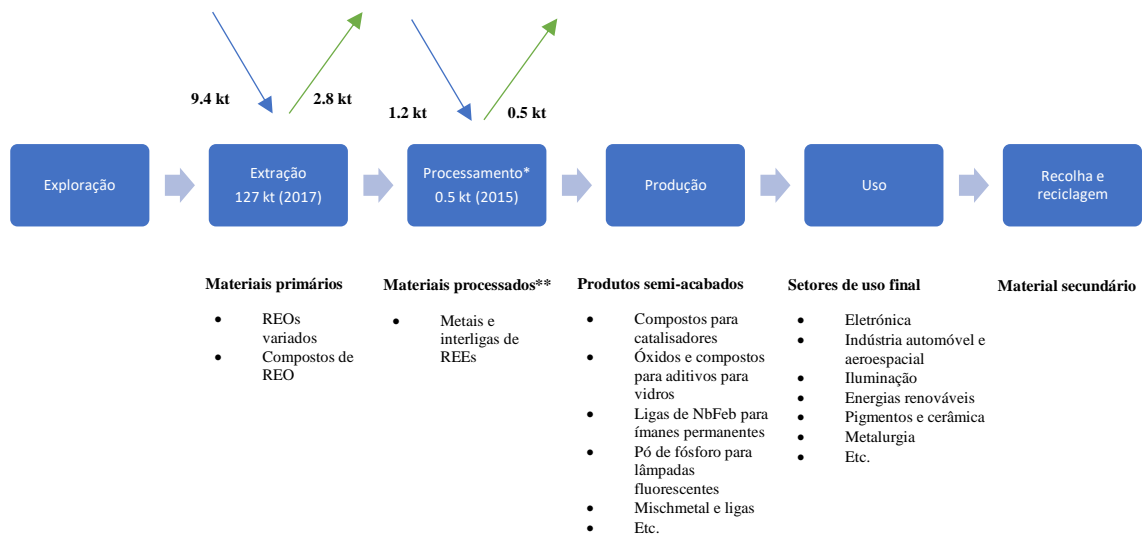


Figura 45 – Cadeia de valor simplificada dos REE para a UE, média de 2012-2016 (Fonte: Adaptado de European Commission, 2020a). Importações representadas a setas pretas e exportação a setas verdes

O neodímio vê-se como uma das MPC com maior importância para a transição para uma economia de baixo carbono e para o combate às alterações climáticas, principalmente pela sua utilização em ímãs permanentes para geradores de eletricidade e motores elétricos. Apresenta uma EoL-RIR baixa, prevê-se o aumento do preço desta MPC e apresenta um risco de fornecimento bastante elevado, devido à dominância da China na produção de REE, sendo assim imprescindível garantir uma cadeia de abastecimento sustentável.

5.3 Identificação de potenciais estratégias de economia circular a aplicar

Tal como referido no capítulo 2, a economia circular é um sistema restaurador e regenerativo por intenção e design, que suporta o funcionamento do ecossistema e o bem-estar humano com o objetivo de alcançar o desenvolvimento sustentável. Substitui o conceito de fim de vida por fechar, desacelerar e estreitar os fluxos de recursos nos processos de produção, distribuição e consumo, extraindo valor económico e utilidade de materiais, equipamentos e bens pelo maior tempo possível, em ciclos energizados por fontes renováveis. É possibilitado por design, inovação, novos negócios e modelos organizacionais e produção e consumo responsáveis (Rocha, C et al, 2020).

No caso específico das MPC em análise, as estratégias de EC assentam principalmente nas etapas da produção/extração, minimizando a poluição associada a esta etapa e pela reintrodução de material secundário, na etapa de utilização pelo aumento do tempo de vida útil dos produtos em que são utilizadas, e no fim de vida pela garantia da recolha e valorização desses produtos e, conseqüentemente, das MPC.

Na etapa de recolha e valorização dos produtos em fim de vida, é especialmente relevante a recuperação das MPC que esses produtos contêm, permitindo a posterior reintrodução na cadeia de valor, seja pela venda deste material secundário obtido ou pelo *blending* com material primário extraído.

De acordo com Mosangini & Tunçer (2020), as cinco áreas de estratégias de negócios sustentáveis aplicadas às etapas do ciclo de vida de um produto são:

1. Prevenir a poluição e economizar recursos - *Prevent Pollution & Save Resources*;
2. Recuperar recursos após deposição/descarte - *Recover resources after disposal*;
3. Estender o uso de recursos e reduzir a deposição/descarte - *Extend resource use and reduce disposal*;

4. Aumentar a taxa de utilização de recursos - *Increase resource utilisation rate*;
5. Transição para abastecimento e design circular - *Shift to circular supplies and design*.

A primeira área, ***Prevent Pollution & Save Resources***, está relacionada com a prevenção da poluição e economizar recursos. Numa perspetiva de sustentabilidade de negócio, esta área visa reduzir os recursos necessários para a produção de produtos, minimizar emissões e reduzir a produção de resíduos associados.

Especialmente relevante no âmbito deste trabalho estão os avanços tecnológicos que permitam a redução das necessidades de MPC para a produção de produtos que os contêm. Tal redução permitirá a diminuição na procura de MPC.

Considerando que esta área inclui a extração e compra de matérias-primas, é de considerar os resíduos da extração, bastante pertinente considerando a extração em Portugal de tungsténio.

Tal como já referido neste documento, em termos de circularidade, reaproveitar as MPC que possam estar presentes nos resíduos da indústria extrativa pode reduzir a necessidade de tratar e armazenar resíduos extrativos bem como reduzir a necessidade de extração primária destas.

Das 3 MPC definidas para Portugal, só se efetua presentemente a extração de tungsténio, mas no passado efetuou-se também de antimónio.

Seria pertinente avaliar a quantidade de tungsténio presente nos resíduos extrativos em Portugal para potencial valorização e reintrodução na cadeia de valor, bem como, se ainda existentes, os resíduos extrativos da exploração de antimónio que decorreu até 1967.

Ainda relacionado com esta área de atuação temos a produção de produtos que contêm as 3 MPC definidas, e que se identificaram no ponto anterior.

Tendo em conta uma priorização de atuação para a transição nacional para uma EC, a identificação das indústrias produtoras ou importadoras destes produtos é essencial, permitindo o controlo ou influência sobre a cadeia de valor a jusante.

Assim que identificados os operadores responsáveis pela fabricação e/ou colocação no mercado destes produtos a implementação de medidas que visem garantir uma maior circularidade será mais eficaz. Embora parte dos produtos produzidos contendo estas 3 MPC tenham elevadas taxas de recolha, principalmente pela sua utilização em ambiente industrial, como é caso dos produtos que contêm Tungsténio e que permitem uma EoL-RIR consideravelmente superior à das restantes MPC (*vide Quadro 26*), existem muitos outros utilizados pela população no geral que carecem de iniciativas e legislação mais eficaz que permita a sua recolha.

Neste âmbito, sumariza-se o seguinte:

- Identificação das MPC definidas nos resíduos da indústria extrativa e avaliação do potencial da sua valorização;
- Identificação dos operadores económicos responsáveis pela fabricação e/ou colocação no mercado de produtos que contêm estas MPC;
- Adoção de iniciativas e criação de legislação específica para estes produtos, que garanta ou promova a responsabilidade dos operadores económicos e dos utilizadores no aumento da vida útil destes produtos.

A segunda área/estratégia, ***Recover resources after disposal***, visa prevenir que recursos sejam descartados durante o ciclo de vida do produto, especialmente no seu fim de vida. O objetivo principal é reduzir a quantidade de resíduos depositados e colocados em aterro e promover a sua reutilização e reciclagem.

A este nível, as sinergias e complementaridades entre empresas e setores tornam-se críticas. A aplicação de estratégias de simbiose industrial pode cobrir as necessidades complementares das empresas, combinando e harmonizando os seus processos de produção: os requisitos de gestão de resíduos de uma empresa atendem às necessidades de recursos de outra empresa. Assim, os subprodutos, resíduos e emissões de um processo produtivo tornam-se *inputs* noutra processo (Mosangini & Tunçer, 2020).

Para implementar esta estratégia, é imprescindível que o *design* dos produtos promova a sua desmontagem, remontagem e reciclagem, mas também a promoção da recolha destes produtos para a sua valorização.

Esta estratégia depende fortemente dos produtores dos produtos, que têm a possibilidade de afetar a cadeia de valor a jusante destes e promover a extensão do tempo de vida útil do produto e a sua valorização no fim de vida.

Em Portugal, e em concordância com o referido para a primeira área/estratégia, é importante identificar os operadores económicos responsáveis pela produção ou pela importação e colocação no mercado nacional dos produtos que contêm estas MPC, para que se os possa influenciar.

Numa segunda vertente, promover a simbiose entre estes operadores económicos e os operadores de gestão de resíduos é imprescindível para a aplicação prática destas estratégias. Esta simbiose a nível nacional depende também da capacidade tecnológica e/ou de investimento no setor do tratamento de resíduos, uma vez que caso contrário estes produtos em fim de vida terão de ser encaminhados para operadores de gestão de resíduos fora do território nacional para a sua valorização, diminuindo o potencial de circularidade e proveito económico a nível nacional.

A terceira área/estratégia, *Extend resource use and reduce disposal*, vai de encontro ao já referido, tendo como objetivo, na medida do possível, estender a vida útil de um produto e evitar o seu descarte.

Esta estratégia está ligada principalmente à etapa de uso e manutenção e àsecoinovações relacionadas com a conceção do produto (Mosangini & Tunçer, 2020).

Os modelos de negócios que permitem implementar esta estratégia são:

- Design para durabilidade e modularidade;
- Recolha e Reciclagem;
- Reparação e atualização;
- Reutilização e revenda.

Novamente, o *design* ecológico é crucial para impulsionar esta estratégia, uma vez que a vida do produto é essencialmente determinada pela etapa de conceção.

O design modular, por exemplo, pode facilitar a reparação e substituição de componentes de um produto, alargando a sua vida útil. Todos os produtos devem ser facilmente desmontados e todos os materiais que eles contêm devem ser identificados e de fácil separação (Mosangini & Tunçer, 2020).

O potencial de adoção de estratégias de circularidade a nível nacional, no âmbito deste trabalho e nesta etapa, carece de casos de estudo e de investigação. A única forma de aplicar este tipo de estratégias que permitam a extensão do tempo de vida útil de um produto tem primeiramente de identificar quem os produz ou importa para território nacional, e só posteriormente, através de contacto direto com estes operadores económicos, implementar medidas que possam efetivamente aumentar a circularidade.

A quarta área/estratégica, *Increase resource utilisation rate*, tem como objetivo aumentar a taxa de utilização dos recursos.

A forma mais eficaz de aumentar a taxa de utilização de recursos é focar na funcionalidade em vez do produto. De facto, no modelo económico linear, a própria fonte de criação de valor é o produto, enquanto no modelo económico circular é a funcionalidade / desempenho (De Schoenmakere & Gillabel, 2017).

Uma estratégia essencial para vender funcionalidade em vez de propriedade de produtos é a servitização. As empresas evoluem da venda de produtos para modelos de “produto como serviço”, que fornecem funcionalidade por meio de uma entrega combinada de produtos e serviços (Mosangini & Tunçer, 2020).

Neste sentido, é também de salientar a promoção da devolução dos produtos às empresas. Para que tal ocorra, é necessário criar infraestruturas e mecanismos de logística inversa, que permitam a devolução dos produtos pelos consumidores. Esta é uma oportunidade bastante interessante e já implementada por algumas organizações, tal como referido em Rocha et al. (2020) para o caso do IKEA.

Um modelo de negócio baseado em serviços estimula também as empresas, que mantêm a propriedade dos produtos, a inovar de uma forma sustentável os seus produtos, garantindo a máxima eficiência nos processos produtivos, ciclos fechados na gestão dos recursos e a maior vida útil dos produtos.

Para além disto, a “garantia” da devolução permite também que as próprias empresas valorizem esses produtos e, na medida, do possível, reutilização e reintegrem no seu processo produtivo parte destes, minimizando a percentagem de material que é efetivamente resíduo.

Por último, a quinta área/estratégia, *Shift to circular supplies and design*, visa a passagem de recursos finitos para recursos renováveis, respeitando os ciclos de regeneração natural. Diz respeito não apenas à etapa de extração da matérias-primas, mas também a todas as outras etapas do ciclo de vida de um produto / serviço (Mosangini & Tunçer, 2020).

As cinco principais estratégias de desenvolvimento de modelos de negócios sustentáveis que analisadas em Mosangini & Tunçer (2020) carecem de uma estratégia complementar 5+1, que é uma condição para sua viabilidade: a procura por produtos e serviços circulares deve ser facilitada e aumentada. Sem uma mudança radical no comportamento e estilo de vida dos consumidores, a maioria dos modelos de negócios “verdes” não será viável.

É assim de extrema importância, para além das medidas implementadas e a implementar direcionadas para o setor industrial, aumentar a consciencialização da população geral para a importância da transição para uma EC.

Em suma, existe uma diversidade de potenciais estratégias de circularidade que permitirão aumentar a circularidade das MPC definidas.

Tal como referido acima, para a aplicação prática destas estratégias deve ser avaliado o real potencial de circularidade tendo em conta o poder de controlo e influência das etapas de ciclo de vida. No caso do tungsténio, sendo extraído em Portugal, existem todas as possibilidades para criar um sistema que promova a EC em todas as etapas do ciclo de vida. Ainda assim, parte dos produtos que contêm tungsténio são importados e é imprescindível esta contabilização, que poderá permitir avaliar a viabilidade técnica e económica de criar infraestruturas que permitam fechar o ciclo do tungsténio em território nacional.

Paras as outras duas MPC (neodímio e antimónio), não sendo efetuada a extração em território nacional no presente momento, o controlo e influência no ciclo de vida poderá ser menor, e a priorização de estratégias de circularidade devem focar-se na extensão do ciclo de vida dos produtos que os contêm e na promoção da valorização destes em fim de vida, para posterior reintrodução na cadeia de valor.

É ainda de salientar que estas estratégias de circularidade permitem não só aumentar a circularidade destas MPC como de outros materiais que constituem esses e outros produtos. A título de exemplo, o neodímio é essencialmente utilizado para a produção de ligas de neodímio-ferro-boro (NdFeB), utilizados no setor das energias renováveis.

Se estas estratégias de circularidade forem aplicadas com a especificidade e detalhe necessário a este setor, permitirá não só a recuperação desta MP como de outras utilizadas neste, como é caso do praseodímio (Pr), disprósio (Dy), índio (In), entre outras.

Para a aplicação prática destas estratégias de circularidade, para além do estudo da sua viabilidade técnica e económica no presente, devem ser identificados e contactados os operadores da cadeia de valor destes produtos, no sentido de verificar as dificuldades para esta transição e poder propor soluções que permitam ultrapassar estas dificuldade e aumentar, progressivamente e de forma sustentável, a circularidade destes materiais.

6º Capítulo

6.1 *Conclusões e perspectivas de trabalho futuro*

O presente trabalho teve como objetivos principais providenciar um enquadramento da EC e das MPC a nível Europeu e Nacional, definir as 3 MPC com maior relevância para Portugal, efetuar uma caracterização das 3 MPC e identificação dos grandes grupos de produtos onde são utilizadas e identificar potenciais estratégias de circularidade para as 3 MPC definidas.

Inicialmente, efetuou-se uma revisão bibliográfica sobre as temáticas da sustentabilidade e da economia circular, providenciando um importante enquadramento para a temática em estudo e a sua importância a nível global.

Esta revisão bibliográfica permitiu ainda compilar um conjunto de informação sobre as MPC a nível europeu e nacional, bem como tendências atuais e previsões futuras de utilização das mesmas em determinados setores estratégicos, com bastante relevância para a posterior avaliação efetuada com recurso ao método MACBETH (Measuring Attractiveness By a Categorical Based Evaluation Technique).

As metodologias multicritério de apoio à decisão (MMAD) são uma importante ferramenta no apoio à decisão quando esta contempla diversos tipos de informação e diferentes pontos de vista, muitas vezes conflitantes. Estas metodologias têm sido utilizadas e a sua utilidade demonstrada em muitos problemas de gestão e relacionados com a sustentabilidade.

O MACBETH é uma abordagem multicritério de apoio à decisão que permite utilizar apenas julgamentos qualitativos para avaliar diferenças de atratividade, com o objetivo de determinar pontuações para um conjunto de alternativas (i.e. opções). Assim, uma das grandes vantagens desta abordagem é precisamente o facto de que, embora permita comparar opções tendo por base medições de desempenho quantitativas, permite obter pontuações efetuando apenas julgamentos qualitativos de diferenças de atratividade entre as opções, motivo pelo qual se optou pela escolha desta abordagem.

Através da utilização do software M-MACBETH, foram definidos um conjunto de critérios (i.e. pontos de vista fundamentais) considerando o ciclo de vida destas matérias-primas críticas e posteriormente comparadas, duas a duas, para cada um dos critérios definidos. Este software apresenta, após todos os julgamentos efetuados, uma escala que permite hierarquizar de entre as alternativas (i.e. opções) aquelas que apresentam maior pontuação de acordo com os critérios definidos e julgamento efetuados.

Os resultados permitiram verificar que as 3 matérias-primas críticas com maior relevância a nível nacional, de acordo com os critérios definidos e julgamentos efetuados, são o tungsténio, o antimónio e o neodímio. Estes resultados justificam-se pelo facto destas 3 MPC apresentarem pontuações elevadas em grande parte dos critérios em avaliação, especialmente dos critérios com maior peso.

Posteriormente, foi efetuada a caracterização destas 3 matérias-primas críticas e identificados os grandes grupos de produtos onde são utilizados.

O tungsténio apresenta um elevado desempenho e as suas principais aplicações na UE (fabricação de carbonetos de tungsténio, metal de tungsténio, ligas de tungsténio, aços contendo tungsténio e para fabricação de aplicações químicas) são utilizadas em ambiente industrial, que permite uma EoL-RIR elevada. A nível nacional, esta MPC vê-se como especialmente relevante, sendo Portugal um dos principais países produtores da UE, contabilizando aproximadamente 31% do fornecimento, produzindo concentrado de volframate da Mina da Panasqueira.

Já para o antimónio, grande parte da produção na UE é direcionada para a produção de ligas de chumbo para baterias de chumbo-ácido e retardadores de chama. A UE apresenta uma dependência de 100% de importação de antimónio, uma vez que a produção de concentrados de antimónio é inexistente na EU, embora tenha sido explorado até 1967 em Portugal.

Considerando esta elevada dependência e que se perspetiva um aumento na procura para os próximos 20 anos, é bastante relevante a adoção de medidas que permitam assegurar a sustentabilidade da cadeia de abastecimento desta matéria-prima.

O neodímio é considerado um LREE e um dos mais abundantes. A sua principal utilização é em ímanes permanentes NdFeB, essencial na produção de produtos de alta tecnologia e de baixo-carbono, como

veículos elétricos, turbinas eólicas, baterias e lâmpadas com baixo consumo de energia. Em conjunto com o praseodímio, representam 75% do valor total de REE e 20% do volume.

A dominância da produção de REE pela China faz com que os REE tenham um risco de fornecimento mais elevado de entre as matérias-primas críticas da UE. Para uma transição para uma economia de baixo-carbono estas matérias-primas são essenciais, prevenindo-se o aumento da procura nos próximos anos, sendo igualmente imprescindível a adoção de medidas que permitam garantir uma cadeia de abastecimento sustentável.

Em termos de economia circular, embora identificadas algumas estratégias que permitiriam aumentar a circularidade destas matérias-primas, bem como de outras utilizadas nos principais setores em que as 3 com maior relevância para Portugal são utilizadas, a sua aplicação prática em território nacional carece de maior estudo e investigação.

Para que se avalie o potencial de circularidade em Portugal é essencial identificar os operadores económicos responsáveis pela produção e colocação no mercado de produtos que contêm estas matérias-primas no sentido de apoiar e influenciar a transição para uma economia circular, verificar as potenciais dificuldades para esta transição e apoiar nas soluções e tomadas de decisão.

Também imprescindível é a criação de infraestruturas de logística inversa e fomentar a simbiose industrial entre os produtores/colocadores no mercado e os operadores de gestão de resíduos, para que se possa fechar o ciclo e aumentar a quantidade de matérias-primas secundárias a entrar novamente no ciclo produtivo. Outra estratégia que depende fortemente desta identificação é o aumento da vida útil dos produtos e a redução do descarte destes, que é bastante influenciada pela fase de conceção e potenciais serviços de manutenção durante a sua vida útil.

Assim, como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se a identificação do real potencial em território nacional da aplicação de estratégias de circularidade focada nestas e noutras matérias-primas críticas, pela identificação dos operadores económicos da cadeia de valor destes produtos, avaliação tecnológica e viabilidade económica em Portugal para a sua valorização e soluções que possam permitir fechar o ciclo em território nacional, evitando o encaminhamento destes recursos para outros países.

Por último, deverão ser periodicamente analisados os resultados obtidos neste trabalho, uma vez que novas listas publicadas poderão implicar a avaliação de um conjunto de diferentes MPC, bem como para contemplar eventuais atualizações nos dados de base dos critérios e ajuste dos próprios critérios definidos.

Bibliografia

- Adamas Intelligence. (2019). *Electric Growth: EVs, Motors and Motor Materials*. Disponível em https://mailchi.mp/adamasintel/electric_growth.
- Adamas Intelligence. (2019a). Rare Earth Elements: Market Issues and Outlook. Disponível em <http://www.adamasintel.com/wp-content/uploads/2019/07/Adamas-Intelligence-Rare-Earths-Market-Issues-and-Outlook-Q2-2019.pdf>.
- BANA Consulting (2017). M-MACBETH A Multiple Criteria Decision Support System. Disponível em <https://m-macbeth.com/>.
- Bana e Costa, C. A.; Vansnick, J. C. (1995). Uma Nova Abordagem Ao Problema Da Construção De Uma Função De Valor Cardinal: Macbeth. *Investigação Operacional vol 15, 15-35*. Disponível em <http://web.ist.utl.pt/carlosbana/Uma%20nova%20abordagem%20ao%20problema....pdf>.
- Bana e Costa, C. A., Corte, J. D., & Vansnick, J. C. (2003). MACBETH. (Overview of MACBETH multicriteria decision analysis approach). *International Journal of Information Technology and Decision Making, 11(2), 359-387*.
- Bana e Costa, C. A., & Beinat, E. (2010). Estruturação de Modelos de Análise Multicritério de Problemas de Decisão Pública. Centro de Estudos de Gestão do Instituto Superior Técnico – CEG-IST. Artigo de Investigação / Working Paper No 3/2010. Disponível em https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779577262328/WP%20CEG-IST%2003_2010.pdf.
- Bana e Costa, C. A., de Corte, J.-M., & Vansnick, J.-C. (2011). MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique). In *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*. <https://doi.org/10.1002/9780470400531.eorms0970>.
- Bana e Costa, C. A., Corte, J. D., & Vansnick, J. C. (2017). M-MACBETH (BETA) Guia do utilizador. Disponível em <http://m-macbeth.com/pt-pt/demo-pt/>.
- Beatriz, V.-L., Blengini, G. A., Mathieux, F., Latunussa, C., Mancini, L., Nita, V., ... Pennington, D. (2018). *Raw Materials Scoreboard 2018*. European Commission, EIP on Raw Materials. <https://doi.org/10.2873/13314>.
- Beinat, E. (1997). Value Functions for Environmental Management. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8885-0_4.
- BIO by Deloitte. (2015). *Study on Data for a Raw Material System Analysis: Roadmap and Test of the Fully Operational MSA for Raw Materials*. Prepared for the European Commission, DG GROW. Disponível em <https://ec.europa.eu/jrc/en/scientific-tool/msa>.
- Blagoeva, D.T., Alves Dias, P., Marmier, A., Pavel, C.C. (2016). *Assessment of potential bottlenecks along the materials supply chain for the future deployment of low-carbon energy and transport technologies in the EU. Wind power, photovoltaic and electric vehicles technologies, time frame: 2015-2030*. Disponível em <https://op.europa.eu/pt/publication-detail/-/publication/0bdb7fc-b214-11e6-871e-01aa75ed71a1/language-en>.
- Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J., Mathieux, F., & Pavel, C. (2020). *Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU - a Foresight Study*. European Commission. <https://doi.org/10.2873/58081>.
- Brans, J.P. (1982). L'ingénierie de la décision : élaboration d'instruments d'aide à la décision. La méthode PROMETHEE. *L'aide à la décision: Nature, instruments et perspectives d'avenir*, 183-214.
- CEC. (2015). *Environmentally Sound Management of End-of-Life Batteries from Electric-Drive Vehicles in North America*. Montreal, Canada: Commission for Environmental Cooperation. 103 pp. Disponível em <http://www3.cec.org/islandora/en/item/11637-environmentally-sound-management-end-life-batteries-from-electric-drive-vehicles-en.pdf>.
- Chancerel, P., Marwede, M., Mathieux, F., & Peiro, L. T. (2017). *Would the setting-up of reference values to support the calculation of recyclability rates help improving the material efficiency of electronic products?*. Electronics Goes Green 2016+ (EGG 2016) conference. <https://doi.org/10.1109/EGG.2016.7829854>.
- Cinelli, M., Coles, S. R., & Kirwan, K. (2014). Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecological Indicators, 46, 138-148*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.011>.

- Circular Economy Portugal (2021). Circular Economy Portugal. Disponível em <https://www.circulareconomy.pt/>.
- COM(2008) 699 final. Comunicação da comissão ao parlamento europeu e ao conselho. Iniciativa «matérias-primas» — Atender às necessidades críticas para assegurar o crescimento e o emprego na europa. Bruxelas, 4.11.2008. Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A52008DC0699>.
- COM(2019) 640 final. Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social europeu e ao Comité das Regiões, Pacto Ecológico Europeu. Bruxelas, 11.12.2019. Acedido a 11/04/2021. Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>.
- COM(2020) 474 final. Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social europeu e ao Comité das Regiões, Resiliência em matérias-primas essenciais: o caminho a seguir para mais segurança e sustentabilidade. Bruxelas, 3.9.2020. Acedido a 11/04/2021. Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0474>.
- COM(2020) 98 final. Comunicação da comissão ao parlamento europeu, ao conselho, ao comité económico e social europeu e ao comité das regiões, Um novo Plano de Ação para a Economia Circular, Para uma Europa mais limpa e competitiva. Bruxelas, 11.3.2020. Acedido a 06 de junho de 2020. Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098>.
- De Schoenmakere, M., & Gillabel, J. (2017). *Circular by design: Products in the circular economy* (European Environment Agency Report No 6/2017). Disponível em <https://www.eea.europa.eu/publications/circular-by-design>.
- de Wit, M., Hoogzaad, J., & von Daniels, C. (2020). *The Circularity Gap Report 2020*. Disponível em <https://www.circularity-gap.world/2020>.
- Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro da Presidência do Conselho de Ministros. Diário da República n.º 239/2020, 1º Suplemento, Série I de 2020-12-10. Acedido a 10 de janeiro de 2021. Disponível em <https://dre.pt/home/-/dre/150908012/details/maximized>.
- Decreto-Lei n.º 152-D/2017, de 11 de dezembro do Ministério do Ambiente. Diário da República n.º 236/2017, 2º Suplemento, Série I de 2017-12-11. Acedido a 05 de junho de 2020. Disponível em <https://dre.pt/home/-/dre/114337042/details/maximized>.
- Deloitte Sustainability, British Geological Survey, Bureau de Recherches Geologiques et Minières, Netherlands Organisation for Applied Scientific Research. (2017). *Study on the review of the list of Critical Raw Materials — Criticality Assessment*. Report prepared for the European Commission. <https://doi.org/10.2873/876644>.
- Diretiva 1999/31/CE do Conselho, de 26 de Abril de 1999, relativa à deposição de resíduos em aterros. Jornal Oficial de União Europeia L 266/1 de 26/09/2006. Acedido a 15/11/2020. Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A31999L0031>.
- Diretiva 2006/66/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 6 de Setembro de 2006, relativa a pilhas e acumuladores e respectivos resíduos e que revoga a Directiva 91/157/CEE (Texto relevante para efeitos do EEE). Jornal Oficial de União Europeia L 182/1 de 16/07/1999. Acedido a 14/07/2020 e disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32006L0066>.
- Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de julho de 2012, relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos (REEE). Jornal Oficial de União Europeia L 197/38 de 27/04/2006. Acedido a 26/05/2021. Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32012L0019>.
- Diretiva 2014/52/UE, de 16 de abril do Parlamento Europeu e do Conselho, que altera a Diretiva 2011/92/UE relativa à avaliação dos efeitos de determinados projetos públicos e privados no ambiente. Jornal Oficial da União Europeia L 124/1. Acedido a 22 de Novembro de 2020. Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX%3A32014L0052>.
- Diretiva 94/62/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 20 de dezembro de 1994, relativa a embalagens e resíduos de embalagens. Jornal Oficial da União Europeia L 365/10. Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:31994L0062>.
- Dodgson, J & Spackman, M., Pearman, A. & Phillips, L. (2009). *Multi-Criteria Analysis: A Manual*. Department for Communities and Local Government: London.
- Ehrenfeld, J. R. (2005). The Roots of Sustainability. *MIT Sloan Management Review*, 46, 23-25.

- Ellen MacArthur Foundation. (2012). *Towards a Circular Economy Vol 1: an economic and business rationale for an accelerated transition*. Ellen MacArthur Foundation. Disponível em <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an-accelerated-transition>.
- Ellen MacArthur Foundation. (2017). *A new textiles economy: Redesigning fashion's future*. Ellen MacArthur Foundation. Disponível em https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/A-New-Textiles-Economy_Full-Report_Updated_1-12-17.pdf.
- Ellen MacArthur Foundation. (2017a). *Circular Economy Case Studies*. Disponível em <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/case-studies>.
- Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Completing the picture: How the circular economy tackles climate change*. Ellen MacArthur Foundation. Disponível em https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Completing_The_Picture_How_The_Circular_Economy_-_Tackles_Climate_Change_V3_26_September.pdf.
- EuroGeoSurvey (2021). *OneGeology-Europe*. Disponível em <https://www.eurogeosurveys.org/projects/onegeology-europe/>.
- EuroGeoSurvey (2021a). *ProMine*. Disponível em <https://www.eurogeosurveys.org/projects/promine/>.
- EuroGeoSurvey (2021b). *EuroGeoSource*. Disponível em <https://www.eurogeosurveys.org/projects/eurogeosource/>.
- EuroGeoSurvey (2021c). *InGeoCloudS*. Disponível em <http://www.eurogeosurveys.org/projects/ingeoclouds/>.
- European Commission (2014b). *Report on Critical Raw Materials for the Eu Critical Raw Materials Profiles*. Disponível em https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en.
- European Commission. (2014a). *Ecodesign your future: How ecodesign can help the environment by making products smarter*. Disponível em <https://op.europa.eu/pt/publication-detail/-/publication/4d42d597-4f92-4498-8e1d-857cc157e6db>.
- European Commission. (2017). *Methodology for establishing the EU list of Critical Raw Materials*. Publications Office of the European Union. Disponível em <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/2d43b7e2-66ac-11e7-b2f2-01aa75ed71a1>.
- European Commission. (2020). *Study on the review of the list of Critical Raw Materials - Final Report*. Publications Office of the European Union. Disponível em <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/08fdab5f-9766-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en#>.
- European Commission. (2020a). *Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020) Critical Raw Materials Factsheets (Final)*. Disponível em <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/?page=factsheets-2020-dfe63e>.
- European Environment Agency. (2019). *The EU Emissions Trading System in 2019: trends and projections*. Briefing No 9/2019. Disponível em <https://www.eea.europa.eu/publications/the-eu-emissions-trading-system>.
- European Political Strategy Centre. (2018). *10 Trends Reshaping Climate and Energy*. Disponível em <https://op.europa.eu/pt/publication-detail/-/publication/a6014988-10d2-11ea-8c1f-01aa75ed71a1/language-en>.
- European Union Urban Mine Knowledge Data Platform (EU-UMKDP). (2015-2018). *Urban Mine Platform*. Disponível em <http://www.urbanmineplatform.eu/homepage>.
- EUROSTAT (2021). *Municipal waste by waste management Operations*. Acedido a 11/04/2021. Disponível em <https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>.
- EUROSTAT (2021a). *Generation of municipal waste per capita (kg per capita)*; Acedido a 11/04/2021; Disponível em https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_pc031/default/table?lang=en.
- EUROSTAT (2021b). *Recycling rate of municipal waste (%)*; Acedido a 11/04/2021; Disponível em https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_wm011/default/table?lang=en.
- EUROSTAT (2021c). *Generation of waste excluding major mineral wastes per domestic material consumption (%)*; Acedido a 11/04/2021; Disponível em https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_pc033/default/table?lang=en.

- EUROSTAT (2021d). Generation of waste excluding major mineral wastes per GDP (Kg por mil euros); Acedido a 11/04/2021; Disponível em https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_pc032/default/table?lang=en.
- EUROSTAT (2021e). Recycling rate of municipal waste (mil toneladas); Acedido a 11/04/2021; Disponível em https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_wm011/default/table?lang=en.
- EUROSTAT (2021f). Recycling of biowaste (kg per capita); Acedido a 11/04/2021; Disponível em https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_wm030/default/table?lang=en.
- EUROSTAT (2021g). Recycling rate of e-waste (%); Acedido a 11/04/2021; Disponível em https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_wm050/default/table?lang=en.
- EUROSTAT (2021h). Recycling rate of packaging waste by type of packaging (%); Acedido a 11/04/2021; https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_wm020/default/table?lang=en.
- EUROSTAT (2021i). Circular material use rate (% of total material use); Acedido a 11/04/2021; Disponível em https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_srm030/default/table?lang=en.
- EUROSTAT (2021j). Private investments, jobs and gross value added related to circular economy sectors (milhões de euros); Acedido a 11/04/2021; Disponível em https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_cie010/default/table?lang=en.
- EUROSTAT (2021k). Recovery rate of construction and demolition waste (% of construction and demolition mineral waste recycled); Acedido a 11/04/2021; Disponível em https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_wm040/default/table?lang=en.
- EUROSTAT (2021l). Recycling rate of all waste excluding major mineral waste (%); Acedido a 11/04/2021; Disponível em https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_wm010/default/table?lang=en.
- EUROSTAT (2021m). Trade in recyclable raw materials (toneladas); Acedido a 11/04/2021; Disponível em https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_srm020/default/table?lang=en.
- EUROSTAT (2021n). Generation of waste by waste category, hazardoussness and NACE Rev. 2 activity. Acedido a 11/04/2021. Disponível em https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_wasgen&lang=en.
- EUROSTAT (2021o). Patents related to recycling and secondary raw materials. Acedido a 11/04/2021. Disponível em http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=cei_cie020&lang=en.
- Ezbakhe, F., & Pérez-Foguet, A. (2021). Decision analysis for sustainable development: The case of renewable energy planning under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 291 - issue 2, 601–613. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.02.037>.
- FCT. (2019). *Agenda Temática de Investigação e Inovação Economia Circular*. FCT, Lisboa. Disponível em <https://doi.org/10.34621/fct.edicoes.agendastematicas-1>.
- Figueira, J., Greco, S., & Ehr Gott, M. (2005). *Multiple criteria decision analysis : state of the art surveys*. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys, 78. <https://doi.org/10.1007/b100605>.
- Freudenberg, M. (2003). *Composite Indicators of Country Performance: A Critical Assessment*. OECD Science, Technology and Industry Working Papers, No. 16. <https://doi.org/10.1787/405566708255>.
- Frini, A., & Ben Amor, S. (2019). MUPOM: A multi-criteria multi-period outranking method for decision-making in sustainable development context. *Environmental Impact Assessment Review*, 76, 10–25. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.11.002>.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy - A new sustainability paradigm?. *Journal of cleaner production*, 143, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>.
- Georgescu-Roegen, N. (1975). *Energy and Economic Myths*. Southern Economic Journal, 41(3). <https://doi.org/10.2307/1056148>.
- Greco, Salvatore & Ehr Gott, Matthias & Figueira, José. (2016). Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4>.
- Hertwich, E., Lifset, R., Pauliuk, S., Heeren, N. (2020). *Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future*. International Resource Panel. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya. Disponível em <https://www.resourcepanel.org/reports/resource-efficiency-and-climate-change>.
- ICMM. (2018). *Role of mining in national economies. Mining Contribution Index 2018. 4th Edition*. International Council of Mining & Metals. Disponível em <https://www.icmm.com/en-gb/research/social-performance/mci-4-2018>.

- IEA. (2019). *Renewables 2019 Analysis and forecast to 2024*. International Energy Agency, Paris. Disponível em <https://www.iea.org/reports/renewables-2019>.
- IHS Consulting. (2014). *The availability of automotive lead-based batteries for recycling in the EU*. Disponível em https://www.eurobat.org/images/news/publications/ihs_eurobat_report_lead_lores_final_2.pdf.
- ISO 15392:2019. Sustainability in buildings and civil engineering works — General principles. International Organization for Standardization. Disponível em <https://www.iso.org/standard/69947.html>.
- Johnston, P., Everard, M., Santillo, D., & Robèrt, K.-H. (2007). Reclaiming the Definition of Sustainability. *Environmental Science and Pollution Research International*, 14(1), 60–66.
- Kandakoglu, A., Frini, A., & Ben Amor, S. (2019). Multicriteria decision making for sustainable development: A systematic review. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 26 (5-6), 202–251. <https://doi.org/10.1002/mcda.1682>.
- Ke, C. (2020). A research of AHP approach in evaluating sustainable tourism development. Association for Computing Machinery International Conference on Information Management and Management Science. <https://doi.org/10.1145/3416028.3416037>.
- Boulding, K. E., & Jarrett, H. (1966). The economics of the coming spaceship earth: Environmental quality in a growing economy. *Resources for the Future*, 3-14. Disponível em http://arachnid.biosci.utexas.edu/courses/THOC/Readings/Boulding_SpaceShipEarth.pdf.
- Kumar, R., Madhu, E., Dahiya, A., & Sinha, S. (2015). Analytical hierarchy process for assessing sustainability. *World Journal of Science, Technology and Sustainable Development*, 12 (4), 281–293. <https://doi.org/10.1108/wjstd-05-2015-0027>.
- L. Maystre, J. Pictet, and Simos J. (1994). Méthodes Multicritères ELECTRE – Description, Conseils Pratiques et Cas d’Application à la Gestion Environnementale. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1360\(199612\)5:43.3.CO;2-#](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1360(199612)5:43.3.CO;2-#).
- Labie, R., Willems, G., Nelen, D., & Acker, K. Van. (2015). *Recuperation of critical metals in Flanders: Scan of possible short term opportunities to increase recycling*. Policy Research Center Sustainable Materials Management. Research paper 15. Disponível em https://center.vlaanderen-circulair.be/src/Frontend/Files/userfiles/files/Recuperation_of_Critical%20Metals%20in%20Flanders_research_paper_15.pdf.
- Lauri, L., Eilu, P., Brown, T., Gunn, G., Kalvig, P., & Sievers, H. (2018). *Identification and quantification of primary CRM resources in Europe*. Disponível em <http://screen.eu/results/>.
- LNEG (2021). Ecolab. Disponível em <https://www.lneg.pt/project/ecolab/>.
- LNEG (2021a). Circular star into business. Disponível em <https://www.lneg.pt/project/circular-start-into-business/>.
- Mathieux, F., Ardente, F., Bobba, S., Nuss, P., Blengini, G.A., Dias, P.A., Blagoeva, D., de Matos, C.T., Wittmer, D., Pavel, C. (2017). Critical raw materials and the circular economy. European Commission Joint Research Centre, Ispra, Italy. <https://doi.org/10.2760/378123>.
- McMichael, Anthony & Butler, Colin & Folke, Carl. (2004). New Visions for Addressing Sustainability. *Science (New York, N.Y.)*, 302, 1919-1920. <https://doi.org/10.1126/science.1090001>.
- Minerals4EU project. (n.d.). European Minerals Knowledge Data Platform (EU-MKDP). Disponível em <http://minerals4eu.brgm-rec.fr/>.
- Moradi, B., & Botte, G. G. (2016). Recycling of graphite anodes for the next generation of lithium ion batteries. *Journal of Applied Electrochemistry*, 46, 123-148. <https://doi.org/10.1007/s10800-015-0914-0>.
- Moreno-Jiménez, J. M., Aguarón-Joven, J., Escobar-Urmeneta, M. T., & Turón-Lanuz, A. (1999). Multicriteria procedural rationality on SISDEMA. *European Journal of Operational Research*, 119(2), 388–403. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00141-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00141-1).
- Mosangini, G. & Tunçer, B. (2020). *CIRCULAR ECONOMY Conceptual Framework to Guide the Development of Sustainable Business Mode*. UN Environment MAP Regional Activity Centre for Sustainable Consumption and Production (SCP/RAC). Disponível em <https://www.theswitchers.eu/wp-content/uploads/2020/03/Strategies-for-the-Development-of-Circular-Economy-Business-Model-FINAL....pdf>.
- Mudgal, S., Kong, M. A., Mitsios, A., Pahal, S., Lecerf, L., Acoleyen, M. Van, Lambert, S., Fedrigo, D. and Watkins, E. (2014). *Study on: "Ex-post evaluation of certain waste stream*

- Directives*". Publications Office of the European Union. Disponível em <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/3bba3339-9c4b-4936-bbb1-29b11442fb7d>.
- Munda, G. (2005). Multiple criteria decision analysis and sustainable development. *International Series in Operations Research and Management Science*, 78, 953–986. https://doi.org/10.1007/0-387-23081-5_23.
 - Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017). The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. *Journal of Business Ethics*, 140(3), 369–380. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>.
 - Mustajoki, J and Hamalainen, R.P (2000). Web- HIPPRE: global decision support by value tree and AHP analysis. *Information Systems and Operational Research*, 38(3), 208-220. <https://doi.org/10.1080/03155986.2000.11732409>.
 - Nuss, P., & Eckelman, M. J. (2014). Life cycle assessment of metals: A scientific synthesis. *PLoS ONE*, 9(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101298>.
 - Pearce, D.W. and R.K. Turner. (1990). *Economics of natural resources and environment*. John Hopkins University Press.
 - ProSUM (2021). Prospecting secondary Raw Materials in the Urban Mine and Mining Wastes. Disponível em <http://www.prosumproject.eu/urban-mine-knowledge-data-platform>.
 - RMIS. (2021). Raw Materials Information Systems. Acedido em 02/03/2021. Disponível em <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/?page=climate-low-carbon-cda228>.
 - Regulamento (CE) n.º 66/2010 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de novembro de 2009, relativo a um sistema de rótulo ecológico da EU. Jornal Oficial de União Europeia L 27/1 de 30/01/2010. Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32010R0066>.
 - República Portuguesa | Ambiente (2021). Portal eco.nomia. Disponível em <https://eco.nomia.pt/>.
 - Resolução de Conselho de Ministros n.º 107/2019, de 1 de julho da Presidência do Conselho de Ministros. Diário da República n.º 123/2019, Série I de 2019-07-01. Acedido a 05 de junho de 2020. Disponível em <https://dre.pt/home/-/dre/122777644/details/maximized>.
 - Resolução do Conselho de Ministros n.º 190-A/2017, de 11 de dezembro da Presidência do Conselho de Ministros. Diário da República n.º 236/2017, 2º Suplemento, Série I de 2017-12-11. Acedido a 05 de junho de 2020. Disponível em <https://dre.pt/home/-/dre/114337039/details/maximized>.
 - Resolução do Conselho de Ministros n.º 56/2015, de 1 de julho da Presidência do Conselho de Ministros. Diário da República n.º 147/2015, Série I de 2015-07-30. Acedido a 05 de maio de 2020. Disponível em <https://data.dre.pt/eli/resolconsmin/56/2015/07/30/p/dre/pt/html>.
 - Ritzén, S., & Sandström, G. Ö. (2017). Barriers to the circular economy - Integration of perspectives and domains. *Procedia CIRP*, 64, 7-12. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.005>.
 - Robinson, G.R., Jr., Hammarstrom, J.M., and Olson, D.W., 2017, Graphite, chap. J of Schulz, K., Seal, R., Bradley, D., & Deyoung, J. (2017). *Critical Mineral Resources of the United States - Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1802. <https://doi.org/10.3133/pp1802>.
 - Rocha, C., Camocho, D., Sampaio, J., & ... Chulvi, V. (2020). Product-Service Development for Circular Economy and Sustainability Course. LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia. Disponível em <http://repositorio.lneg.pt/handle/10400.9/3332>.
 - Roy, B. (1974). Criteres multiples et modelisation des preferences: l'apport des relations de surclassement. *Revue d'Economie Politique*. 84. 1-44.
 - Rudnick, R. L., & Gao, S. (2003). Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, 3, 1–64. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03016-4>.
 - Saaty, T.L. (1980). Saaty, T.L. (1980). The Analytic Hierarchy Process, Planning, Priority Setting, and Resource Allocation. McGraw-Hill, New York.
 - Saaty, T.L. & Forman, E. (1983). Expert Choice [Computer software]. Pittsburgh, Pa. : Expert Choice ; McLean, Va. : Decision Support Software, 1983-1998.
 - Salminen, P., Hokkanen, J., & Lahdelma, R. (1998). Comparing multicriteria methods in the context of environmental problems. *European Journal of Operational Research*, 104(3), 485–496. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00370-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00370-0).
 - Talukder, B., & Hipel, K. W. (2018). The PROMETHEE framework for comparing the sustainability of agricultural systems. *Resources*, 7(4), 74. <https://doi.org/10.3390/resources7040074>.

- Tercero Espinoza, L., Hummen, T., Brunot, A., Hovestad, A., Peña Garay, I., Velte, D., ... Joce, C. (2015). Critical Raw Materials Substitution Profiles. CRM_InnoNet. Disponível em http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-4455718.pdf.
- The World Bank Group. (2021), World Development Indicators. Disponível em <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>.
- Tsamis, A., & Coyne, M. (2015). *Recovery of Rare Earths from Electronic wastes: An opportunity for High-Tech SMEs*. IP/A/ITRE/2014-0. Disponível em [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/518777/IPOL_STU\(2015\)518777_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/518777/IPOL_STU(2015)518777_EN.pdf).
- Tsiarta, C., Watson, S. and Hudson, J. (2015). *Final Implementation Report for the Directive 2006/66/EC on Batteries and Accumulators*. Report for DG Environment, European Commission. Disponível em <http://ec.europa.eu/environment/waste/batteries/studies.html>.
- Waris, M., Panigrahi, S., Mengal, A., Soomro, M. I., Mirjat, N. H., Ullah, M., ... Khan, A. (2019). An application of analytic hierarchy process (ahp) for sustainable procurement of construction equipment: Multicriteria-based decision framework for malaysia. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019(2), 1-20. <https://doi.org/10.1155/2019/6391431>.
- World Mining Data. (n.d.). 6.6.Production of Mineral Raw Materials of individual Countries by Countries.xlsx. Acedido a 02/08/2020. Disponível em https://www.world-mining-data.info/?World_Mining_Data__Data_Section.
- Yang, J., Hu, X., Sundqvist, L., Eriksson, J., Yli-Rantala, E., Bacher, J., Drzazga, M, Retegan, T. (2018). *Production technologies of critical raw materials from primary resources*. SCRREEN Project D4.1. Disponível em <http://screen.eu/results/>.