
IMPACTOS MACROECONÓMICOS DAS MEDIDAS DE TRANSIÇÃO
CLIMÁTICA CONSAGRADAS NO PLANO DE RECUPERAÇÃO E
RESILIÊNCIA PARA PORTUGAL – ANÁLISE PREVISIONAL

Carlos Eduardo Malheiro dos Santos de Azevedo

Dissertação
Mestrado em Economia

Orientado por
Ana Paula Ribeiro
Vitor Carvalho

2024

“Ideas and only ideas can light the darkness.”

Ludwig Von Mises

Economic policy: thoughts for today and tomorrow (2006, p. 105)

Agradecimentos

Agradeço à Professora Doutora Ana Paula Ribeiro e ao Professor Doutor Vitor Carvalho, na qualidade de professores orientadores - Faculdade de Economia da Universidade do Porto -, pelo conhecimento partilhado, disponibilidade e debate crítico que promoveram ao longo deste percurso.

À minha família pelo apoio incondicional e suporte em todos os momentos, mesmo naqueles menos bons, agradeço pelo amor e por me fazerem acreditar que consigo tudo e sou destinado a algo bom.

À minha namorada, Renata, por me acompanhar neste percurso todo e por ter partilhado comigo todos os momentos na faculdade e de me guiar e iluminar sempre para um caminho bom e feliz.

A todos os meus colegas e amigos, que marcaram o meu percurso, agradeço pelo companheirismo, amizade e motivação. Todos contribuíram para o meu crescimento pessoal e tornaram-me uma pessoa melhor.

Resumo

O presente projeto de dissertação consiste na apresentação sumária de uma investigação que pretende analisar e qualificar os efeitos económicos resultantes das medidas de transição climática previstas no Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) português, numa área que pode ser chamada de “Economia dos Incentivos Verdes” - enquadrada no âmbito da Economia da Energia -, tendo como elemento de aproximação os apoios financeiros ao investimento do PRR, na sua dimensão climática.

A investigação começa, necessariamente, pela procura de aspetos ontológicos sobre a transição climática e a sua relação com o crescimento económico, os incentivos do PRR e a sua importância “verde” no cenário nacional; passa pela aplicação do Modelo MPC-DICE, através da assunção de certos pressupostos e de um raciocínio logico-dedutivo, e correspondente análise da previsão do impacto no crescimento económico resultante da execução das medidas do PRR; e termina com a interpretação dos resultados, que permite concluir que há uma correlação entre a utilização de verbas das medidas de financiamento para a transição climática previstas no PRR, a redução de emissões de CO₂ e o Produto Interno Bruto português.

Esta dissertação, de carácter exploratório, oferece um contributo importante no alargamento do conhecimento científico sobre a dicotomia entre a Economia e as Ciências do Ambiente, porque trata-se de uma investigação pioneira.

Códigos JEL: O4; F62; Q5

Palavras-chave: Crescimento Económico; Impacto Macroeconómico; Transição Climática.

Abstract

This project consists of the summary presentation that aims to analyze and qualify the economic effects resulting from the climate transition measures provided in the Recovery and Resilience Plan (RRP), in an area that can be called "Economy of Green Incentives" - framed within the scope of Energy Economics -, having as an element of approximation the financial support for investment of the RRP, in its climate dimension.

The research necessarily begins by looking for ontological aspects of the climate transition and its relationship with economic growth, the incentives of the RRP and its "green" importance in the national scenario; involves the application of the MPC-DICE Model, through the assumption of certain logical-deductive reasoning, and corresponding analysis of the forecast of the impact on economic growth resulting from the implementation of the RRP measures; and ends with the interpretation of the results, which allows us to conclude that there is a correlation between the use of funds from the financing measures for the climate transition provided in the RRP, the reduction of CO₂ emissions and the Portuguese Gross Domestic Product.

This exploratory study offers an important contribution to the expansion of scientific knowledge about the dichotomy between Economics and Environmental Sciences, because it is a pioneering study.

JEL Codes: O4; F62; Q5

Keywords: Economic Growth; Economic impact; Climate Transition.

Índice

Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de Tabelas	vii
Lista de Figuras	viii
Lista de Siglas e Acrónimos	ix
Lista de Nomenclaturas	x
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II – IMPACTOS DA TRANSIÇÃO CLIMÁTICA SOBRE O PRODUTO: CONTRIBUTOS DO PRR	3
2.1. Noções de transição climática e de crescimento verde contextualizadas no PRR.....	3
2.2. Transição climática e crescimento económico	4
2.2.1. Mecanismos de transmissão.....	4
2.2.2. Modelização dos impactos de medidas de transição climática em modelos de equilíbrio geral	10
2.2.3. Validação empírica da relação transição climática - crescimento.....	21
2.3. Análise da componente de transição climática do PRR.....	23
2.3.1. Origem, justificação e definição	23
2.3.2. Estrutura e objetivos da transição climática	24
CAPÍTULO III – METODOLOGIA E DADOS	27
3.1. Modelos DICE e MPC-DICE.....	27
3.2. Pressupostos de aplicação do modelo	34
3.3. Dados para a identificação de choques de política “verde” no modelo	36
3.3.1. Variáveis ambientais	36
3.3.2. Variáveis económicas e impacto no ambiente.....	42
3.4. Calibração do modelo MPC-DICE	45

CAPÍTULO IV – ANÁLISE DE RESULTADOS	49
4.1. Resultados de simulação de diferentes tipos de choque identificados no PRR.....	49
4.2 Avaliação integrada de uma seleção de choques identificados no PRR	52
CAPÍTULO V – CONCLUSÃO.....	55
REFERÊNCIAS	59
ANEXOS	71
Anexo A - Verbas Alocadas às C10, C11, C12 e C13 do PRR, por Investimentos	72
Anexo B - Verbas Alocadas às C14 e C15 do PRR, por Investimentos	73
Anexo C - Verbas Alocadas à C21 - RePowerEU, por Investimentos	74
Anexo D - Calibração do Modelo: Parâmetros de Difusão Climática e do Ciclo de Carbono	75
Anexo E - Calibração do Modelo: Outros Parâmetros Geofísicos	76
Anexo F - Calibração do Modelo: Parâmetros Socioeconómicos.....	77
Anexo G - Calibração do Modelo: Parâmetros Iniciais e Auxiliares.....	78
Anexo H - Consumo de Eletricidade em Portugal	79
Anexo I - Número e Potência Instalada - UPCA.....	80

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Síntese dos Mecanismos de Transmissão entre a Transição Climática e o Crescimento Económico	9
Tabela 2 - Resumo Comparativo: Propostas S-DICE e DICE.....	20
Tabela 3 - O Modelo DICE – Componente Económica	28
Tabela 4 - O Modelo DICE – Componente Climática.....	29
Tabela 5 - O Modelo DICE – Abatimentos e Danos Económicos.....	30
Tabela 6 - O Modelo DICE – Componente das Políticas de Mitigação	31
Tabela 7 - Análise Comparativa da Concentração de Gases CO, CO ₂ e CH ₄ na Atmosfera Portuguesa, janeiro	37
Tabela 8 - Comparação entre a ICE de Portugal e da UE.....	40
Tabela 9 - Choques no Valor do Stock Inicial de Capital	43
Tabela 10 - Síntese da Redução de Emissões de CO ₂ da Componente C15 em GtC.....	45
Tabela 11 - Redução de CO ₂ em Portugal por Componente PRR – Transição ambiental...	54

Lista de Figuras

Figura 1 - Emissões de GEE	38
Figura 2 - Evolução da Intensidade Carbónica da Economia por Setor de Atividade.....	39
Figura 3 - Emissão de CO ₂ por Unidade de Valor Acrescentado	41
Figura 4 - Temperatura Média do Ar em Portugal, 1990-2022.....	42
Figura 5 - Variações Percentuais do PIB Resultantes do PRR Climático Português, 2020-2300	50
Figura 6 - Multiplicador Efetivo por cada USD Investido (k0 e el0+k0), Resultantes do PRR Climático Português, 2020-2300.....	51
Figura 7 - Impactos Económicos por Componente PRR - Transição Climática, 2020-2300 (em % do PIB)	52
Figura 8 - Multiplicador Efetivo por cada USD Investido por Componente PRR/Transição climática, 2020-2300 (em % do Investimento da Componente)	53

Lista de Siglas e Acrónimos

CELE	Comércio Europeu de Licenças de Emissão
CQNUAC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas
CSC	Custo Social de Carbono
DICE	Dynamic Integrated Model of Climate and Economy
EM	Estados Membros
EMRP	Estrutura de Missão Recuperar Portugal
FUND	Climate Framework for Uncertainty, Negotiation, and Distribution
GEE	Gases com Efeito de Estufa
ICE	Intensidade de Carbono da Economia
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change.
INE	Instituto Nacional de Estatística
LULUCF	Land Use, Land-Use Change and Forestry
MAII	Modelos de Avaliação Integrada de Impacto
MPC	Model Predictive Control
MRR	Mecanismo de Recuperação e Resiliência
NGEU	NextGenerationEU
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
PAGE	Policy Analysis of the Greenhouse Effect
PCO	Problema de Controlo Ótimo
PIB	Produto Interno Bruto
PRR	Plano de Recuperação e Resiliência
RCP	Representative Concentration Pathways
SLR	Sea Level Rate
UE	União Europeia
UPCA	Unidades de Produção de Autoconsumo
USD	United States Dollar
VAB	Valor Acrescentado Bruto

Lista de Nomenclaturas

CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
GtC	Giga toneladas de carbono
ktep	Quilo toneladas equivalente de petróleo
kWhel	Quilowatt-hora de eletricidade consumida
kWh	Quilowatt-hora
ppb	Parts-per-billion
ppm	Parts-per-million
tCO ₂ eq	Tonelada de dióxido de carbono equivalente
Wm ⁻²	Watts por metro quadrado

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

A poluição do ar, da terra e dos mares é uma realidade consciente nas sociedades atuais, sendo geralmente aceite como uma externalidade negativa do crescimento das economias. No dizer de Stern (2006), “os economistas descrevem as alterações climáticas induzidas pelo homem como uma externalidade e o clima global como um bem público” (p. 5).

Desde a década de 1990 que existe a preocupação nos investigadores em estudar os efeitos no ambiente associados à dinâmica de crescimento económico. No entanto, a problemática entre a economia e o ambiente tem vindo a reposicionar-se. Nesta dissertação, considerando que os efeitos crescentes da poluição acumulada a nível planetário têm gerado mudanças climáticas (eventos extremos), que têm chamado a atenção dos media mundiais, pretende-se contribuir para uma melhor compreensão dos seus impactos na economia, e.g., a nível do crescimento do Produto Interno Bruto (PIB). Neste sentido, as políticas económicas, sendo apontadas como possíveis causas da poluição/alterações climáticas, assumem-se, agora, como uma solução do problema climático pelas organizações internacionais.

A nível europeu, desde julho de 2021 que está em vigor a Lei Europeia em matéria de Clima¹, que obriga legalmente os Estados-Membros (EM) da União Europeia (UE) a atingir os objetivos climáticos para 2030 (i.e., reduzir as emissões de gases com efeito de estufa (GEE) para a atmosfera em, pelo menos, 55 %) e para 2050 (i.e., alcançar a neutralidade climática²), previstos no Acordo de Paris, tendo como objetivo de longo prazo “manter o aumento da temperatura média mundial bem abaixo dos 2 °C em relação aos níveis pré-industriais e em envidar esforços para limitar o aumento a 1,5 °C” (Conselho Europeu [CE], 2024a, maio). A nível mundial, o Protocolo de Quioto³ caducou em 2020, mas todos os países da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas (CQNUAC), em 2015, adotaram o Acordo de Paris.

Assim, tendo a UE disponibilizado um financiamento verde de 30% do seu orçamento para 2021-2027 e do instrumento de recuperação NextGenerationEU (NGEU), o que equivale a

¹ Principal Elemento das estratégias ambientais da Comissão Europeia em 2019: Pacto Ecológico Europeu.

² Neutralidade climática significa emitir só a quantidade de GEE que pode ser absorvida pela natureza: florestas, oceanos e solos.

³ Celebrado em 1997, “foi o primeiro tratado jurídico internacional que explicitamente pretende limitar as emissões quantificadas de gases com efeito de estufa (GEE) dos países desenvolvidos” (Associação Portuguesa do Ambiente [APA], 2024, janeiro), i.e., definiu os primeiros objetivos com vínculo legal.

cerca de 580 mil milhões de euros, mais parte das receitas geradas pelas licenças de emissão do Comércio Europeu de Licenças de Emissão - CELE, (CE, 2024b, maio), importa estudar os efeitos das medidas, que pretendem diminuir a probabilidade de ocorrência de eventos meteorológicos e climáticos, no desenvolvimento e crescimento das economias.

Sabendo que “a transição para a neutralidade climática traz oportunidades significativas em termos de: crescimento económico; mercado e emprego; e desenvolvimento tecnológico” (CE, 2023, p. 1), esta investigação - pioneira no seu objetivo de estudo - visa, assim, responder à questão de partida: existirá uma correlação positiva entre as políticas económicas de financiamento para a transição climática previstas no Plano de Recuperação e Resiliência (PRR) e o crescimento económico português? Deste modo, o objetivo deste estudo é qualificar os efeitos económicos sobre o PIB pela implementação do PRR no que concerne às medidas de transição climática, i.e., pelo impacto direto dos investimentos ao abrigo das medidas de descarbonização da indústria e remodelação de edifícios, como também o impacto indireto de efeitos de substituição dos investimentos alocados à substituição dos automóveis pelo metro, i.e., mobilidade sustentável.

Para tal, parte-se de uma revisão de literatura adequada sobre a relação entre a qualidade ambiental e o crescimento do PIB, que evidencia os mecanismos de transmissão das componentes do PRR e da função dano associada ao aumento da temperatura que afeta o bem-estar na economia. Posteriormente, são realizados vários cenários de simulação sobre os mecanismos de transmissão e de avaliação das medidas verdes sobre o PIB, através do modelo MPC-DICE de Faulwasser et al. (2018): uma aplicação em Matlab do modelo DICE (*Dynamic Integrated Model of Climate and Economy*) que usa o MPC (*Model Predictive Control*) para resolver o Problema de Controlo Ótimo (PCO). Assim, sendo um modelo de avaliação dos efeitos ambientais na economia, permitirá implementar a função dano associada ao aumento da temperatura conjugada com o incremento de capital e redução de emissão de CO₂.

Esta dissertação estrutura-se em cinco capítulos. Depois da Introdução, faz-se uma revisão de literatura sobre a temática em causa, bem como uma breve análise ontológica do PRR, da transição climática e do crescimento sustentável. No Capítulo 3, descreve-se o processo metodológico seguido no estudo e apresentam-se alguns dados económicos e ambientais históricos. No Capítulo 4, debatem-se os resultados obtidos para, por último, apresentar as principais conclusões e limitações do estudo, bem como um conjunto de recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II – IMPACTOS DA TRANSIÇÃO CLIMÁTICA SOBRE O PRODUTO: CONTRIBUTOS DO PRR

Neste capítulo pretende-se, por um lado, explicitar os conceitos relevantes para esta investigação, nomeadamente os de transição climática e de crescimento económico sustentável, no contexto do PRR (subcapítulo 2.1), e descrever os mecanismos de transmissão bidirecionais entre estas duas variáveis. Esta descrição é realizada através das relações tipificadas em diferentes modelos e da evidência empírica na literatura de forma a identificar potenciais efeitos indiretos de natureza não observável, subentendidos nos efeitos de substituição, bem como os efeitos globais induzidos pelos investimentos verdes previstos no PRR (subcapítulo 2.2). Por outro lado, é essencial analisar a dimensão de transição climática subjacente ao PRR, nomeadamente a sua origem, justificação, definição e estrutura para atingir os objetivos de transição climática (subcapítulo 2.3).

2.1. Noções de transição climática e de crescimento verde contextualizadas no PRR

A transição climática, conhecida como transição energética, transição verde ou também designada por transição para uma economia hipocarbónica, são conceitos recorrentes referidos na literatura, mas não explicita nem expressamente definidos.

Porém, segundo a Climate Transition Finance & International Capital Market Association (2020) “o conceito de transição climática centra-se principalmente na credibilidade de compromisso e práticas relativas às alterações climáticas de um emissor” (p. 2) de poluentes.

No entanto, considerando que o conceito transição climática resulta da combinação das expressões “transição” e “climática”, pode-se o entender como um processo de mudança das fontes de energia como força motriz da economia rumo à neutralidade carbónica, através da redução de emissões de GEE e do aumento da capacidade de absorção destes pela própria natureza; mitigando, assim, os impactos diretos e indiretos das alterações climáticas nas sociedades, ou seja, em sentido mais restrito, consiste em transformar uma economia movida a combustíveis fósseis, numa economia que dependa mais de fontes de energia renováveis favoráveis ao crescimento e desenvolvimento sustentáveis.

O crescimento verde ou crescimento económico sustentável junta os conceitos de crescimento económico e de transição climática, e baseia-se na utilização de forma eficiente dos recursos naturais e da biodiversidade com o propósito de melhorar o bem-estar social da geração atual sem prejudicar o das gerações futuras. Segundo a Organização para a

Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE, 2011), o “crescimento verde significa fomentar o crescimento e o desenvolvimento económicos, assegurando, simultaneamente, que as riquezas/dotações naturais continuem a fornecer os recursos e os serviços ambientais, dos quais depende o nosso bem-estar” (p. 4), pelo que se deve incentivar o investimento e a inovação como fatores de crescimento verde e de geração de novas oportunidades económicas.

Dada a sua importância, os conceitos de transição climática e de crescimento económico sustentável estão presentes na agenda política, visível em regulamentos e acordos internacionais desenhados para incentivar a redução das emissões de GEE e promover a sustentabilidade ambiental. Ações como a implementação de metas de redução de emissões, a precificação do carbono e o estabelecimento de padrões mais rigorosos para a indústria são parte deste processo (e.g., Protocolo de Quioto, 1997 e Acordo de Paris, 2015).

Em particular, nos termos do PRR Português, as medidas para a transição climática - cumprindo com 38% do seu investimento global afetos a objetivos de transição climática - resultam do compromisso e contributo de Portugal para as metas climáticas que permitirão o alcance da neutralidade carbónica até 2050 na UE (conforme o estabelecido no Pacto Ecológico Europeu), sendo certo que a descarbonização da economia oferece oportunidades importantes e prepara o país para os fatores de competitividade num futuro próximo, direcionando, assim, Portugal para um crescimento sustentável (Estrutura de Missão Recuperar Portugal [EMRP], 2023, dezembro).

2.2. Transição climática e crescimento económico

2.2.1. Mecanismos de transmissão

Conforme o Banco Mundial (2021, maio), o conjunto de investimentos verdes transformadores das atividades económicas tem um impacto positivo sobre as preferências de consumo e de investimento dos agentes privados e, consequentemente, no PIB, via redução de custos de produção e de preços. Assim, a transição para um ambiente de baixo carbono, no curto prazo, incentiva o investimento verde, pelo aumento da eficiência nas empresas; cria emprego e, em consequência, gera mais consumo pelo aumento do poder de compra. No entanto, na ótica da transição climática e da dinâmica de médio e longo prazo, os mecanismos de transmissão presentes na literatura são muito vastos, ao contrário da dinâmica das catástrofes naturais.

Os mecanismos de transmissão entre transição climática e crescimento económico são complexos (Stern, 2006). A análise entre os dois conceitos é, geralmente, abordada, primeiramente, ao nível individual de cada setor e, posteriormente, ao nível agregado de forma a captar o bem-estar social; na verdade, apesar da elevada incerteza presente nos impactos da transição climática, existem consequências tanto do lado da procura como do lado da oferta (Adão et al., 2022). Para além disso, os efeitos macroeconómicos da transição climática dependem de vários fatores microeconómicos que atuam independentemente uns dos outros e, por isso, “as interligações dos diversos setores podem ser relevantes para captar efeitos indiretos” (p. 29).

Tal como referido em Kahn et al. (2021), é provável que surjam problemas de causalidade inversa, i.e., se as condições climáticas podem afetar o PIB, então também o inverso é verdadeiro, face ao consenso científico existente, uma vez que grandes quantidades de CO₂ e outros GEE são emitidos pela atividade económica.

Também é de notar que, segundo Dell et al. (2014), as alterações climáticas diferem-se das alterações meteorológicas, uma vez que a “nova literatura usa ‘variações atmosféricas’ para descrever a variação temporal de curto prazo” (p.741). Ou seja, em termos de impacto, as alterações climáticas correspondem a choques de longo prazo e as alterações meteorológicas referem-se a choques de curto prazo. Para além do diferente impacto temporal, estes conceitos são distintos, porque enquanto o “tempo, numa perspetiva económica, é aleatório” (Tol, 2019, p. 555) e o seu impacto é perfeitamente identificado, o clima e a intensidade das suas alterações podem ter implicações quer a nível dos custos de adaptação, e.g., de acordo com Dell et al. (2014), “se o clima mudar, os agentes podem, em última análise, adaptar os processos de produção económica ao novo ambiente” (p. 772) e os danos causados pelas alterações climáticas podem não ser revelados por passageiras alterações meteorológicas, quer a nível dos efeitos no equilíbrio geral, pelo ajustamento de preços e da mobilidade dos fatores de produção.

Neste contexto, de acordo com Adão et al. (2022), os canais de transmissão das condições extremas/adversas sobre a economia atuam via: i) variação de preços e de rendimento; ii) fluxos de comércio internacional; iii) efeito sobre o *stock* de capital; iv) obsolescência de ativos; v) mobilidade do fator trabalho; entre outros fatores.

Começando pelo canal da variação de preços e de rendimento (i), considera-se que um choque negativo do lado da oferta, por exemplo, devido à ocorrência de catástrofes naturais,

pode afetar os preços de diversos setores da economia⁴, uma vez que a retração da curva da oferta individual gerada pela redução do rendimento agrícola e redução da produção de energia aumentam os custos de produção e, conseqüentemente, o preço dos bens do setor primário. No entanto, segundo Parker (2018), podem ocorrer pressões permanentes sobre os preços no caso de secas e, logo, o preço dos bens alimentares nos países em desenvolvimento aumenta, principalmente, naqueles com elevada dependência de energia no processo produtivo.

No contexto do canal dos fluxos de comércio internacional (ii), Oh e Reuveny (2010) descrevem a redução do comércio internacional como efeito de catástrofes naturais. No entanto, destacam que as economias menos expostas também são afetadas pelos seus parceiros comerciais, via taxa de câmbio, obrigando à transferência de *stock* de capital, emprego e produção. Sendo certo que o aumento dos preços cria, conseqüentemente, perda de competitividade com o exterior e decréscimo da economia.

O canal do efeito sobre o *stock* de capital (iii), segundo Adão et al. (2022), consiste no facto da destruição de infraestruturas de transportes, de energia e de aprovisionamento de água reduzir, efetivamente, o *stock* de capital da economia e, conseqüentemente, reduzir a produtividade marginal do trabalho e a atração ao investimento. Assim, a perda de eficiência produtiva pode ser incentivada pelas boas práticas dos investimentos verdes, promovendo o efeito de substituição de capital no curto prazo e, porventura, conduzindo a um impacto diferente do expectável.

Fankhauser e Tol (2005) analisam os impactos dinâmicos das alterações climáticas no bem-estar social, via variação de preços e de rendimento (i) e o efeito sobre o *stock* de capital (iii), e concluem que as alterações climáticas terão sempre um efeito negativo sobre as poupanças, o stock absoluto de capital e sobre o rácio capital-trabalho. Estes autores, assumindo uma taxa de poupança constante, consideram que uma produção mais baixa, resultante de um evento climático extremo, conduz a uma redução proporcional do investimento que, por sua vez, deteriorará a produção futura, pelo efeito de uma menor acumulação de capital, bem como, na maioria dos casos, o consumo futuro *per capita*, e, desta forma, o crescimento económico. Através de um modelo simples de economia climática, Fankhauser e Tol (2005)

⁴ O período temporal depende do tipo de catástrofe natural em causa. No caso de secas, por exemplo, o problema acontece mais no longo prazo e não tanto no curto prazo, ao contrário das tempestades e das inundações (Adão et al., 2022).

sugerem que o efeito de acumulação de capital é importante, especialmente se a mudança tecnológica for endógena, e pode ser maior do que o impacto direto das alterações climáticas, e que o efeito poupança tem menos impacto. Adiantam ainda que os efeitos dinâmicos são mais importantes do que os efeitos diretos, quando os impactos das alterações climáticas forem globalmente moderados, o que sugere que os efeitos são mais preocupantes nos países desenvolvidos por serem menos vulneráveis às alterações climáticas.

Ainda de acordo com Adão et al. (2022), destaca-se o canal da obsolescência de ativos (iv), segundo o qual a rápida depreciação dos ativos de capital, na sequência dos investimentos de transição, a atividade seguradora assume maiores riscos, pelo que exige um maior valor de colateral, i.e., leva as famílias a aumentar os seus níveis de poupança por precaução. Posto isto, a transição climática tenderá a causar perdas no valor dos ativos, pela obsolescência da tecnologia subjacente aos ativos utilizados, que têm um impacto direto na produtividade nacional e no emprego. Cavalcanti et al. (2022) concluem que, nos setores tecnologicamente mais poluentes, os custos derivados da transição climática a longo prazo assumem maiores valores do que os suportados por setores com menos intensidade de tecnologia poluente, o que permite inferir que tais custos serão mais elevados para países com economias mais poluentes, uma vez que “os setores de energia poluente expostos à taxa de carbono testemunham a maior queda na produção e, conseqüentemente, a maior saída de mão de obra” (Cavalcanti et al., 2022, p. 25).

Finalmente, eventos globais extremos podem, através do canal da mobilidade do fator trabalho (v), induzir efeitos nas decisões de migração, por exemplo, através da queda salarial nas zonas rurais e do aumento dos preços dos bens alimentares. A mobilidade do fator trabalho depende de certas variáveis relativas ao comportamento, nomeadamente a exposição das famílias aos riscos decorrentes das mudanças climáticas. Cattaneo e Peri (2016) afirmam que o crescimento da temperatura média, acompanhado por eventos climáticos extremos, incentivam a fuga de mão-de-obra dos países em desenvolvimento, mesmo dos de maior nível de rendimento, para os países mais ricos.

Ademais do enunciado até ao momento, existem perdas associadas às alterações climáticas para além dos impactos diretos no PIB como, por exemplo, a perda de qualidade ambiental e os riscos de saúde. Field (1994) descreve, por hipótese, que as emissões que dependam de tratamento, reciclagem e armazenamento dos resíduos, transmitem-se, necessariamente, para a terra, ar e/ou água e, conseqüentemente, tornam-se um dano para o ecossistema e que,

“para reduzir os fluxos de resíduos para o ambiente é necessário reduzir os materiais retirados do ecossistema” (p. 37). Neste sentido, existe um problema de *trade-off* entre os bens económicos convencionais e a qualidade ambiental das gerações atuais e futuras, sendo impossível maximizar o crescimento económico e, simultaneamente, a proteção ambiental, pelo que “os danos estão relacionados com os valores humanos” (p. 33).

Os eventos climáticos extremos têm impactos diferentes nos agentes económicos; na verdade, “o processo de ajustamento a uma economia com menos emissões de carbono, induzido por alterações de política climática, por perturbações tecnológicas e por mudanças nas preferências dos consumidores, gera o que na literatura se designa por riscos de transição” (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento [PNUD], 2020, p. 205). Existem, portanto, múltiplos mecanismos de transmissão associados às alterações climáticas na macroeconomia, tanto do lado da oferta e da procura, como também os associados a uma economia com menos emissões de carbono.

Em suma, a teoria mais recente aposta na transição climática como um meio eficaz para atingir o crescimento económico sustentado. No entanto, os mecanismos de transmissão entre a transição climática e o crescimento económico são múltiplos e de efeitos ambíguos, tal como o evidenciado na Tabela 1, afetando, principalmente, as decisões de consumo e investimento dos agentes económicos. Apesar de ser um método ainda em desenvolvimento, apresenta-se, na secção 2.2.2, um resumo de como estes mecanismos tendem a ser incluídos em modelos de equilíbrio geral.

Tabela 1 - Síntese dos Mecanismos de Transmissão entre a Transição Climática e o Crescimento Económico

Canais de transmissão	Dinâmicas entre as catástrofes naturais/transição climática no crescimento económico
Variação de preços e de rendimento	Eventos extremos (e.g., tempestades e inundações) => retração da curva da oferta individual no curto prazo, via ↓ rendimento agrícola e ↓ produção de energia; o que => ↑ custos de produção => ↑ preço dos bens alimentares => ↓ PIB
Fluxos de comércio internacional	Eventos extremos (choque da oferta) => ↑ custos de produção => ↑ preço dos bens alimentares => ↑ valor da moeda nacional => apreciação da taxa de câmbio => ↓ competitividade com o exterior => Δ (Exportações-Importações) < 0 => ↓ PIB
Efeito sobre o <i>stock</i> de capital	Eventos extremos => ↑ taxa de depreciação do stock de capital (e.g., infraestruturas, transportes, fontes de energia) => ↓ eficiência da produção, que exige investimentos de reposição de stock de capital => ↑ riscos associados às atividades seguradoras => necessidade de maior valor de colateral exigido, i.e., necessidade de maior poupança exigida (↑ S) => ↓ PIB
Obsolescência de ativos	Transição climática => rutura nas tecnologias existentes (obsolescência de ativos) => ↓ valor dos ativos => ↓ emprego, que depende do grau de exposição às tecnologias alternativas => ↓ consumo => ↓ PIB
Mobilidade do fator trabalho	Eventos globais extremos => ↓ salários em zonas rurais e ↑ preços dos bens alimentares => ↑ mobilidade do fator trabalho
Outros fatores	Eventos globais extremos => ↑ riscos para a saúde e ↓ qualidade ambiental => disrupções forçadas, captadas indiretamente => ↑ custos sociais (associado a externalidades ambientais negativas) => ↓ PIB

Fonte: Elaboração própria a partir de Adão et al. (2022).

Nota. O símbolo => deve ler-se “implica”, Δ traduz “variação”, S refere-se a “poupança” e os símbolos ↓ e ↑ devem-se ler “redução” e “aumento”, respetivamente.

2.2.2. Modelização dos impactos de medidas de transição climática em modelos de equilíbrio geral

Na literatura existe uma panóplia de métodos para quantificar os efeitos da transição climática sobre o crescimento da economia, nomeadamente no contexto de modelos de equilíbrio geral. Estes modelos permitem simular os impactos de diferentes políticas económicas, tentando incorporar as restrições associadas aos fatores sociais, económicos, ambientais e institucionais.

Nordhaus (1994) apresenta os modelos de avaliação integrada de impacto (MAII) das alterações climáticas, que são motivados pela necessidade de equilibrar a dinâmica da acumulação de carbono na atmosfera e a dinâmica de descarbonização da economia. Assim, os MAII “podem ser definidos como abordagens que integram conhecimentos de dois ou mais domínios num único quadro. Estes são, por vezes, teóricos, mas são, cada vez mais, modelos informatizados, empíricos, dinâmicos, não lineares de diferentes níveis de complexidade” (Nordhaus, 2017, p. 16). Os estudos de Rotmans et al. (1990), Nordhaus (1992, 2017), Dowlatabadi e Morgan (1993), Edmonds et al. (1994), Prinn et al. (1999) e Sokolov et al. (2005) são alguns exemplos de estudo dos MAII.

Nordhaus (2017) adianta ainda que os MAII são cada vez mais utilizados em análises pelos governos nacionais e em avaliações internacionais, destacando, aqueles que: i) façam projeções que tenham entradas e saídas consistentes dos diferentes componentes do sistema, de modo a que, e.g., as projeções do PIB sejam consistentes com as projeções de emissões; ii) calculam os impactos sob pressupostos alternativos em variáveis como a produção, as emissões, as alterações de temperatura e o efeito da atividade económica no clima; iii) traçam os efeitos das políticas alternativas em todas as variáveis de forma coerente, bem como avaliam os custos e benefícios das estratégias alternativas; e iv) estimam as incertezas associadas a variáveis e estratégias alternativas, juntamente com o valor da investigação e das novas tecnologias.

Contudo, segundo Rotmans e Dowlatabadi (1998), as limitações do modelo estão presentes nas suas vantagens, já que a interligação entre os modelos de áreas distintas de conhecimento não é um paradigma socialmente aceite. Autores como Pindyck (2013, 2017) e Gerlagh e Liski (2018a e 2018b) criticam os MAII pelos respetivos pressupostos fortes, afirmando que “as funções de dano utilizadas na maioria dos MAII são completamente inventadas, sem qualquer fundamento teórico ou empírico” (Pindyck 2013, p. 868).

Segundo Gurgel (2012), para além dos MAII, “existem modelos económicos individualizados, direccionados para o estudo das políticas de mitigação” (p. 11) de poluentes como, por exemplo, os modelos de WW (Whalley & Wigle, 1991), GREEN (Martins et al., 1992), CRTM (Rutherford, 1999), RICE (Nordhaus & Yang, 1996), MS-MRT (Bernstein et al., 1999), GTAP-E (Burniaux & Truong, 2002), ENTICE (Popp, 2004), EPPA (Paltsev et al., 2005 e Babiker et al., 2008), WITCH (Bosetti et al., 2006) e MERGE (Richels et al., 2007).

A análise económica da transição climática, quer pelos MAII, quer pelos modelos de avaliação individual, mostra que, para caraterizar a economia, é exigido um elevado grau de especificação nas tecnologias energéticas adotadas no país.

Assim, verifica-se que há três MAII que predominam nos estudos da economia do clima e que permitem determinar o Custo Social de Carbono (CSC), tal como referido por Faulwasser et al. (2018), Kellett et al. (2019) e Russel et al. (2022), a saber: i) DICE (*Dynamic Integrated model of Climate and Economy*) de Nordhaus (1992, 2014, 2018); ii) PAGE (*Policy Analysis of the Greenhouse Effect*) de Hope et al. (1993) e Hope (2013, 2015) e iii) FUND (*Climate Framework for Uncertainty, Negotiation, and Distribution*) de Anthoff e Tol (2009, 2013, 2014).

Nordhaus (1992) concebeu originalmente o DICE, que integra o sistema climático na teoria do crescimento económico, para avaliar os custos e benefícios das diferentes políticas relacionadas com a mitigação dos efeitos das alterações climáticas. Nesta primeira abordagem, a sociedade investe em bens de capital, reduzindo o consumo atual, de modo a poder consumir mais no futuro; o investimento nas emissões de baixo carbono reduz o consumo atual e reduz os danos causados pelas alterações climáticas o que, por sua vez, aumenta a possibilidade de maior consumo no futuro. Este modelo inclui as emissões de GEE, como também os fatores trabalho/população, capital e tecnologia; e, para além disso, por se tratar de um MAII, o modelo funciona de forma integrada, ou seja, em vez de retirar inputs exógenos ou pressupostos de outros modelos, são consideradas várias interações geofísicas que interligam os aspetos ambientais e a economia. Para além disso, este modelo: i) integra a Economia e a Ciência do Clima, porque combina componentes económicos (investimento e consumo) e climáticos (emissões de GEE e alterações de temperatura) para analisar a forma como várias políticas e cenários afetam tanto a economia como o sistema climático; ii) permite uma análise dinâmica, ou seja, considera a forma como as decisões tomadas hoje podem impactar o futuro, tendo em conta fatores referidos e os seus efeitos

ao longo do tempo; iii) analisa e avalia os custos e benefícios de diferentes políticas climáticas, tais como a precificação do carbono, metas de redução de emissões e investimento em tecnologias de energia limpa; iv) permite simular diferentes cenários, e opções políticas, para compreender os seus potenciais impactos na economia e no clima.

Concretamente, o modelo DICE identifica várias equações que interagem para descrever a economia, as emissões de GEE, a concentração de GEE na atmosfera, e o impacto dessas concentrações sobre o clima e a economia, permitindo fornecer uma visão dinâmica de como as decisões económicas e políticas de mitigação afetam o clima e, por sua vez, como as mudanças climáticas afetam a economia. Este modelo é geralmente resolvido numericamente devido à sua complexidade e natureza interativa.

De facto, este modelo, de acordo com Gonzalez-Eguino e Neumann (2016) e Nordhaus e Sztorc (2013), otimiza o bem-estar social e dedica a produção líquida apenas ao consumo e investimento. A produção bruta, incorporada pelas funções de capital, trabalho e tecnologia, explica o crescimento económico e é reduzida pelos danos e custos de abatimento⁵. Na verdade, os custos de abatimento são representados pela função da taxa de redução de emissões e estima-se que seja altamente convexo, ou seja, o custo marginal das reduções aumenta a partir de zero mais do que linearmente com a taxa de redução.

O total de emissões de GEE é dado pelas emissões de combustíveis fósseis industriais e as emissões resultantes de alteração do uso do solo. As emissões de CO₂ dos combustíveis fósseis e da indústria são determinadas pelo nível de intensidade de carbono multiplicado pela produção bruta e reduzidas da taxa de redução de emissão, logo, a única variável sujeita a controlo endógeno neste modelo é o CO₂ dos combustíveis fósseis e da indústria.

Segundo Diaz e Moore (2017) e Russel et al. (2022), os danos causados pelas alterações climáticas são representados nos MAII de custo-benefício através de uma função dano, que relaciona variáveis associadas a condições climáticas (e.g., temperatura, concentração de CO₂, subida do nível do mar) com o bem-estar económico-social, avaliado em termos de produto. Trata-se de uma função complexa que harmoniza as relações físicas para determinar impactos líquidos das alterações climáticas e que expõem os custos sociais de carbono associadas às mesmas.

⁵ A mão de obra é proporcional à população, enquanto o capital acumula-se de acordo com uma taxa de poupança endógena.

As funções dano assumem relações entre as variáveis que “dependem da exposição e da sensibilidade do setor ao fator climático, da capacidade de adaptação natural ou tecnológica, das margens económicas de ajustamento disponíveis e da estrutura das preferências económicas no sector” (Diaz e Moore, 2017, p. 774). Apesar de existirem quatro propostas de função dano na literatura - Burke et al. (2015), Golosov et al. (2014), Nordhaus (2014, 2017, 2018) e Weitzman (2010) -, as mais usuais para a estimação do custo social do carbono são as utilizadas nos modelos DICE, FUND ou PAGE.

O modelo DICE, de acordo com Gurgel (2012) e Russel et al. (2022), assume uma variável adicional – “capital natural” – modelizado através de uma relação inversa com as concentrações de GEE, controlado pelo investimento na transição climática, sendo que estas refletem, empiricamente, uma função quadrática da temperatura. Na verdade, o DICE escolhe o consumo e outras variáveis de decisão para maximizar o bem-estar social ao longo do horizonte temporal do modelo, tipicamente um século ou mais (tendência de longo prazo), i.e., executa a otimização intertemporal com uma função objetivo não linear repetidas de distribuição pré-definida. Apesar de não representar um impacto direto na utilidade dos agentes, tal como os outros modelos, todos os danos são efetuados através da redução de produção⁶.

Nordhaus (2017) apresenta o papel dos preços dos combustíveis fósseis como o determinante mais eficiente para incentivar o uso das energias renováveis e o desenvolvimento de novas tecnologias; dá como exemplos os modelos DICE e RICE, nas suas versões RICE-2010 e DICE-2016R2, que verificam um enfraquecimento da relação entre o agravamento de condições ambientais e o crescimento económico, quando são adotadas políticas de transição climática.

O DICE tem sido muito utilizado para refletir os custos económicos dos danos climáticos em diferentes circunstâncias (Butler et al., 2014; González-Eguino & Neumann, 2016; Moore & Diaz, 2015; Nordhaus, 2014). No entanto, os resultados dependem da escolha da função dano, no caso de esta ser especialmente superior a 2°C. Para além disso, o modelo apenas captura a transição climática para uma função custo, pelo que não capta a complexidade como outros MAII, e.g., o Global Change Assessment Model (GCAM) e o Times Integrated Assessment Model (TIAM).

⁶ De notar que, na fase inicial, este modelo está escrito em General Algebraic Modeling System (GAMS) e em Excel, embora não se consiga o acesso.

De acordo com a página web *fund-model* (<https://www.fund-model.org/publications>) o modelo FUND foi criado originalmente por Richard Tol em 1996, mas atualmente é codesenvolvido por Anthoff e Tol (2009, 2013, 2014) e já assumiu diversas versões desde a FUND 1.5 até à FUND 3.11, em que a versão atual, em termos de pressupostos, da versão 3.9 está convertida para a programação Julia⁷.

O modelo FUND, segundo Bonen et al. (2014), é o mais complexo de todos os MAII, muito embora Waldhoff et al. (2014) consideram-no como um modelo de avaliação integrada com representações simplificadas do desenvolvimento, do uso de energia, do ciclo do carbono e do clima, que tem vindo a ser utilizado para estudar políticas climáticas rentáveis, eficientes, viáveis e equitativas. Para além disso, estes autores distinguem-no dos outros modelos pela representação mais pormenorizada dos impactos económicos, setoriais e regionais, gerados pelas alterações climáticas.

Através da linguagem C#, Anthoff et al. (2009) apresentaram a primeira versão do FUND que permitiu uma modelação mais realista das relações climáticas com a economia. Embora o modelo caracterize o PIB como uma variável aleatória exógena, o crescimento da população é endógeno aos impactos climáticos, logo, o crescimento do PIB *per capita* pode ser considerado, em parte, endógeno. Para o FUND, ao contrário do modelo DICE, as diferentes especificações dos parâmetros de distribuição de probabilidade são a média das 40 mil simulações de Monte Carlo.

Na sua versão FUND 3.7, o modelo está definido para 16 regiões, para o período entre 1950-3000, incluindo a Europa. De acordo com Bonen et al. (2014) “existem 73 variáveis de Monte Carlo das quais 3 têm distribuição exponencial, 3 são gama e 5 são triangulares. As restantes 63 têm distribuição normal, das quais 12 são irrestritas e as restantes 51 são truncadas por um limite superior ou inferior” (p. 25). Esta versão contém nove funções dano setoriais. Os impactos diretos destas funções são representados por perdas de capital no setor e os impactos indiretos são representados pelo aumento da taxa de mortalidade, emigração forçada e perda de bem-estar social.

⁷ Julia é uma flexível e dinâmica linguagem de programação desenvolvida para ambientes de computação de elevado desempenho numérico e científico (<https://docs.julialang.org/en/v1/>, acesso fevereiro 2024).

Na sua versão mais recente, o FUND 3.9, corresponde à versão 3.8, mas considera exógena a força radioativa de CO₂, bem como a população e o rendimento *per capita* que são constantes no modelo (Waldhoff et al., 2014).

De acordo com Anthoff e Tol (2014), o FUND assume que todas as regiões estão em estado estacionário após o ano 2300 e, para os anos 2301-3000, as taxas de crescimento do PIB *per capita* são constantes e iguais aos valores do ano 2300, enquanto a população não muda.

Considerando as emissões de GEE, tais como o dióxido de carbono, o metano, o óxido nitroso e o hexafluoreto de enxofre, as suas concentrações na atmosfera, as forças radioativas, bem como a temperatura e o aumento do nível das águas do mar, este modelo estuda, global e dinamicamente, os impactos económicos das alterações climáticas na agricultura, na silvicultura, nos recursos hídricos, no consumo de energia, no nível das águas oceânicas, nos ecossistemas, biodiversidade e paisagem, bem como outros efeitos, e.g., na saúde humana (mortes por diarreia, doenças transmissíveis, cardiovasculares e respiratórias) e morbilidade. Assim como também permite analisar os impactos económicos da intensidade de cenários de climas extremos, e.g. tempestades tropicais e extratropicais.

De referir que as principais variáveis – crescimento do PIB, população, emissões e tecnologia de redução – estão padronizadas de forma que os valores de 2000 sejam 100. Assim, por exemplo, o FUND calcula as emissões de CO₂ através da Identidade de Kaya, em função da utilização de energia; do PIB e da população, por região e por tempo, considerando a intensidade carbónica da utilização de energia e a intensidade energética da produção que, por sua vez, decorrem da intervenção política ao nível regional e de uma taxa de crescimento exógena.

No modelo DICE, o abatimento reduz a diferença entre o produto bruto e líquido, pelo efeito dos danos. No entanto, no modelo FUND, as intervenções políticas reduzem os fatores que provocam os danos e não os próprios danos o que, *per se*, reflete-se num modelo mais realista.

O modelo FUND, adotado por Ackerman e Stanton (2012), Tol (2014) e Weitzman (2010), assume, para a função dano, que os danos aumentam exponencialmente com elevados aumentos de temperatura. Golosov et al. (2014) utilizam o *stock* de CO₂ como indicador de degradação ambiental, ao invés da temperatura, de forma a diminuir o desvio-padrão entre os danos, assumindo que, de acordo com Russel et al. (2022), “a convexidade da relação entre

o clima e os danos compensa exatamente a concavidade da relação entre as emissões e o clima” (p. 920).

Por fim, Burke et al. (2015) estimam o efeito de aumentos na temperatura no crescimento económico com base em dados retirados da *Evidence-based medicine* (EBM) e da *Representative Concentration Pathways* (RCP)⁸. Ainda assim, há também a questão de equidade no modelo FUND que, por se basear no método *willing-to-pay*, os danos diretos e indiretos estão de acordo com a proporção do rendimento *per capita*, o que, de facto, cria viés para baixo na estimativa do CSC, uma vez que dadas as alterações climáticas, certas regiões podem ter menos capacidade de pagar (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014).

Finalmente, o modelo PAGE, tal como o modelo FUND, efetua uma análise da incerteza paramétrica com várias simulações de Monte Carlo. No entanto, os modelos diferem pelos pressupostos, no que concerne às entradas da estrutura, nomeadamente o grau de desagregação regional e setorial, a formulação dos danos climáticos e o tratamento da adaptação e da incerteza (Diaz e Moore, 2017). Embora o modelo PAGE, a níveis baixos de aquecimento, seja dominado por danos não económicos e de SLR (*Sea Level Rate*), estes podem ser evitados através de uma maior capacidade de adaptação. Segundo Diaz e Moore (2017), “este custo de adaptação no PAGE é constante, pequeno e não reage à temperatura” (p. 775).

Na simulação executada por Diaz e Moore (2017), os três modelos têm impactos dados pela função dano que se distinguem entre setores e regiões de 2°C a 4°C. O modelo FUND projeta impactos muito diferentes das alterações climáticas, com benefícios líquidos globais substanciais, ao contrário dos modelos DICE e PAGE, que estimam níveis semelhantes de danos totais. Estes resultados podem ser explicados pelos danos dominantes serem fortemente dependentes do aumento dos custos de refrigeração elétrica e dos danos nos recursos hídricos, o que aumenta os custos de energia evitados, já que o modelo DICE projeta a maior parte dos danos na categoria danos agregados não-SLR (não *Sea Level Rate*).

Os três são métodos utilizados no processo de decisão para avaliar os resultados em diferentes cenários. Cada método tem as suas próprias vantagens e desvantagens e a sua escolha depende de vários fatores, como por exemplo, a complexidade de decisão, a disponibilidade de informação e as preferências dos próprios investigadores.

⁸ RCP Database. Version 2.0.5 (<https://tntcat.iiasa.ac.at/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=welcome>, acesso fevereiro 2024).

Comparativamente com os outros modelos, o DICE apresenta algumas vantagens, a saber:

- i) O DICE incorpora uma análise de risco no processo de tomada de decisão, através da avaliação de opções, logo é utilizado sob cenários de incerteza. Tanto considera os valores esperados dos diferentes resultados como as suas probabilidades.
- ii) O DICE permite fazer uma análise de sensibilidade. Através da afetação de valores numéricos do custo, benefícios, probabilidades e outros fatores, permite comparar as diferentes opções baseadas em critérios padronizados. Assim, consegue-se tomar decisões racionais e bem informadas.
- iii) O DICE integra os custos e os benefícios envolvidos em cada cenário no processo de investigação o que permite uma avaliação mais abrangente das alternativas de resultados.
- iv) O DICE é uma abordagem estruturada da avaliação que orienta os investigadores através da definição de objetivos, identificação de alternativas, avaliação de incertezas e avaliação sistemática de *trade-offs*. Desta forma, estruturada, pode evitar eventuais enviesamentos e descuidos que possam surgir durante a investigação.

Tol (2019) acredita em alguns pontos fortes que o modelo DICE de Nordhaus possa ter, e.g., facilidade de acesso e simplicidade; facilidade de interpretação dos resultados das projeções; integração entre as previsões da economia com as do clima - o que permite uma análise mais abrangente dos impactos das alterações climáticas na economia; flexibilidade - o que permite a conceção de diferentes cenários e análises de sensibilidade no sentido de avaliar como as variáveis podem influenciar os resultados; e contribuição para o debate sobre políticas climáticas, porque ao fornecer estimativas de custos e benefícios afetos a diferentes trajetórias de emissões de GEE e metas climáticas está a contribuir significativamente para o debate sobre as políticas climáticas a nível internacional.

Mas Tol (2024) critica o modelo DICE, colocando em causa os pressupostos e os resultados do modelo, pelo que faz uma análise abrangente dos impactos económicos, através de perspetivas alternativas e críticas aos modelos tradicionais como o DICE.

No entanto, o modelo DICE tem tido várias aplicações. Tal como referido por Grubb et al. (2021), o modelo tanto é utilizado para determinar o CSC, e.g., pelo Governo dos EUA através da Inter-Agency Working Group (2016), como no sistema de ensino ministrado nos cursos de economia (Tsigaris & Wood, 2016), como ainda na elaboração de novos MAII (Pottier et al., 2015; Van der Ploeg & Rezai, 2019). Organizações internacionais também utilizam o método DICE nos seus estudos, nomeadamente o IPCC - um organismo

internacional líder na avaliação da ciência climática e na prestação de avaliações regulares aos decisores políticos sobre as alterações climáticas.

Desta forma, pode-se dizer que o modelo DICE é um sistema dinâmico não linear e variável no tempo com dois *inputs* calculados através da resolução de um problema de controlo ótimo (PCO)⁹, descontado o horizonte finito, que aplica a teoria do crescimento económico à perspectiva das alterações climáticas (Faulwasser et al., 2018).

À semelhança do modelo neoclássico de crescimento ótimo, conhecido por modelo de Ramsey (1928) onde a sociedade investe em capital diminuindo o consumo agora para aumentar o consumo mais tarde, o modelo DICE adiciona os investimentos climáticos ao modelo tal como se tratasse de investimentos de capital no modelo padrão. De notar que são incorporadas as melhores práticas desde a atividade económica e as emissões até às alterações climáticas, danos e políticas (Barrage e Nordhaus, 2024; Nordhaus, 2013, 2016).

As equações do modelo DICE refletem o crescimento económico, as emissões de GEE, as mudanças de temperatura e os danos climáticos, e tem como pressuposto a otimização do fluxo de consumo agregado ao longo do tempo como resultado das políticas económicas e climáticas (Nordhaus e Sztorc, 2013).

Em suma, até ao momento, podemos constatar que, por um lado, o modelo DICE apresenta, de modo geral, os impactos de diferentes políticas climáticas ao longo do tempo no global da economia, bem como na utilização da energia juntamente com as alterações climáticas; e que, por outro lado, o modelo FUND representa os impactos das alterações climáticas na economia e no bem-estar social, nomeadamente na agricultura, no ecossistema, na saúde e nas infraestruturas.

No entanto, face à sua complexidade, o modelo DICE também foi objeto de avaliações críticas, nomeadamente por autores como Ikefuji et al. (2019), que propuseram a sua simplificação, sem o desvirtuar, dando origem ao S-DICE. Estes autores, apesar de o definirem como uma importante ferramenta de análise das políticas de alterações climáticas, na medida em que integra fatores económicos e ambientais na projeção dos GEE e mudanças de temperatura, em diferentes cenários, consideram que “dentro da filosofia do modelo DICE de Nordhaus, podem ser feitas significantes simplificações no modelo que o tornam

⁹ Adaptando o conceito à economia do clima, PCO consiste na procura de um equilíbrio ótimo entre as medidas e ações necessárias para reduzir as emissões de carbono e os impactos económicos dessas medidas e ações a longo prazo.

mais transparente, mais robusto e de mais fácil aplicação.” (Ikefuji et al., 2019, p.15), por isso apresentam uma proposta de modelo simplificado do DICE¹⁰ de Nordhaus, que consiste, para efeitos de uma investigação heurística, somente alterar, três das sete equações do modelo, equações que consideravam mais controversas e desnecessariamente complicadas, nomeadamente as relativas à temperatura, à concentração de CO₂ e à função de abatimentos e danos económicos (restrições orçamentais dadas pela função dano-abatimento no PIB), tal como se apresenta na Tabela 2, o que leva os autores a afirmarem que o S-DICE é um modelo DICE.

Ou seja, fizeram simplificações nas equações, mas sem perder informação essencial, a saber: a fórmula da temperatura (H) foi alterada para uma outra mais simples¹¹, tal como se descreve de seguida:

$$H_{t+1} = \eta^*_0 + \eta^*_1 H_t + \eta^*_2 \log(M_{t+1}) \quad (1)$$

em que H corresponde ao aumento da temperatura; t ao período; M à concentração de CO₂ na atmosfera e $\eta^*_0 = -2.8672$, $\eta^*_1 = 0.8954$, $\eta^*_2 = 0.4622$.

A segunda equação simplificada foi a relativa à concentração de CO₂, cuja proposta é:

$$M_{t+1} = \varphi^*_1 M_t + E_t, \text{ com } \varphi^*_1 = 0.9942 \quad (2)$$

em que M corresponde à concentração de CO₂ e E às emissões de CO₂ provenientes da indústria e de setores não industriais (i.e., gerados pela “utilização da terra”), que por sua vez é obtido pela fórmula:

$$E_t = \sigma_t(1 - \mu_t)Y_t + E^0_t \quad (3)$$

onde σ_t representa o rácio (output) das emissões de CO₂ e μ_t é a fração de redução de CO₂.

A terceira alteração foca-se nas equações de dano-abatimento, em que o S-DICE propõe a seguinte expressão baseada nas duas frações, dano e redução, no PIB¹²:

¹⁰ Os autores basearam-se na estrutura do modelo DICE otimizado (i.e., a versão de linha de base com ifopt = 0), de modo que as variáveis Ht e Mt assumem os seus valores ótimos conforme obtidos a partir da rotina DICE GAMS.

¹¹ Para estes autores, a equação simplificada da temperatura é “uma boa aproximação, porque (a) os coeficientes (na equação de Nordhaus) correspondem aproximadamente a uma equação de diferença de primeira ordem; e b) a variável omitida é essencialmente constante. A segunda aproximação (sem tendência) é quase tão boa quanto a aproximação na equação (simplificada), e é suficiente para aplicações práticas.” (Ikefuji et al. (2021, p. 4).

¹² Estas funções reduzem o PIB de forma que menos dinheiro esteja disponível para investimento e consumo ao longo da restrição orçamental.

$$(1 - \omega_t)/(1 + \xi * H_t^2), \text{ com } \xi * = 0.00265 \quad (4)$$

em que ω_t representa a redução e ξH_t^2 o dano, no PIB.

Segundo Ikefuji et al. (2019), esta alteração na função de danos torna-a adequada para cenários que envolvam um risco extremo. Além disso, pode-se definir $\mu \leq 1.0$ em vez do limite superior $\mu \leq 1.2$ como usado na DICE.

Tabela 2 - *Resumo Comparativo: Propostas S-DICE e DICE*

Variáveis	Fórmulas simplificadas/alteradas	Fórmulas DICE2016R
Temperatura	$H_{t+1} = \eta_0^* + \eta_1^* H_t + \eta_2^* \log(M_{t+1})$ com $\eta_0^* = -2,8672; \eta_1^* = 0,8954;$ $\eta_2^* = 0,4622$	$H_{t+1} = (1 - a_0)H_t + a_1 \log(M_{t+1}) +$ $a_2 Z_t + F_{t+1}^a$
Concentração de CO ₂	$M_{t+1} = \phi_1^* M_t + E_t$ com $\phi_1^* = 0,9942$	$M_{t+1} = (1 - b_0) M_t + b_1 X_{1,t} + E_t^a$
Função dano-abatimento	$\frac{1 - \omega_t}{1 + \xi * H_t^2}$ com $\xi = 0,00265$	$1 - \omega_t - \xi H_t^2$ com $\xi = 0,00236$

Fonte: Elaboração própria a partir de Ikefuji et al. (2019).

Nota. ^{a b} De acordo com premissas demonstradas na Tabela 1.

Relativamente à alternativa para a variável temperatura, Ikefuji et al. (2019, p. 10) consideram que esta “dá uma boa aproximação, porque (a) os coeficientes da equação inicial correspondem aproximadamente a uma equação de diferença de primeira ordem; e (b) a variável omitida é essencialmente uma constante.”, suficiente para aplicações práticas.

Em relação à concentração de CO₂, a nova expressão matemática “dá uma excelente aproximação aos resultados DICE, porque os coeficientes da equação (sem as variáveis auxiliares X_1 e X_2 , que traduzem os aumentos da concentração de CO₂ nos oceanos), correspondem aproximadamente a uma equação de diferença de segunda ordem” (Ikefuji et al. (2019, p. 12), tornando-o mais prático.

Por último, no que concerne à função de abatimentos e danos económicos, estes autores

alegam que a equação alternativa é sempre positiva desde que $\xi > 0$, face à de Nordhaus que pode assumir valores negativos em caso de circunstâncias extremas, bem como permite a padronização deste parâmetro e o facto de a diferença, em termos relativos, entre as duas equações ser reduzida em apenas 1%.

Assim, estes autores, baseados neste princípio da economia¹³, pretendem um modelo DICE mais acessível e prático na análise das políticas relativas às mudanças climáticas.

Posto isto, segundo a literatura descrita até ao momento, o modelo DICE de Nordhaus parece ser o modelo mais adequado para os objetivos desta dissertação, uma vez que retrata a perspetiva mais robusta e os efeitos das alterações climáticas no PIB.

2.2.3. Validação empírica da relação transição climática - crescimento

A relação global entre o ambiente e a economia decorre das ações do Homem no seu quotidiano - i.e., atividade económica – enquanto determinante do aumento das emissões de GEE, mas também do comportamento das externalidades ambientais negativas que sustentam impactos negativos no PIB. Edwards et al. (2005) referem a possibilidade de captar interações entre a economia e os sistemas climáticos, através da articulação de modelos económicos com modelos climáticos.

Nos termos de Edwards et al. (2005), “a introdução da força antropogénica elevou os níveis de CO₂ (...), criando um sistema em que as alterações climáticas podem impactar o sistema socioeconómico, (...), enquanto as alterações induzidas pelo clima na economia podem impactar as próprias alterações climáticas.” (p. 2). Posto isto, podemos constatar que existe uma relação recíproca entre a economia e o ambiente.

Desde a década de 1990 que foram realizados diversos estudos com o objetivo de aferir os impactos do crescimento económico no ambiente. Grossman e Krueger (1991), pela primeira vez, verificam “uma relação em forma de U-invertido entre poluição e rendimento nacional” (p. 19), característica da hipótese da Curva Ambiental de Kuznets que é utilizada para descrever a relação empírica entre a degradação da qualidade ambiental e o PIB (Dinda, 2004) e a relação entre a taxa de desflorestação e o rendimento (Bhattarai e Hammig, 2001). Resumidamente, verifica-se que elevados níveis de rendimento podem reduzir a degradação

¹³ Navalha de Ockham, ou também conhecido por princípio da parcimónia, em que William de Ockham disse “*Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem*”, ou seja, as entidades não devem ser multiplicadas para além da necessidade (<https://philarchive.org/archive/BORAND-2>, acesso novembro 2023).

ambiental (Beckerman, 1992) e que, portanto, o crescimento económico pode ser uma pré-condição para que haja melhoria ambiental (Bhagawati, 1993).

No entanto, a relação causal entre as variáveis pode ser contrária; é nesta relação que se enquadra este estudo, no contexto da avaliação dos impactos no crescimento económico, e.g., no PIB, provocados pelas alterações climáticas dos últimos anos medidas em termos de nível de emissão de CO₂, das variações de temperatura e de consumo de energia. A avaliação empírica da relação causal nesta direção é, no entanto, escassa, na literatura.

Neste contexto, Kurshid et al. (2022) tentam identificar o impacto das alterações climáticas no crescimento através de um modelo *Nonlinear Autoregressive Distributed Lag* (NARDL) e concluem que, no curto e no longo prazo, as emissões de CO₂ e a temperatura apresentam resultados assimétricos no crescimento, ou seja, as emissões de CO₂ têm uma influência negativa no longo prazo, embora os níveis de precipitação tenham um efeito favorável. No entanto, ainda segundo os mesmos autores, a média da temperatura demonstra que subidas e descidas são favoráveis na economia do Paquistão: cerca de uma unidade de aumento de temperatura tende a gerar um aumento de 0,0566 unidades no PIB. Porém, “as alterações climáticas tiveram um impacto negativo em várias áreas da economia” (Kurshid et al., 2022, p. 12). Baig et al. (2022) também estudam a conexão dinâmica assimétrica entre as mudanças climáticas e vários fatores, através do modelo NARDL e da abordagem de causalidade de Granger e documentam que as alterações climáticas, via efeito da temperatura, aumentam a probabilidade de recessão económica.

No mesmo âmbito, Wade e Jennings (2016) afirmam que as alterações climáticas impactam na economia, porque, à medida que as temperaturas globais aumentam, o aumento das despesas operacionais prejudica a economia global, i.e., “condições meteorológicas extremas podem enfraquecer o crescimento económico devido ao dano no *stock* de capital e trabalho, e a produtividade do trabalho enfraquecerá à medida que a economia mundial se ajusta a temperaturas mais elevadas” (p. 10). Berlemann e Wenzel (2018), com um modelo de regressão linear, evidenciam as fortes consequências negativas a longo prazo na economia geradas pelo crescimento dos défices de chuvas, ou seja, pelo aumento dos períodos de seca.

O Network for Greening the Financial System (NGFS) apresenta uma série de estimativas sobre o impacto dos riscos de transição. Estas variam entre -4% do PIB até ao final do século, num cenário ordenado (em que as políticas climáticas são introduzidas precocemente) e -9% do PIB num cenário afetado pelos GEE. O relatório acrescenta que alguns estudos sugerem

que os impactos poderiam ser menores, ou mesmo positivos, dada a rápida redução do custo e o aumento da implementação de novas tecnologias. Ainda assim, todos os utilizadores de energia e emissores de carbono serão afetados, sendo as principais regiões exportadoras de combustíveis fósseis que correm maior risco (NGFS, 2023).

Os riscos de transição podem também ter efeitos regionais heterogéneos, uma vez que é claramente previsível que as alterações climáticas terão impactos mais fortes nos países e regiões mais dependentes das exportações de hidrocarbonetos e de carvão, que normalmente também dependem destes setores para obter receitas do setor público, e.g., impostos, royalties e lucros de empresas estatais (Puyo et al., 2024). Um exemplo concreto é o estudo de Huxman et al. (2019) sobre a África do Sul, que é um dos principais países exportadores de carvão do mundo, e onde as finanças públicas são altamente dependentes das receitas desse setor. Estes autores estimam que o valor atual líquido para este país do custo de uma transição global para uma economia de baixo carbono, para o período acumulado de 2013 a 2035, é de, aproximadamente, um terço do seu saldo orçamental.

Por fim, Newell et al. (2021) reveem vários estudos que relacionam as variações da temperatura no PIB e afirmam que os modelos econométricos usados são estatisticamente indistinguíveis - i.e., incluem uma elevada incerteza - e realçam que os modelos de efeitos no nível do PIB geram uma distribuição estreita dos impactos no PIB centrada em torno de 1-3% de perdas, consistente com as funções dano, dos principais MAII. Kompas et al. (2018), através de modelos de equilíbrio geral, estudam as relações a nível mundial do impacto de vários cenários de variações da temperatura nas variações anuais do PIB até 2067 e concluem que, para Portugal, o impacto será negativo em 0,46 % do PIB.

2.3. Análise da componente de transição climática do PRR

2.3.1. Origem, justificação e definição

Desde 2020 que a Europa tem atravessado períodos de grande instabilidade, nomeadamente devido à pandemia gerada pela Covid-19, de que resultaram, entre outros, a contração generalizada da atividade económica e diversos desafios de liquidez enfrentados pelas famílias e empresas.

Neste contexto, e de forma extraordinária, a UE, para mitigar os efeitos negativos da crise económico-social instalada, decidiu tomar medidas para reforçar a segurança e soberania europeias, reduzindo as dependências do exterior e concebeu um novo modelo de

desenvolvimento e de investimento para 2030, pelo que criou o Plano de Recuperação da Europa (Comissão Europeia, 2024a, maio) intitulado por NextGenerationEU (NGEU), ou seja, “um inovador instrumento de recuperação temporário para apoiar a recuperação económica da Europa da pandemia do coronavírus e construir um futuro mais verde, mais digital e mais resiliente.” (Comissão Europeia, 2024b, maio).

A partir do NGEU foi criado o Mecanismo de Recuperação e Resiliência (MRR) – “um instrumento que oferece subvenções e empréstimos para apoiar reformas e investimentos nos Estados-Membros da UE.”, cujos fundos estão a ser disponibilizados aos EM em consonância com os seus planos nacionais de recuperação e resiliência (PRR) - os roteiros para reformas e investimentos destinados a tornar as economias da UE mais ecológicas, digitais e resilientes.

Destaca-se que, segundo a Estrutura de Missão Recuperar Portugal (EMRP, 2024, junho), o PRR está “em construção contínua (...) que surgiu para fazer face à crise pandémica, sofreu já uma reprogramação fruto de um novo contexto sociopolítico, que levou (...) à inclusão do RePowerEU.”

Relativamente às verbas em causa, pode-se referir que, a partir dos pedidos de financiamento dos EM, em sede do MRR, e nas necessidades de financiamento de outros programas da UE apoiados pelo NGEU, a UE espera angariar até 712 mil milhões de euros, de uma dotação máxima de 806,9 mil milhões de euros até 2026 (Comissão Europeia, 2024a, maio).

Cada país membro da UE foi convidado a desenvolver um plano nacional de recuperação e resiliência para aceder aos fundos do NGEU. Em Portugal, o Governo elaborou o PRR, que foi submetido à Comissão Europeia em abril de 2021.

2.3.2. Estrutura e objetivos da transição climática

Aliado ao crescimento económico sustentado e à convergência com a UE, o objetivo estratégico central, de acordo com a sustentabilidade dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas, do PRR é, segundo o Ministério do Planeamento (2021), “contribuir para a aceleração da transição para uma economia neutra em carbono e, ao mesmo tempo, para promover a competitividade da indústria e das empresas, por via da sua descarbonização, redução do consumo de energia e da promoção de fontes endógenas de energia.” (p. 148).

Por isso, foram consideradas sete dimensões estratégicas (componentes 10 a 15, e 21): o mar;

a mobilidade sustentável; a descarbonização da indústria; a bioeconomia sustentável; a eficiência energética em edifícios; as energias renováveis; e o RePowerEU, tendo como destinatários o estado, as famílias e as empresas, com um valor de dotação orçamental total de 5 299 milhões de euros.

De facto, a componente 10 - Mar, com uma dotação orçamental para investimentos no total de 252 milhões de euros, tem como objetivos gerais: desenvolver uma economia do mar mais competitiva, mais empregadora, mais coesa, mais inclusiva, mais descarbonizada e sustentável, num contexto de adaptação às transições climática e digital; reforçar o potencial produtivo nacional, garantindo condições de sustentabilidade e competitividade do tecido empresarial; assumir a ambição de combater algumas das bolsas de pobreza localizadas em comunidades costeiras e contribuir para o reforço da capacidade operacional, formativa e científica do país (EMRP, 2024, fevereiro).

Na componente 11 - Descarbonização da Indústria, com uma dotação orçamental ao investimento de 715 milhões de euros, os destinatários são apenas as empresas industriais e tem como objetivos: descarbonizar o setor e promover a mudança de paradigma na utilização de recursos consoante o Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC). Na mesma linha, e também apenas dirigida às empresas, a componente 12 - Bioeconomia Sustentável, com uma dotação orçamental de 145 milhões de euros, pretende uma maior aceleração na produção de produtos de alto valor acrescentado a partir de recursos biológicos com base na criação de novas cadeias de valor e de processos industriais mais ecológicos (EMRP, 2024, fevereiro).

A componente 13 - Eficiência Energética em edifícios tem como objetivos tornar os edifícios energeticamente mais eficientes e contribuir para a criação de emprego e resiliência nacional e social, através de investimentos para a eficiência energética em edifícios familiares (300 milhões euros), edifícios públicos (240 milhões de euros) e edifícios empresariais (70 milhões de euros) (EMRP, 2024, fevereiro).

Por sua vez, a componente 14 - Hidrogénio e Renováveis tem como destinatários as empresas, com uma dotação total de 370 milhões de euros para os seguintes objetivos: a promoção da transição energética por via do apoio às energias renováveis, a fomentação do crescimento económico e do emprego por via de novas indústrias e serviços associados à inovação e desenvolvimento através do rápido processo tecnológico (e.g., elevadas sinergias no tecido empresarial) e, por fim, reduzir a dependência energética nacional contribuindo, significativamente, para a melhoria da balança comercial (EMRP, 2024, fevereiro).

A componente 15 - Mobilidade Sustentável, com uma dotação total de 967 milhões de euros, é a componente que apresenta o maior valor de verbas do PRR verde e que se destina a promover o reforço e a utilização dos transportes públicos por substituição dos automóveis privados, descarbonizar o setor dos transportes, assegurar o desenvolvimento de projetos para a melhoria dos sistemas de transporte coletivo, como também, contribuir para a recuperação dos efeitos económicos e sociais resultantes da crise pandémica, principalmente, ao nível do emprego (EMRP, 2024, fevereiro).

Por fim, ao componente 21 - RePowerEU, tem como finalidade contribuir para a e transição climática e independência energética, através de “(...) medidas para acelerar a implantação das energias renováveis, simplificar o licenciamento, descarbonizar o setor dos transportes, melhorar a eficiência energética dos edifícios, modernizar as redes de transporte e distribuição de eletricidade, aumentar o armazenamento de eletricidade e reforçar a aquisição das competências verdes (...)” (EMRP, 2024, junho).

Em suma, o PRR português está estruturado em torno de 3 pilares principais: resiliência, transição climática e transição digital, em que inclui uma série de investimentos em áreas como infraestruturas, habitação, saúde, educação, energia renovável, digitalização e inovação; e tem como objetivo impulsionar a recuperação económica de Portugal, promover a criação de emprego, fortalecer a resiliência do país e acelerar a transição para uma economia mais sustentável e digital.

CAPÍTULO III – METODOLOGIA E DADOS

Este capítulo apresenta uma descrição pormenorizada do modelo que será utilizado para quantificar e analisar o impacto no PIB resultante da estrutura de investimentos verdes inseridos no PRR português. Em primeiro lugar, apresenta-se o modelo de base escolhido para a avaliação de impactos climáticos no PIB (subcapítulo 3.1). De seguida, apresentam-se os pressupostos considerados na aplicação do modelo (subcapítulo 3.2) e os dados selecionados para modelar os choques de uma política económica verde, bem como também a sua evidência histórica (subcapítulo 3.3). Finalmente, explicita-se a calibração utilizada para mimicar a implementação das medidas do PRR em Portugal e que permitirá responder à questão de investigação (subcapítulo 3.4).

3.1. Modelos DICE e MPC-DICE

Para avaliar os impactos climáticos decorrentes das emissões de GEE são, frequente e tipicamente, utilizados os MAII, tal como apresentado na secção 2.2.2. Dentro destes, a partir da literatura, pode-se constatar que o modelo mais utilizado pelos investigadores é o DICE, porque, para além de permitir a avaliação de políticas, é o modelo mais completo na sua avaliação do sistema geofísico, já que desagrega a fórmula para a força radioativa em duas equações para o sistema climático e aplica três reservatórios para modelizar o ciclo carbónico, ao contrário dos modelos FUND e PAGE que modelizam, numa única equação, o modelo climático (Ikefuji et al., 2019). Ainda é importante notar que o modelo PAGE não é um modelo de código aberto, o que, *per se*, inviabiliza o seu uso nesta dissertação, pela falta de acesso ao mesmo.

O DICE, como modelo de base, foi atualizado por Faulwasser et al. (2018) em diversos aspetos, face à versão DICE2013R, a saber: os parâmetros económicos e climáticos foram baseados em novas pesquisas e dados empíricos mais recentes; a função de danos foi revista para refletir melhor a incerteza e a variabilidade nos impactos das mudanças climáticas; a análise temporal foi expandida para considerar os impactos de longo prazo com mais detalhe; passou a ter compatibilidade com novos cenários socioeconómicos e de políticas climáticas desenvolvidas por grupos como, por exemplo, o IPCC e, por último, esta versão apresenta melhorias computacionais no sentido de permitir simulações mais rápidas e precisas. A Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5 apresentam, através da respetiva descrição e equações específicas, as três componentes do Modelo DICE: a componente económica, climática e a das políticas de mitigação.

Tabela 3 - O Modelo DICE – Componente Económica

Representação	Descrição	Equações
Função produção (Cobb-Douglas)	Descreve como o capital e o trabalho, incluindo a derivada dos combustíveis fósseis, são utilizados para produzir bens e serviços.	(1) PIB: $Y_t = A_t K_t^\gamma L_t^{1-\gamma}$ ($0 < \gamma < 1$) em que, A_t – eficiência tecnológica/produktividade total dos fatores; L_t - força de trabalho/população; γ – elasticidade do produto em relação ao capital.
Utilidade social	Depende do consumo per capita e o objetivo é maximizar a soma descontada da utilidade ao longo de um horizonte de tempo específico.	(2) Bem-estar instantâneo: $W_t = L_t U(C_t/L_t) = L_t U(x_t)$ $U_{(x)} = \frac{x^{1-\alpha}}{1-\alpha}$ ($\alpha > 0$) em que, α – elasticidade da utilidade marginal relação ao consumo <i>per capita</i>.
Investimento e acumulação de capital	O capital acumula-se ao longo do tempo através do investimento líquido, i.e., investimento bruto líquido da depreciação do capital.	(3) Capital acumulado no tempo: $K_{t+1} = (1 - \delta)K_t + I_t$ ($0 < \delta < 1$) em que, I_t – investimento bruto; δ – taxa de depreciação do capital.

Fonte: Elaboração própria a partir de Ikefuji et al. (2019).

Nota. Na versão de 2016 do modelo DICE: $\gamma = 0.3$; $\alpha = 1.45$; $\delta = 0.1$.

A componente económica descreve a produção de bens e serviços com base nos fatores produtivos, bem como a utilização dos mesmos para consumo final e investimento. Na sua componente climática, o DICE apresenta um submodelo para o ciclo de carbono, ou seja, descreve como o CO₂ é emitido, absorvido e removido da atmosfera, dos oceanos e da terra, permitindo simular alterações de temperatura globais derivadas do aumento das concentrações de GEE, identificando impactos de curto e de longo prazo.

Tabela 4 - O Modelo DICE – Componente Climática

Representação	Descrição	Equações
Ciclo do carbono	Descreve como o dióxido de carbono é emitido, absorvido e removido da atmosfera, incorporando compartimentos para o carbono atmosférico, oceânico e terrestre.	(1) Emissões totais de CO₂^a $E_t = \sigma_t(1 - \mu_t)Y_t + E_t^0$ em que, σ_t – rácio das emissões de CO₂/ Intensidade de carbono; μ_t – fração de desconto de CO₂ /taxa de mitigação das emissões; E_t^0 – nível inicial de emissões “não-industriais”. (2) Acumulação da concentração de CO₂^b $M_{t+1} = (1 - b_0) M_t + b_1 X_{1,t} + E_t$ $X_{1,t+1} = b_0 M_t + (1 - b_1 - b_3) X_{1,t} + b_2 X_{2,t}$ $X_{2,t+1} = b_3 X_{1,t} + (1 - b_2) X_{2,t}$ em que, $X_{1,t}, X_{2,t}$.^c
Mudanças de temperatura	Dinâmica das mudanças de temperatura globais, resultantes do aumento das concentrações de GEE. Permite prever a resposta climática no curto e longo prazo.	(3) Aumento de temperatura^d $H_{t+1} = (1 - a_0)H_t + a_1 \log(M_{t+1}) + a_2 Z_t + F_{t+1}$ $Z_{t+1} = (1 - a_3)Z_t + a_3 H_t$ em que, Z_t – Variável auxiliar^e F_{t+1} – Força radioativa exógena.

Fonte: Elaboração própria a partir de Ikefuji et al. (2019).

Notas. ^aAs emissões de dióxido de carbono (CO₂) consistem em emissões industriais e emissões não industriais (“utilização dos solos”), sendo esta última exógena ao modelo (E_t^0). ^b A concentração de CO₂ na atmosfera é modelada por um sistema de equações diferenciais que descrevem a troca de carbono entre a atmosfera, a biosfera e os oceanos. ^c Variáveis auxiliares que representam os aumentos da concentração de CO₂ nos “oceanos de águas rasas”¹⁴ e águas profundas, respetivamente, e são medidas em GtC 1750, i.e., giga toneladas de carbono desde 1750. ^d Aumento da temperatura medida em graus celsius desde 1900. ^e Aumento da temperatura das águas profundas, medido em graus celsius, desde 1900.

¹⁴ Por oceanos de águas rasas entende-se a área entre a costa e as águas profundas (<https://www.twinkl.pt/teaching-wiki/shallow-ocean-ecosystems>, acesso março 2024).

Para além disto, segundo a Tabela 5, o DICE modela, pela análise da relação entre o clima e a economia, uma função de abatimento, que permite estimar o custo da redução de CO₂, e uma função dano, que permite quantificar os impactos económicos das mudanças climáticas em termos de perda de produção económica. A função dano baseada na temperatura média global inclui: danos diretos, tais como perdas agrícolas, aumento de desastres naturais, impactos na saúde pública e danos nas infraestruturas; e danos indiretos, nomeadamente, impactos sobre a produtividade do trabalho, migração e conflitos sociais.

Tabela 5 - O Modelo DICE – Abatimentos e Danos Económicos

Representação	Descrição	Equações
Função dano-abatimento	O impacto das mudanças climáticas na economia é modelado através de uma função de danos que relaciona o aumento da temperatura global com a perda percentual no PIB.	Função dano A parte não gasta do PIB, face aos abatimentos ^a e aos danos, é consumida ou investida, satisfazendo a restrição orçamental: $(1 - \omega_t - \xi H_t^2) Y_t = C_t + I_t$ em que $\omega_t = \psi_t \mu_t^\theta \quad (\theta > 1)^b$ $\omega_t Y_t^c$ $\xi H_t^2^d, \text{ com } \xi = 0,00236$ $\xi H_t^2 Y_t^c$

Fonte: Elaboração própria a partir de Ikefuji et al. (2019).

Notas. ^a Abatimento ou custo da redução é simplesmente o custo, em moeda, de uma intervenção que reduzirá as emissões de GEE por tonelada de carbono não emitido e é calculado pela divisão do custo adicional total de um investimento verde (custo do investimento mais a diferença entre os custos operacionais) pelas emissões evitadas (Hallegatte, 2023). ^b Função do custo de abatimento. ^c Fração do PIB gasta na redução. ^d Função de danos que depende só da temperatura. A temperatura ótima é a de 1900, i.e., $H_t = 0$, mas desvios do ótimo causam danos, sendo que, para temperaturas muito elevadas e muito baixas, a fração do PIB é maior, dado o valor de ξ , o que permite obter mesmo assim uma fração entre zero e um, sem ser em casos catastróficos. ^e Fração gasta do PIB para os danos.

Pela Tabela 5, a função consumo e a função investimento são representadas pelas seguintes expressões, respetivamente:

$$C_t = (1 - \omega_t - \xi H_t^2) Y_t - I_t \quad (5)$$

$$I_t = (1 - \omega_t - \xi H_t^2) Y_t - C_t \quad (6)$$

Relativamente às políticas de mitigação dos efeitos das alterações climáticas na economia e no ambiente, o DICE, como se depreende da análise da Tabela 6, também é usado para simular caminhos ótimos de emissões, i.e., os que equilibram os custos da mitigação com os benefícios da redução dos danos climáticos, através do cálculo do CSC, que é a estimativa monetária dos danos causados por uma tonelada adicional de CO₂ emitida na atmosfera.

Tabela 6 - O Modelo DICE – Componente das Políticas de Mitigação

Componentes	Representação	Descrição
Políticas de mitigação	Custo social das emissões de carbono	Incorpora o custo das emissões de GEE, incluindo a possibilidade de implementar políticas de preços de carbono, como impostos sobre o carbono ou sistemas de <i>cap-and-trade</i> .
	Tecnologias de mitigação	Avalia o impacto de tecnologias de mitigação, e.g., a captura e armazenamento de carbono, energia renovável, e eficiência energética.

Fonte: Elaboração própria a partir de Ikefuji et al. (2019).

No entanto, Faulwasser et al. (2018) afirmam que o DICE tem um problema de controlo ótimo, mas que, sendo resolvido através do *Receding Horizon Control*¹⁵ (RHC), dá origem, por conseguinte, a uma nova versão do DICE, designada por MPC-DICE, na qual incluem o tempo como uma variável explicativa, o que permite reescrever a dinâmica subjacente ao DICE relativo ao bem-estar e ao CSC, até porque, nos termos de Patel et al. (2023), “o problema de controlo ótimo é resolvido em cada intervalo de tempo de amostragem para o horizonte de previsão predefinido.” (p. 55).

Posto isto, com o objetivo de responder à pergunta desta investigação – identificar, qualitativamente, os resultados dos impactos das alterações climáticas no PIB através da

¹⁵ Segundo Patel et al. (2023), o RHC, também conhecido por MPC, “usa o modelo matemático do sistema para resolver um problema de controlo ótimo finito, de horizonte móvel e circuito fechado” (p. 55).

implementação das medidas de transição climática do PRR -, aplica-se o modelo de avaliação dos impactos ambientais DICE de Nordhaus (2016) através do recurso a uma técnica preditiva de controlo, conhecida por *Model Predictive Control* (MPC), i.e., neste estudo o DICE utilizado é a versão MPC-DICE, proposto por Faulwasser et al. (2018)¹⁶, porque segundo os autores:

- i) descreve uma implementação Matlab/programação de código aberto do modelo DICE, ou seja, está disponível, pública e gratuitamente, o que o torna mais acessível;
- ii) “esta implementação corrige dois erros de longa data ocorridos em anteriores implementações do DICE” (p. 124), uma vez que, através de uma solução aproximada do PCO de horizonte infinito, evita os efeitos semelhantes aos *turnpike effects*¹⁷ decorrentes da resolução de um PCO de horizonte finito;
- iii) “na verdade, a implementação do DICE (Nordhaus, 2013, 2016; Nordhaus e Sztorc, 2013) através de uma linguagem GAMS de código aberto já não está disponível *online* com um manual do utilizador.” (p. 120).

De notar que esta técnica foi introduzida, pela primeira vez, por Weller et al. (2015) e permite simplificar o processo do cálculo da força radiativa sem retirar a sua significância e robustez.

Neste sentido, o modelo MPC-DICE, em conjugação com o Matlab, utiliza a estrutura CasADi para a diferenciação logarítmica e otimização numérica¹⁸ (Andersson et al., 2016). Para além disso, é distribuído sob a *GNU Lesser General Public License* (LGPL)¹⁹, pelo que o código pode ser usado na forma de *royalty-free* mesmo em aplicações comerciais (Faulwasser et al., 2018).

Ainda segundo Faulwasser et al. (2018), este modelo possui onze variáveis explicativas, a saber: duas para modelar o clima global na forma de anomalias de temperatura atmosférica (T_{AT}) e oceânica (T_{LO}), ambas medidas em graus celsius; três para modelar o ciclo global de carbono sob a forma de concentrações de carbono na atmosfera (M_{AT}), no “oceano de águas

¹⁶ Segundo estes autores, o MPC-DICE surge como uma extensão dos estudos dos próprios realizados em 2016.

¹⁷ *Turnpike effects* são bloqueios que ocorrem numa linha de comunicação quando o tráfego de rede aumenta para além da sua capacidade (<https://www.computerhope.com/jargon/t/turneffe.htm>, acesso junho 2024).

¹⁸ Depois de descarregar o modelo utilizado é necessário colocar os documentos em CasADI em *set path* (<https://github.com/casadi/casadi/wiki>, acesso abril 2024).

¹⁹ É uma licença de software livre patrocinado pela Free Software Foundation (<https://www.gnu.org/licenses/lgpl-3.0.html>, acesso abril 2024).

rasas” (M_{UP}) e no oceano de águas profundas (M_{LO}), em unidades de GtC; uma para o capital global (K , em unidades de mil milhões, 2010 USD); uma variável que descreve a população global (L), em milhões de pessoas; uma variável relativa à produtividade total dos fatores (A); uma variável afeta à intensidade de emissões da atividade económica (σ), em unidades de GtCO₂ por mil milhões, 2010 USD; uma variável sobre as emissões derivadas das mudanças do uso da terra (E_{Land}), em unidades de GtCO₂; e, por último, uma para as forças radioativas resultantes dos GEE não-CO₂ (F_{EX}), em unidades de watts por metro quadrado (Wm^{-2}). No que diz respeito às variáveis de controlo do input, estas são a taxa de mitigação de emissões adimensionais (μ) e a taxa de poupança adimensional (s), sendo esta calculada pela razão do investimento e do produto líquido.

No sentido de facilitar a implementação do esquema MPC no modelo DICE, estes autores reformulam as suas funções, em particular, no cálculo do CSC.

Esta abordagem permite calcular o dano subjacente no modelo DICE de Nordhaus, na sua versão DICE 2016R, e que, posteriormente, irá afetar o PIB, segundo as equações das frações dano e abatimento, respetivamente:

$$\text{Fração dano} = \frac{a_2 T_{AT}(i)^{a_3}}{1 + a_2 T_{AT}(i)^{a_3}} \quad (7)$$

$$\text{Fração Abatimento}(i) = \theta 1(i) \mu(i)^{\theta 2} \quad (8)$$

De seguida, apresentam-se, por variáveis, as fórmulas-chave do MPC-DICE, que opera em etapas de cinco anos a partir de 2015, cujo índice de tempo é formulado por $t = t_0 + \Delta \cdot (i - 1)$, em que $t_0 = 2015$, $\Delta = 5$ e $i = 1, 2, 3, \dots$

O PIB é calculado pela função produção de Cobb-Douglas, onde, no período t , o PIB (Y_t) depende da eficiência tecnológica (A_t), força de trabalho (L_t), do capital (K_t) e da elasticidade de capital (γ), de acordo com Tabela 3.

As variáveis: temperatura (T); a concentração de carbono (M); o fator capital (K); a intensidade de emissões de carbono (σ); a população total (L); a produtividade total (A); as emissões resultantes das alterações ao uso da terra (E_{Land}) e força da radioatividade devido aos não-GEE (F_{EX}) são reformuladas nos termos apresentados na Tabela 3.

Neste estudo, atendendo às vantagens do DICE face aos outros, descritas na subsecção 2.2.2. desta investigação, considera-se que o DICE, na versão MPC-DICE, é o método que melhor se adapta à presente investigação, porque assenta num processo estruturado, integra análises

de risco e de sensibilidade, bem como incorpora, de uma forma holística, valores de custos e de benefícios e outros fatores.

3.2. Pressupostos de aplicação do modelo

De forma a simplificar a aplicação do modelo MPC - DICE, assumem-se, desde logo, três pressupostos de base:

- i) O choque pode ser introduzido no modelo através das variáveis: *stock* inicial de capital (k_0) e emissões iniciais de uso de solo (e_0); doravante referidas com a mesma simbologia, mas designadas por investimento verde e por reduções de emissões de CO₂, respetivamente;
- ii) O valor do *stock* inicial de capital está apresentado, no modelo, em mil milhões de dólares a preços constantes de 2010, pelo que, previamente, procede-se à transformação do valor em euros para dólares americanos, através da taxa de câmbio 1.0804 EUR/USD²⁰, e para preços constantes, através do deflator de preços (IPC ano base)/(IPC 2020), em que IPC 2010 = 100; IPC 2020 = 310,768²¹;
- iii) Considera-se que o PRR é um programa que é executado, de imediato, na sua totalidade, no ano em que são lançados os respetivos avisos de abertura de candidaturas às medidas de apoio ao investimento, i.e., que após a pandemia da Covid-19, 100% das verbas disponibilizadas são, efetivamente, introduzidas na economia portuguesa e que são executadas sem desfasamento temporal. Assim, o choque PRR verde é modelado como um choque único, como se os investimentos e os ganhos ambientais diretos deles recorrentes afetassem a economia num único momento de tempo, neste caso, o ano 2020.

Por outro lado, atendendo a que o modelo tal como está concebido é relevante apenas para valores mundiais, e para manter a consistência dos choques com as dinâmicas mundiais estimadas utilizadas no modelo, considera-se como pressuposto de cálculo na determinação dos valores a atribuir a cada variável uma regra de proporcionalidade direta da estrutura do investimento verde do PRR português nas variáveis mundiais.

²⁰Taxa de câmbio do Banco Central Europeu (https://www.ecb.europa.eu/stats/policy_and_exchange_rates/euro_reference_exchange_rates/html/eurofx-ref-graph-usd.pt.html, acesso 9 de junho 2024).

²¹Base de dados do Banco Mundial: Índice de Preços ao Consumidor 2020 (<https://data.worldbank.org/indicator/FP.CPI.TOTL>, acesso abril 2024).

Assim, para o capital, as verbas para o investimento verde do PRR, no total e em cada componente, são assumidas como diretamente proporcionais ao investimento da mesma natureza a nível mundial. Ou seja, o peso do investimento do PRR no PIB, no caso português, é semelhante ao peso do investimento do PRR global no rendimento mundial.

Desta forma, estima-se que o investimento do PRR ao nível global, por componente, pode ser dado por:

$$I_{PRR\ Global\ CX} = \frac{I_{PRR\ PT\ CX}}{PIB_{PT}} * PIB_{Global} \quad (9)$$

Em que, $I_{PRR\ Global\ CX}$ corresponde à verba destinada aos investimentos verdes de cada uma das componentes do PRR em análise ($CX = C11, C13, C15$) e estimada à escala global; $I_{PRR\ PT\ CX}$ representa a verba destinada aos investimentos verdes de cada uma das componentes em análise do PRR português; PIB_{PT} indica o valor do Produto Interno Bruto de Portugal em 2020²²; e PIB_{Global} traduz o valor do Produto Interno Bruto mundial em 2020²³.

No que concerne à variável $el0$, considerando a redução de emissões de CO_2 de forma indireta pela introdução de $el0$, assumimos como pressuposto um peso do Investimento do PRR sobre o PIB semelhante ao utilizado na componente de *stock* inicial de capital e aplica-se a dedução da redução de emissões de CO_2 ao nível mundial através de uma regra de proporcionalidade direta. Neste sentido, utiliza-se o seguinte raciocínio lógico-dedutivo na estimação da redução das emissões de CO_2 a nível global: se o nível de investimento de uma componente afeta determinadas unidades de GtC em $el0$ em Portugal, então o nível de investimento dessa componente ao nível global estima-se que reduzirá as emissões de CO_2 no montante aferido pela seguinte fórmula:

$$\Delta^{-}el_{Global} = \frac{I_{PRR\ Global} * \Delta^{-}el_{PT}}{I_{PRR\ PT}} \quad (10)$$

Em que, $\Delta^{-}el_{Global}$ corresponde à redução das emissões de CO_2 a nível mundial; $\Delta^{-}el_{PT}$ é a redução das emissões de CO_2 a nível nacional; $I_{PRR\ Global}$ traduz à verba destinada aos

²² Base de dados do Banco Mundial: valor do PIB a preços constantes de 2015 em USD, relativo a Portugal (https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD?_gl=1%2A1v0dr87%2A_gcl_au%2AMjAyODg0ODU1NS4xNzIzMDUxMDkz&locations=PT), acesso junho 2024).

²³ Base de dados do Banco Mundial: valor do PIB a preços constantes de 2015 em USD, à escala mundial (<https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD>), acesso junho 2024).

investimentos verdes PRR estimada à escala global; e $I_{PRR\ PT}$ representa a verba destinada aos investimentos verdes do PRR português.

De seguida, para executar as alterações no modelo, após a calibração descrita na subsecção 4.3, coloca-se no *script* “DICE2013R_mc” a última variável correspondente a $k0$ com o acréscimo do investimento da componente e no *script* “set_DICE_parameters” a variável exógena *Params.EL0*, referente a $el0$, com a devida redução de emissão de GtC.

Salienta-se ainda que, para a determinação dos efeitos da implementação do PRR – Transição Climática, esta começa pela projeção de um cenário *baseline*, que otimiza o bem-estar com a dinâmica inicial “sem investimentos verdes”; para, num segundo cenário, se aplicar os choques do investimento verde previsto no PRR, obtendo-se a otimização no cenário “com investimentos verdes”. Na sequência, importa também referir que os impactos decorrentes dos investimentos do PRR são simulados pelo diferencial entre as dinâmicas estimadas para as variáveis endógenas no modelo “com” e “sem” investimentos verdes.

3.3. Dados para a identificação de choques de política “verde” no modelo

Neste subcapítulo apresenta-se, em primeiro lugar, uma justificação para a opção de utilizar as emissões de CO₂ como a variável que melhor representa os GEE neste estudo, bem como uma breve análise descritiva das variáveis ambientais (subsecção 3.3.1.), nomeadamente as emissões de CO₂ por unidade de valor acrescentado, a Intensidade Carbónica da Economia (ICE) por setor e uma breve análise comparativa entre a ICE de Portugal e da UE, como também a temperatura média em Portugal. Em segundo lugar, descreve-se a dotação orçamental das componentes verdes de apoio ao investimento promovida pelo PRR e o seu impacto esperado no ambiente, pela indicação dos objetivos de redução de CO₂ por componente (subsecção 3.3.2.).

3.3.1. Variáveis ambientais

O conjunto das variáveis ambientais selecionadas para efeitos deste estudo é constituído pelas emissões de CO₂, concentração de CO₂ e temperatura verificadas em Portugal.

Em primeiro lugar, importa explicar a razão pela qual esta análise escolhe o CO₂ como o GEE de referência. Assim, a Tabela 7 denota que, dos GEE apresentados, o CO₂ concentrado na atmosfera portuguesa é o mais crítico dos três, não só porque assume um peso significativo na composição do ar verificada ano a ano, mas também por ter um registo crescente ao longo do período compreendido entre 1995 e 2017.

Tabela 7 - Análise Comparativa da Concentração de Gases CO, CO₂ e CH₄ na Atmosfera Portuguesa, janeiro

Tipo de gás	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017
Dióxido de carbono (CO ₂) ^a	360,9	370,8	377,6	390,1	400,1	404,7	408,4
Metano (CH ₄)	1,80	1,83	1,83	1,87	1,88	1,91	1,92
Monóxido de carbono (CO) ^c	0,14	0,13	0,12	0,14	0,11	0,10	n.d.

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados disponíveis em Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) (<https://www.ipma.pt/pt/oclima/gases.estufa/index.jsp>, acesso junho 2024).

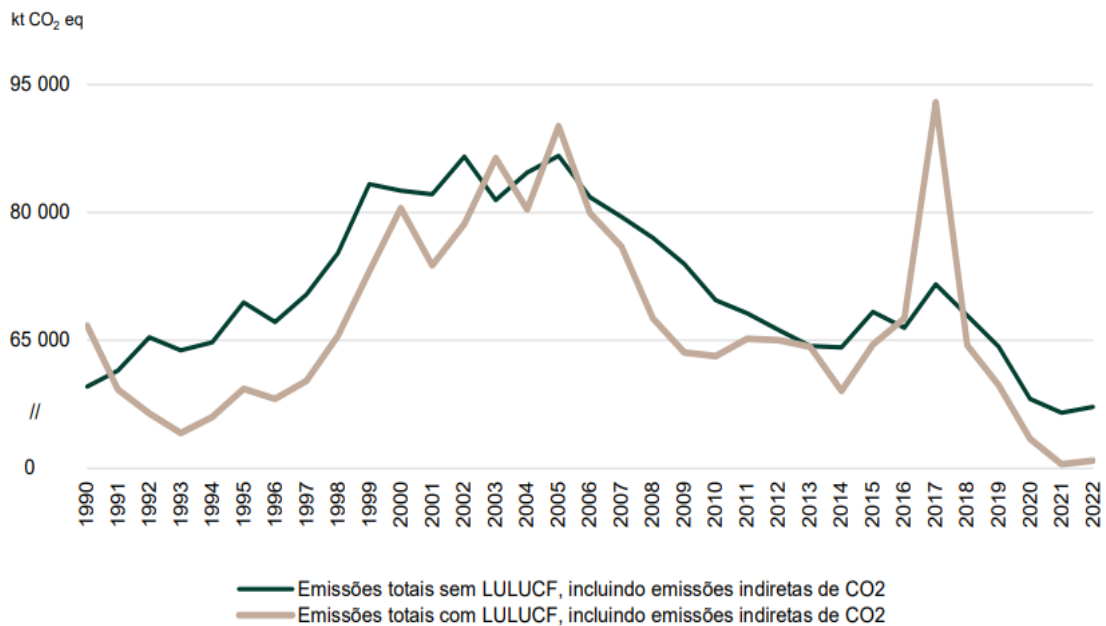
Notas. ^a Os registos estão medidos em ppm; ^{b c} Valores em ppb.

No entanto, segundo a CO2Meter (2024), os valores registados de CO₂ são valores considerados normais atendendo a que o indicador da qualidade do ar livre é, em média, cerca de 400 ppm²⁴. Neste caso, os outros gases, CO e CH₄ estão medidos em ppb (*parts-per-billion* - em que, segundo a conversão científica, um ppb corresponde a 0,001 ppm).

Segundo a Associação Portuguesa do Ambiente (2024, janeiro), o CO₂ “é o principal gás responsável pelo efeito de estufa, tendo representado 70,9% do total de emissões de GEE em 2022, o que está diretamente relacionado com a utilização de combustíveis fósseis e com a importância do setor da energia” (p. 49). No entanto, através da Figura 1, verifica-se que as emissões de CO₂, que contribuem para o aumento da concentração de GEE na atmosfera, têm vindo a diminuir desde 2005, registando os valores mais baixos em 2022 no período de análise 1990-2022. Os picos decorrentes da inclusão das *Land Use, Land-Use Change and Forestry* (LULUCF) coincidem com os anos em que se observou uma maior área ardida em Portugal (<https://statincendios.pt/>, acesso agosto 2024).

²⁴ A unidade ppm corresponde à expressão *parts-per-million* e define-se como uma unidade de medida que representa a relação entre um gás e outro, por exemplo, nos termos da CO2meter (2024, maio), 1.000 ppm de CO₂ significa que se se contar um milhão de moléculas de gás, 1.000 seriam de dióxido de carbono e 999.000 moléculas seriam de outros gases.

Figura 1 - Emissões de GEE



Fonte: Associação Portuguesa do Ambiente (<https://apambiente.pt/>, acesso maio 2024).

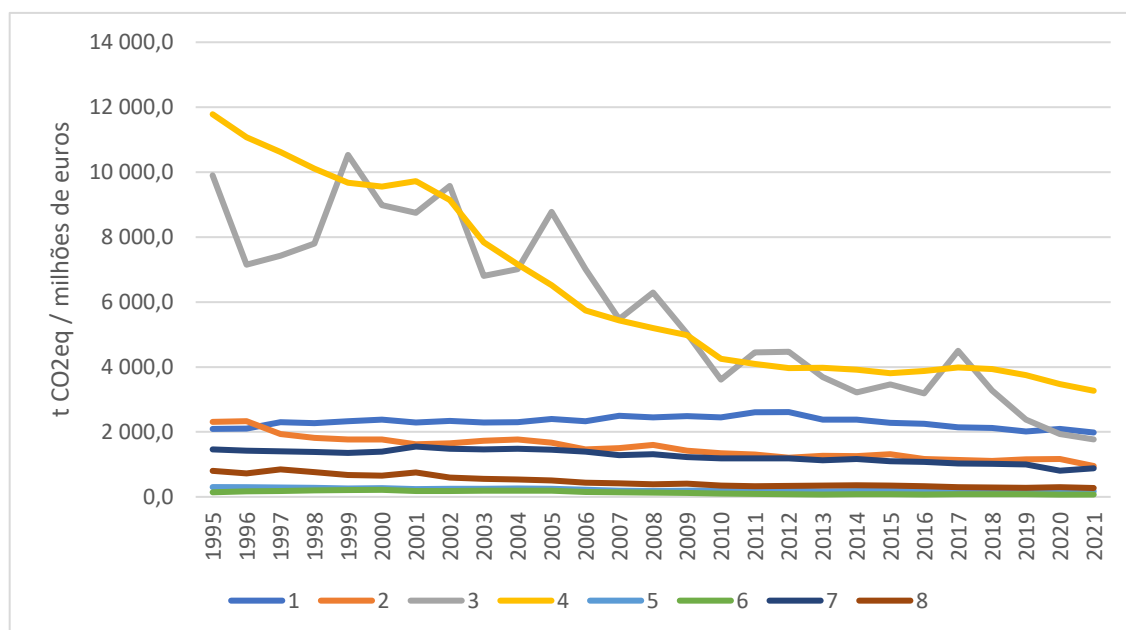
Nota. LULUCF, sigla inglesa = Uso do solo, alterações de uso do solo e florestas.

Através da análise da Figura 2, verifica-se que o índice de ICE português por setor de atividade, medido em tCO₂eq²⁵/milhões de euros, tem vindo a diminuir de forma acentuada, desde 1995 até 2021, nos setores da “eletricidade, gás e vapor” e da “captação, tratamento e distribuição de água”, ou seja, nestes dois setores a ICE diminuiu substancialmente de 9.896,7 tCO₂eq/M€, em 1995, para 1.769,9 tCO₂eq/M€, em 2021, e de 11.783 tCO₂eq/M€, em 2021, para 3.268,3 tCO₂eq/M€ em 2021, respetivamente.

Relevando para efeitos deste estudo, destaca-se que o ICE do setor da indústria extrativa e transformadora atingiu, em 2021, o valor de 951,30 tCO₂eq/M€, quando em 1995 a sua intensidade era de 2.315 tCO₂eq/M€, i.e., registando-se uma variação negativa da intensidade carbónica industrial significativa. Releva-se ainda a diminuição registadas no setor dos transportes e armazenamento, cujos valores diminuíram de 1.457,7 tCO₂eq/M€, em 1995, para 885,4 tCO₂eq/M€ em 2021.

²⁵ A unidade tCO₂eq - toneladas de dióxido de carbono equivalente “é uma unidade de medida internacional que tem como objetivo estabelecer a equivalência entre todos os gases de efeito estufa (GEE) e o dióxido de carbono (CO₂)” (Rodrigues et al., 2022, p.13).

Figura 2 - Evolução da Intensidade Carbónica da Economia por Setor de Atividade



Fonte: INE (<https://www.ine.pt>, acesso maio 2024).

Legenda: 1: Agricultura, produção animal, caça, floresta e pesca; 2: Indústria (extrativa e transformadora); 3: Eletricidade, gás, vapor; 4: Captação, tratamento e distribuição de água; 5: Construção; 6: Comércio por grosso e a retalho; 7: Transportes e armazenagem; 8: Restantes atividades.

Nota. O índice de $ICE(0,t)$ é calculado pela fórmula: Potencial de efeito de estufa no ano civil entre 0 e t ($PEE(0,t)$) / Valor Acrescentado Bruto no ano civil entre 0 e t ($VABpc(0,t)$).

Segundo dados disponibilizados pelo INE/Eurostat, Tabela 8, verifica-se que a ICE de Portugal apresenta, em todos os anos analisados entre 1995 e 2010, valores superiores à UE, o que permite concluir que a economia portuguesa é mais poluente do que a europeia.

Tabela 8 - Comparação entre a ICE de Portugal e da UE

Ano	Emissões de GEE		PIB		Intensidade carbónica da economia	
	1 000 t equiv. CO ₂		Milhões de euros		1 000 t equiv. CO ₂ / milhões de euros	
	UE27	Portugal	UE27	Portugal	UE27	Portugal
1995	5 212 624	70 496	7 037 765	89 802	0,74	0,79
1996	5 321 346	68 230	7 397 278	95 464	0,72	0,71
1997	5 227 497	71 264	7 806 818	102 110	0,67	0,70
1998	5 184 982	76 075	8 174 873	109 713	0,63	0,69
1999	5 075 095	84 196	8 588 597	118 661	0,59	0,71
2000	5 078 135	82 293	9 200 993	127 317	0,55	0,65
2001	5 131 258	83 212	9 584 032	134 471	0,54	0,62
2002	5 086 055	87 846	9 935 237	140 567	0,51	0,62
2003	5 172 271	82 530	10 104 162	143 472	0,51	0,58
2004	5 177 932	84 522	10 605 900	149 313	0,49	0,57
2005	5 148 712	86 540	11 072 291	154 269	0,47	0,56
2006	5 132 293	81 509	11 701 131	160 855	0,44	0,51
2007	5 078 976	79 020	12 406 299	169 319	0,41	0,47
2008	4 974 387	77 825	12 473 092	171 983	0,40	0,45
2009	4 609 880	74 372	11 754 457	168 529	0,39	0,44
2010	4 720 878	70 599	12 278 744	172 860	0,38	0,41

Fonte: INE e Eurostat. (<https://www.ine.pt>, acesso julho 2024).

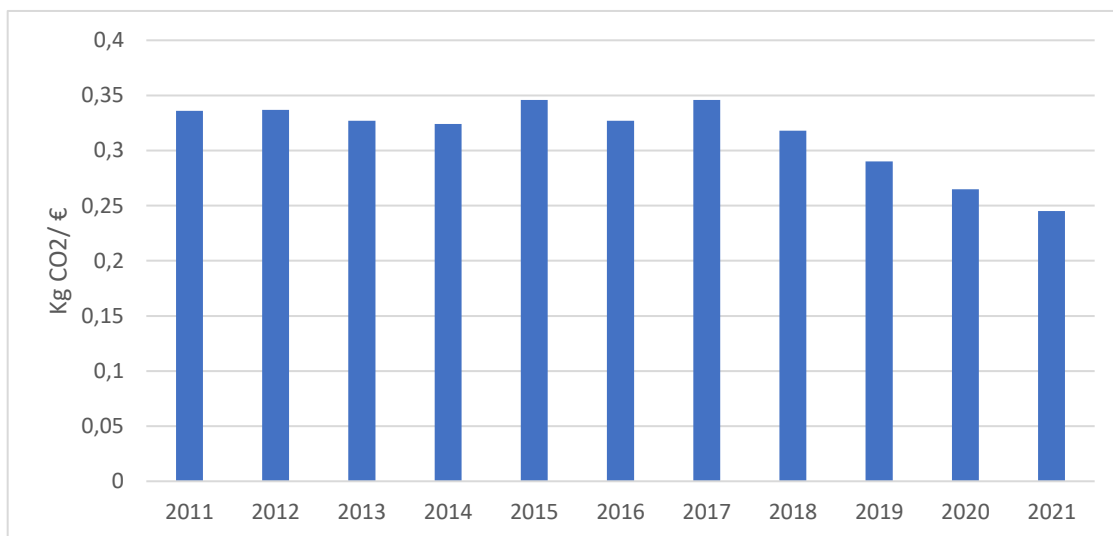
Para além disso, também pela análise da Tabela 8, constata-se, no período considerado, que tanto a ICE da UE como a portuguesa têm vindo a decrescer, muito embora essa descida seja superior na UE (0,38 mil toneladas equivalente CO₂/milhões de euros) do que em Portugal (0,36 mil toneladas equivalente CO₂/milhões de euros).

Analisando as emissões de CO₂ por unidade do VAB de Portugal, apresentadas nos últimos anos, de acordo com a Figura 3, verifica-se que há uma tendência de descida deste indicador, o que permite concluir que há uma maior eficiência da economia em termos ambientais.

A redução de emissões de CO₂ – uma das grandes finalidades do PRR - transição climática português –, através de medidas que promovam a eletrificação e descarbonização de processos, bem como a opção por fontes renováveis de energia na força motriz da economia,

tem vindo a ser cada vez mais comprovada pelo crescimento, nos últimos dois anos, do consumo de eletricidade e dos investimentos verdes (Ver Anexo H, Anexo I e Anexo J).

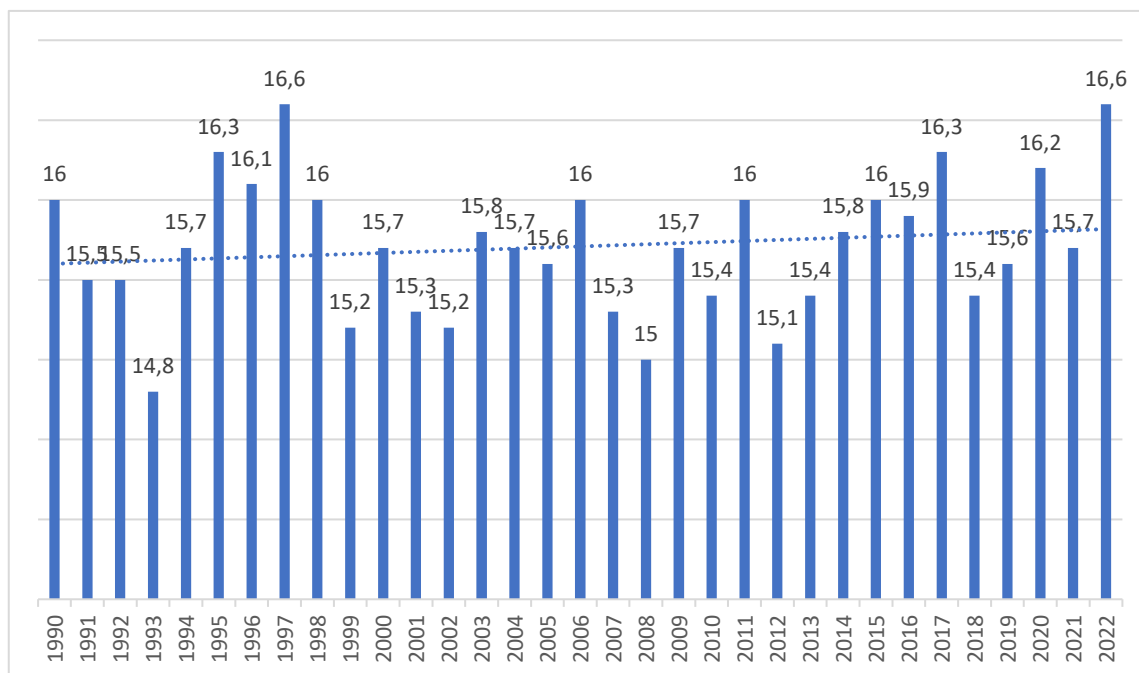
Figura 3 - Emissão de CO₂ por Unidade de Valor Acrescentado



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados estatísticos disponibilizados pelo INE. (<https://www.ine.pt>, acesso agosto 2024).

No que diz respeito à temperatura da atmosfera, e analisando a Figura 4, pode-se captar que entre 1990 e 2022: i) a temperatura média do ar tem vindo a aumentar em Portugal; ii) existe uma linha de tendência crescente nas últimas três décadas; iii) pela comparação entre os valores registados em 2022 com os verificados em 1990, constata-se que a temperatura média em Portugal aumentou, em termos absolutos, 0,6° C.

Figura 4 - Temperatura Média do Ar em Portugal, 1990-2022



Fonte: Elaboração própria a partir de informação disponibilizada pelo INE/IPMA (<https://www.ine.pt>, acesso agosto 2024).

Nota: Valores para Portugal continental em graus celsius (° C).

3.3.2. Variáveis económicas e impacto no ambiente

Tal como referido ao longo desta dissertação, nomeadamente na secção 2.3.2, o PRR inclui 5 componentes específicas na temática da transição energética e da sustentabilidade. No entanto, nesta dissertação, por falta de indicadores e dados para abranger todos, opta-se por aqueles que têm uma maior importância e peso no PRR, i.e., as componentes: descarbonização da indústria, eficiência energética em edifícios, e a mobilidade sustentável, conforme Anexo A, Anexo B e Anexo C.

São estes os investimentos considerados como choques no investimento verde. Estes choques têm um impacto no investimento em capital físico (dimensão económica direta) e, simultaneamente, impactos na redução de emissões de GEE (dimensão ambiental direta).

Quanto à dimensão económica direta, na implementação do modelo, utilizam-se como choques no *stock* inicial de capital os valores referidos na Tabela 9, que representam as verbas totais disponibilizadas para as componentes C11, C13 e C15, valorizadas em euros a preços correntes, e em dólares, a preços constantes, unidade de medida no modelo.

Tabela 9 - Choques no Valor do Stock Inicial de Capital

Componente	Dimensão do PRR	Dotação Orçamental	
		M EUR	M USD
C11	Descarbonização da indústria	987	343,1353292
C13	Eficiência energética em edifícios	810	281,60042216
C15	Mobilidade sustentável	1.353	470,37700158

Fonte: Elaboração própria com base em informação disponibilizada em EMRP.

Notas. As verbas destinadas à C21- RepowerEU estão integradas nas componentes C11, C13 e C15. Preços constantes de 2010, valorizados em milhões de euros (M EUR) e em milhões de dólares (M USD). O câmbio foi efetuado à taxa 1.0804 EUR/USD²⁶.

Em primeiro lugar, realça-se que a componente C11- Descarbonização da Indústria, inserida no PRR, representa 19,2% do total do investimento, com uma dotação orçamental de 343 milhões de USD. Nesta medida, também se sabe que, através dos Avisos de Abertura de Concursos (AAC) números 01/C11-i01/2021- Apoio à elaboração de roteiros de descarbonização da indústria e capacitação, e 02/C11-i01/2022 - Apoio à Descarbonização da Indústria²⁷, a meta desta medida é contribuir para a redução média de 30% das emissões diretas e indiretas de GEE nos projetos apoiados.

Em segundo lugar, importa referir que a componente C13 - Eficiência Energética em Edifícios representa cerca de 15,9% do total do investimento, totalizando um valor de 281,6 milhões de dólares a preços constantes de 2010, i.e., um acréscimo de 0,32919 mil milhões de dólares em k0 normalizado à escala global. Neste sentido, tal como previsto no documento emitido pelo Ministério do Planeamento, pretende-se alcançar uma “redução anual de emissões de gases com efeito estufa na ordem de 40kton de CO₂-eq” (p. 102), pelo que, até ao final do período de implementação do PRR, espera-se uma redução de 0,000065454 GtC de CO₂.

Posto isto, e pressupondo os mesmos princípios aplicados na componente anterior, à escala

²⁶Base de dados do Banco Central Europeu: taxa de câmbio (https://www.ecb.europa.eu/stats/policy_and_exchange_rates/euro_reference_exchange_rates/html/eurofx-ref-graph-usd.pt.html, acesso 9 de junho 2024).

²⁷Avisos de abertura de concursos disponibilizados pela EMRP (<https://recuperarportugal.gov.pt/candidaturas-prr/>, acesso junho 2024).

global, entende-se que com o investimento gerado pela C13 ocorre uma redução de 0.00007667 GtC em el0.

Por fim, em terceiro lugar, convém notar que a componente C15- Mobilidade Sustentável corresponde cerca de 33% do total do investimento, totalizando um valor aproximado de 470,4 milhões de USD.

Ao contrário das C11 e C13 - nas quais se aplica o valor da meta/objetivo como um choque exógeno -, nesta componente C15 - Mobilidade Sustentável, considera-se como pressuposto, a redução de CO₂ por cada km de extensão à rede de metro em cada linha e por cada aquisição de veículos de mobilidade sustentável, de acordo com a última referência descrita pela Metro do Porto (2024, junho) e Câmara Municipal do Porto (2024, junho).

Nestes termos, a Tabela 10 permite descrever quantos km serão adicionados em cada linha e indica em quanto se estima que cada linha de metro contribuirá para reduzir emissões.

Assim, por um lado, segundo a Metro do Porto, S.A. (2024, junho), se uma extensão total de 67 km de rede reduz 55 mil toneladas por ano de CO₂, então reduzem-se, em média, cerca de 0,820895522 toneladas de CO₂ por cada km de extensão de rede adicional. Por outro lado, nos termos da Câmara Municipal do Porto (2024, junho), se cerca de 5 automóveis 100% elétricos reduzem 441 toneladas de CO₂ equivalente, então, por cada meio de transporte descarbonizado, reduzem-se cerca de 88,2 toneladas de CO₂, *ceteris paribus*.

Tabela 10 - Síntese da Redução de Emissões de CO₂ da Componente C15 em GtC

Descrição	Extensão	Redução de CO ₂
Expansão da Rede de Metro de Lisboa- Linha Vermelha até Alcântara	Extensão de 3,7 km	8,288 x 10 ⁻¹⁰ GtC
Expansão da Rede de Metro do Porto - Casa da Música - Santo Ovídio	Extensão de 6,74 km	1,50976 x 10 ⁻⁹ GtC
Metro Ligeiro de Superfície Odivelas - Loures	Extensão de 12km	82,688 x 10 ⁻⁹ GtC
Linha BRT Boavista - Império	Extensão de 3,8 km	8,512 x 10 ⁻¹⁰ GtC
Descarbonização dos Transportes Públicos	Aquisição de veículos limpos (145 autocarros)	2,41 x 10 ⁻⁸ GtC
Total		2,997776 x 10 ⁻⁸ GtC

Fonte: Elaboração própria a partir de informação retirada de EMRP (2024, fevereiro).

Nota. Se por cada tonelada de CO₂, a quantidade de carbono é 12/44 toneladas, então 0,820895522 toneladas de CO₂ x 12/44 é toneladas de carbono e, toneladas de carbono a dividir por 10⁹ é em GtC. Assim, 0,820895522 toneladas de CO₂ é, aproximadamente 2,24 x 10⁻¹⁰ GtC. Ou seja, por cada km adicional de rede de metro, reduz-se cerca de 2,24 x 10⁻¹⁰ GtC; e, a aquisição de 145 veículos limpos permite a redução de 2,41 x 10⁻⁸ GtC.

3.4. Calibração do modelo MPC-DICE

O processo de calibração do modelo é um passo fulcral para qualquer estudo de simulação previsional. Uma vez selecionado o modelo MPC-DICE, com escolha fundada nos termos da argumentação apresentada em 3.1, realça-se que este tem uma parametrização mundial assegurada por defeito e que decorre das versões DICE anteriores (2013R e 2016R), pelo que importa agora proceder à sua calibração de acordo com o foco da investigação.

Nesse sentido, e de acordo com os resultados obtidos, são feitas três tentativas sequenciais de abordagem na calibração aplicadas ao modelo MPC-DICE, que, como foi referido, está calibrado para valores a nível mundial.

A primeira consistiu na utilização de dados recolhidos para Portugal, tanto económicos como ambientais, com a parametrização inicial do modelo, i.e., as variáveis portuguesas foram encaixadas no modelo como se tratasse de valores à escala global, o que, por um lado, fez perder a credibilidade científica dos resultados e, por outro lado, os resultados nulos obtidos

fazem com que esta aproximação seja desaconselhada.

A segunda tentativa de abordagem de calibração fundou-se na utilização do modelo RICE-EU²⁸, que, muito embora com objetivos de estudo diferentes do MPC-DICE, relaciona também variáveis económicas com as ambientais, mas, porque está calibrado para a Europa, gerou incompatibilidades de parametrização, o que não permitiu, tal como a primeira abordagem, obter resultados credíveis. Nesta tarefa, são utilizados os parâmetros da calibração subjacente ao modelo RICE-EU, nomeadamente os parâmetros iniciais ambientais, tais como o desvio da temperatura atmosférica em relação ao ano de referência 1750 (°C), desvio de temperatura no oceano inferior em relação ao ano de referência 1750 (°C), massa de carbono no reservatório para a atmosfera (GtC), massa de carbono no reservatório para o oceano superior (GtC) e massa de carbono no reservatório para o oceano inferior (GtC). Como já referido, estes parâmetros estão calibrados para a Europa, mas foram utilizados como melhor aproximação para Portugal. Ou seja, considera-se que a referência paramétrica aos níveis do Oceano Atlântico e à Massa de Carbono da Atmosfera Europeia, por simplificação, é a mesma referência à de Portugal, respetivamente.

Mediante as dificuldades de compatibilização com as dinâmicas mundiais do modelo, opta-se pela estratégia de extrapolação para valores mundiais dos choques em Portugal, referidos na subsecção 3.3.2. Assim, na terceira tentativa, replica-se a estrutura dos choques do PRR em Portugal para a dimensão mundial, de acordo com pressupostos de proporcionalidade. Ou seja, opta-se por adotar um processo dedutivo de Portugal para a escala global, admitindo como pressuposto que a taxa de investimento do PRR sobre o PIB de uma determinada componente é semelhante ao nível global, ou seja, $y\%$ do PIB mundial. Logo, usando todo o Investimento na mesma proporção no mundo, temos uma redução de $el_0 = x \cdot y$ (PIB mundial).

É ainda de ressaltar que a parametrização pode ser dividida em duas tipologias: a climática (que inclui parâmetros de difusão do ciclo do carbono, parâmetros de difusão climática e outros parâmetros geofísicos) e a socioeconómica. Assim, refere-se ainda que a parametrização do modelo é efetuada, em termos de difusão climática e difusão do ciclo do carbono, de acordo com o Anexo D, e de outros parâmetros geofísicos, nos termos do

²⁸ O RICE-EU é um modelo DICE, apenas se diferencia do DICE, porque compara entre si, variáveis económicas e ambientais à escala continental, utilizando uma calibração para cada continente, incluindo a Europa (Gazotti, 2022).

Anexo E, bem como a parametrização de variáveis socioeconómicas e a parametrização inicial e auxiliar é realizada de acordo com os Anexo F e Anexo G, respetivamente.

No que concerne à parametrização climática, assumem-se os mesmos valores, até porque os dados de força radioativa são calculados globalmente e detêm as mesmas forças cíclicas ao nível local/nacional, independentemente do país. Destas, apenas as emissões iniciais do uso do solo (eland0), i.e., LULUCF, em GtC/ano, poderia ser alterada, sendo que, pelo National Inventory Report – Portugal, o valor padronizado seria quase irrisório de -0.000004646 GtC em 2020²⁹.

Em relação à parametrização económica, através dos dados disponíveis no Banco Mundial, normalizamos os dados portugueses ao modelo utilizando a mesma unidade de medida no modelo para as variáveis de Portugal. Assim, alguns parâmetros relacionados com as forças cíclicas económicas, tais como: i) a elasticidade do capital na função de produção (gama), ii) o termo multiplicador de danos (a2), iii) taxa de depreciação do capital por ano (dk), iv) a elasticidade da utilidade marginal do consumo (elasmu) e a v) taxa inicial de preferência social temporal por ano (prstp) são substituídos por valores que melhor caracterizam a economia portuguesa de forma a replicar a eficiência de Portugal. Para além destas, outras variáveis como a população global inicial (milhões de pessoas) (pop0), o total dos fatores de produção inicial (a0) e a intensidade inicial das emissões* (GtC/ mil milhões, constante 2015USD) foram padronizadas à escala global.

Na parametrização económica da componente C11- Descarbonização da Indústria:

- i) realça-se que as verbas, como referido na subsecção 3.3.2, totalizam um valor de 343,1353 milhões de dólares a preços constantes de 2010, i.e., um acréscimo de 0,309665173 mil milhões de dólares em k0 normalizado ao nível mundial³⁰;
- ii) segundo o Inventário Nacional de Emissões 2022, as emissões de CO₂ representam 73% do total dos GEE; então, em média, o investimento associado à medida C11 refletirá uma redução de cerca de 21,9%³¹, o que equivale a uma redução média de 0,0126144 GtC de CO₂. Esta redução média, através de uma regra simples de proporção, e admitindo que o peso do

²⁹ Este valor negativo justifica-se pela emissão positiva de oxigénio, pela densidade florestal de Portugal e a menor incidência de incêndios no ano.

³⁰ Determinado pela fórmula (10) apresentada na secção 3.2. Pressupostos do modelo.

³¹ Se na componente C11, a meta de redução de GEE é de 30% e, como vimos na secção 3.3.1, as emissões de CO₂ representam 73% em 2020, logo, a medida C11 representa 21,9% de redução de CO₂.

investimento desta medida em Portugal é semelhante à escala global, admite-se que o investimento desta componente proporciona uma redução de cerca de 0,014388456 GtC.

Na parametrização económica da componente C13 - Eficiência Energética em Edifícios:

- evidencia-se que as verbas, como referido na subsecção 3.3.2, totalizam um valor de 281,6 milhões de dólares a preços constantes de 2010, i.e., um acréscimo de 0,32919 mil milhões de dólares em k0 normalizado à escala global;

- segundo o Ministério do Planeamento (2021), pretende-se alcançar uma “redução anual de emissões de gases com efeito estufa na ordem de 40kton de CO₂-eq” (p. 102), pelo que, até ao final do período de implementação do PRR, espera-se uma redução de 0,000065454 GtC de CO₂³², o que permite afirmar que, com o investimento gerado pela C13, ocorre uma redução de 0.00007667 GtC em el0, à escala global.

Por fim, na parametrização económica da componente C15 - Mobilidade Sustentável:

- verifica-se que, como referido na subsecção 3.3.2, a dotação orçamental totaliza um valor de 470,37 milhões de dólares a preços constantes de 2010, i.e., um acréscimo de 0,547424046 mil milhões de dólares em k0 padronizado ao nível mundial.

³² Cálculo auxiliar: com a implementação desta medida espera-se uma redução total de cerca de 0,000010909* 6 anos = 0,000065454 GtC de CO₂.

CAPÍTULO IV – ANÁLISE DE RESULTADOS

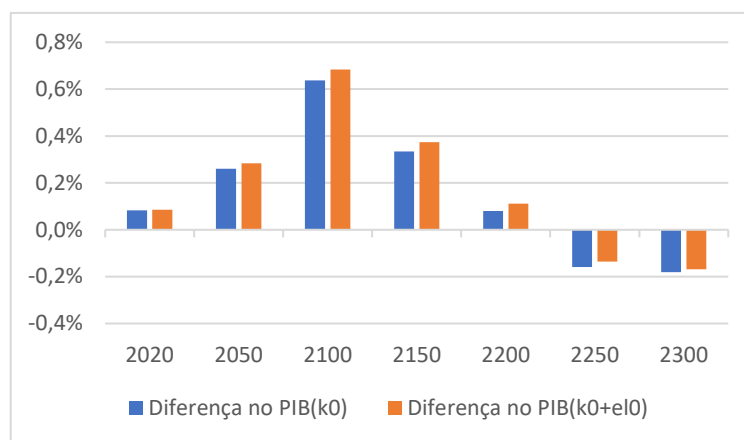
Neste capítulo pretende-se responder à questão de investigação, pela apresentação e aferição de vários resultados da simulação de diferentes tipos de choque do PRR no PIB português (subsecção 4.1). Após esta exposição, procede-se a uma análise comparativa das várias simulações e à avaliação de forma integrada dos choques identificados no PRR, nomeadamente das componentes com maior relevância descritas anteriormente, conforme a literatura (subsecção 4.2).

4.1. Resultados de simulação de diferentes tipos de choque identificados no PRR

Tal como explicitado ao longo desta dissertação, as componentes para a transição climática dos investimentos subjacentes no PRR português afetam o PIB principalmente por dois canais: (i) pela redução de emissões de CO₂ (via eletrificação e descarbonização de processos produtivos, e a opção por fontes renováveis de energia na força motriz da economia); e (ii) pelo aumento do *stock* de capital físico via investimento verde *per se*.

A Figura 5 apresenta os resultados da implementação do choque exógeno nas variáveis supramencionadas. Como primeiro resultado, conclui-se que a implementação dos projetos verdes, apenas na sua componente variação de *stock* de capital (k_0) tem um efeito positivo no produto no primeiro século de implementação, o que pode ser justificável pelo aumento da procura privada e respetivo multiplicador da procura agregada; no entanto, após 2100, verificam-se ganhos decrescentes, bem como perdas a partir de 2200. Isto pode ser justificável, por hipótese, pelo efeito da depreciação de k_0 estar a suplantar o investimento, a partir dos ganhos associados.

Figura 5 - Variações Percentuais do PIB Resultantes do PRR Climático Português, 2020-2300



Nota. Projeções dos impactos económicos, medidos pelas variações percentuais no PIB, até 2300 resultantes do choque do PRR em 2020, pelos canais $el0$ e $k0$ (emissões de CO_2 e investimento verde, respetivamente).

Como segundo resultado, conclui-se que, adicionando a variação da redução de emissões de CO_2 à análise, também há diferentes efeitos no PIB ao longo do tempo, excedendo os ganhos do investimento *per se*. Ou seja, o investimento verde ($k0 + el0$, a laranja) exhibe impactos positivos adicionais superiores ao investimento não direcionado para preocupações ambientais ($k0$, a azul). Até 2150 há um efeito positivo e crescente; de 2150 até 2200 existem efeitos positivos, mas decrescentes; de 2200 até 2300 gera um efeito negativo.

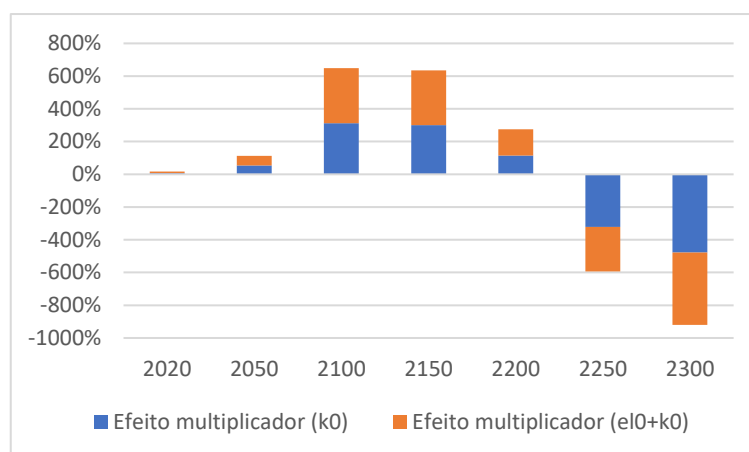
Analisando o efeito das variáveis independentes no PIB, quer o investimento, quer a redução das emissões pretendidas, perspectivadas individualmente ou em conjunto, verifica-se - como terceiro resultado - uma semelhança no comportamento e impacto económico ao longo do tempo analisado.

Assim, também através da Figura 5, por via da redução da $el0$ e aumento da $k0$, podemos explicar com base na definição de conceitos. É verdade que, tal como mencionado, tanto a redução da $el0$ e o aumento da $k0$ são dois canais distintos que influenciam o nível do PIB. No entanto, a causa que cria o choque exógeno direto nesta investigação é dada pelo investimento. Logo, por esta via, é o investimento verde resultante das várias medidas do PRR que afeta diretamente a atividade económica do país.

Posto isto, a dinâmica semelhante no canal da $el0$ pode ser explicada por ser um impacto indireto do investimento, porque, como já referido, um investimento verde acarreta sempre uma redução das emissões de CO_2 , visto ser a principal finalidade de esforços de

investimento desta natureza: impactar positivamente no ambiente. Deste modo, podemos denominar como um impacto sombra no PIB, uma vez que sem o investimento preconizado pelas medidas do PRR, a dinâmica da redução de $el0$ também não existia, pelo que serão impactos complementares entre si, em que a redução de $el0$ reforça o canal do investimento no PIB.

Figura 6 - Multiplicador Efetivo por cada USD Investido ($k0$ e $el0+k0$), Resultantes do PRR Climático Português, 2020-2300



Nota. Apresentam-se os multiplicadores efetivos, medidos pelas variações percentuais no PIB por cada USD investido em cada componente, até 2300 resultantes do choque do PRR em 2020, pelos canais $el0$ e $k0$ (emissões de CO_2 e investimento verde, respetivamente).

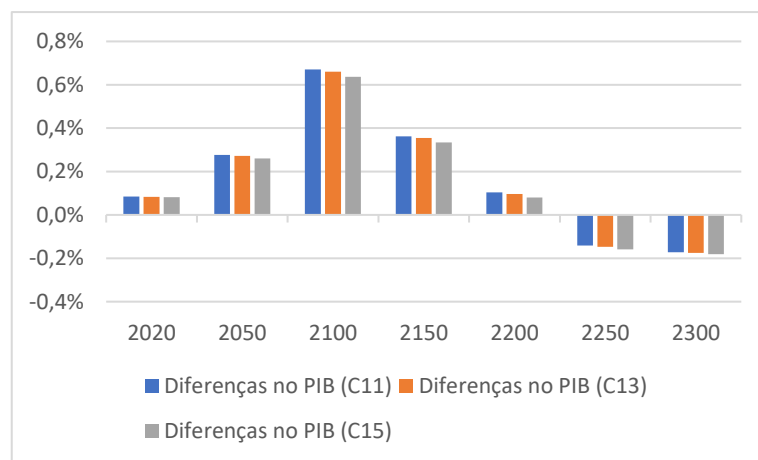
Da interpretação da Figura 5 e Figura 6 é importante ainda realçar que, embora o impacto do investimento seja positivo no primeiro século, e embora a literatura existente defenda que o investimento sustentável implica um crescimento económico sem prejudicar as gerações futuras, verifica-se que o impacto indireto pela redução de CO_2 também beneficia o efeito positivo no PIB, representando em 2150, por cada USD investido, um diferencial positivo no PIB de cerca de 35% face aos ganhos obtidos num investimento dito não sustentável.

Por fim, também verificamos que os efeitos no PIB a muito longo prazo são negativos, o que, porventura, pode ser justificado pelos impactos indiretos e induzidos tornarem-se superiores ao nível de investimento inicial e que, por conseguinte, enfraquecem os níveis de consumos intermédio e final de bens e serviços.

4.2 Avaliação integrada de uma seleção de choques identificados no PRR

De facto, da análise da subsecção anterior, pode-se observar que as diferenças de impacto são reduzidas. No entanto, nesta subsecção, de forma a clarificar as suas diferenças em comparação com o total destas três componentes inseridas do PRR, foi feita uma transposição dos valores do PIB que já incorpora o impacto do PRR, e observa-se, empiricamente, e em valores absolutos, o seu impacto económico-ambiental.

Figura 7 - Impactos Económicos por Componente PRR - Transição Climática, 2020-2300 (em % do PIB)

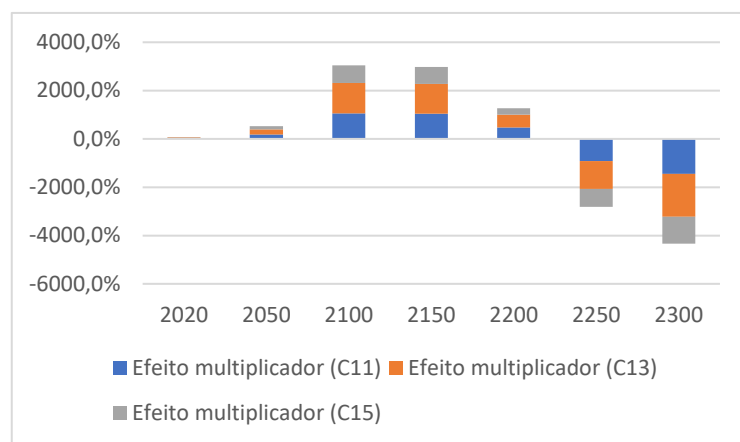


Nota. Projeções dos impactos económicos até 2030 com base em 2020, em variação percentual do PIB, cenário *baseline*, por componente de transição climática do PRR: C11; C13; e C15.

Pela análise da Figura 7 é de destacar que o PIB em percentagem do PIB potencial mundial (e que é, por pressuposto, aproximadamente o mesmo para Portugal neste estudo) representa um potencial ganho no produto, com estes investimentos inframencionados, entre 0,082% em 2020, com um máximo de 0,084%, e em 2100, entre 0,671% e 0,637% do PIB.

Assim, é possível afirmar que o PRR tem um impacto positivo no nível económico do país e que, de facto, as componentes em análise permitem um efeito concordante com os objetivos do próprio programa na medida em que concretizam as suas finalidades. De facto, o PRR total permite um crescimento significativo no médio/longo prazo e o efeito cumulativo, embora presente de forma reduzida, é maior do que o simples somatório das componentes individuais o que se pode justificar pelos efeitos sinérgicos das diferentes medidas presentes no PRR.

Figura 8 - Multiplicador Efetivo por cada USD Investido por Componente PRR/Transição climática, 2020-2300 (em % do Investimento da Componente)



Nota. Multiplicador efetivo por cada USD gasto, por componente do PRR - Transição climática (C11; C13; e C15), calculado em percentagem do investimento alocado a cada componente.

É comum verificar, pela teoria económica, que os investimentos em infraestruturas tendem a ter um impacto no crescimento exponencial no longo prazo, embora com alguns efeitos noutras variantes macroeconómicas tal como o nível de inflação. Estes impactos são justificados na literatura pela melhoria de produtividade no que concerne à utilização eficiente de fontes de energia renováveis de menor custo; à aquisição de mais capacidade tecnológica pelas empresas; e à melhoria das redes de transporte. No entanto, o que se verifica empiricamente é que, no longo prazo, o efeito de obsolescência de ativos e o impacto dos canais económicos, como o aumento da taxa de juro e dos níveis de inflação, sobrepõem-se ao aumento da atividade económica no curto e médio prazo imposto pelo maior investimento.

Por último, importa referir que a análise dos dados apresentados na subsecção 3.3.2 permite, *a priori*, tirar a seguinte ilação, em termos de impactos ambientais desejados: a redução direta de emissões de CO₂ pela C11 é superior à da C13, que por sua vez é superior à C15, ou seja, C11 > C13 > C15. Em suma, a medida da descarbonização da indústria é a ambientalmente mais importante, porque é aquela que gera, em termos absolutos, uma maior redução de emissões CO₂.

Pela análise da Tabela 11, conclui-se que a C11 é a componente verde mais eficiente das medidas do PRR em análise, uma vez que regista uma redução total de CO₂ por mil milhões de dólares americanos superior às restantes.

Tabela 11 - Redução de CO₂ em Portugal por Componente PRR – Transição ambiental

Componente do PRR	Verbas em M USD	Redução total de CO ₂ em GtC	Redução total de CO ₂ por mil M USD
C11 - Descarbonização da indústria	343,1353292	0,0126144	0,0367766
C13 - Eficiência energética em edifícios	281,60042216	0,000065454	0,00007667
C15 – Mobilidade sustentável	470,37700158	0,0000000299	0,000000013

Fonte: Elaboração própria, a partir de EMRP (2024, fevereiro).

Nota. Valores investidos a preços constantes. M USD = Milhões de dólares americanos. GtC = Giga Toneladas de Carbono.

Através da Figura 8 e das conclusões da Tabela 11, em que a componente C11 tem o maior impacto absoluto em termos de redução de CO₂, agora, retira-se que, em termos de eficiência por cada unidade de USD investido, a componente que representa os melhores níveis de impacto no PIB é a componente C13, em que por cada USD investido, produz um aumento de 1235,7% no PIB em 2150, ao invés de 1038,8% e 698,8%, como representado pelas componentes C11 e C15, respetivamente.

Por fim, é ainda importante realçar que os valores observados estão em variações percentuais do PIB estimado em mil milhões de euros, a preços constantes de 2010 e que este estudo retrata uma análise previsional de impacto, pelo que o efeito desejado depende da estabilidade política, como também das condições económicas globais que podem influenciar o crescimento económico sustentado.

CAPÍTULO V – CONCLUSÃO

O PRR português tem sido alvo de discussão nos últimos anos, correspondendo a um grande marco na economia portuguesa, uma vez que retrata um elevado montante de verbas oriundas do MRR da UE. Os fundos europeus são geralmente retratados com impacto positivo na economia dos EM, no entanto, até ao momento, não existe conhecimento na literatura se, e de que forma, o investimento na transição climática no âmbito destes fundos afeta o crescimento económico sustentável comparativamente ao investimento “não verde”.

Sendo assim, a presente dissertação tem como objetivo pioneiro evidenciar uma revisão de literatura sobre os mecanismos de transmissão de políticas ambientais no crescimento económico e, caso exista, o impacto positivo no PIB do PRR no que concerne à transição ambiental, i.e., tentar responder à pergunta: existirá uma correlação positiva entre as políticas económicas de financiamento para a transição climática previstas no PRR e o crescimento económico português?

Após a crise pandémica, que se iniciou em 2020, surgiu o MRR que integra uma série de medidas ambientais no âmbito da remodelação de edifícios, descarbonização da indústria e mobilidade sustentável. Através da metodologia MPC-DICE de Faulwasser et al. (2018), descrita na subsecção 3.1, considerada como a mais adequada, mais recorrente na literatura, e disponível, pretende-se prever o impacto no PIB português da utilização destas verbas com a incorporação de uma função dano que reflita o PIB “líquido” até ao ano 2300.

Aplicando este modelo, com os pressupostos assumidos e elaborados no sentido de ultrapassar as dificuldades da sua aplicabilidade para casos nacionais, foi possível retirar algumas conclusões, nomeadamente:

- i) Parece haver uma correlação positiva entre a utilização de verbas das medidas de financiamento para a transição climática previstas no PRR e o PIB;
- ii) A implementação de projetos de investimento verdes, i.e., a introdução de capital na economia, parece ter um efeito positivo no PIB no primeiro século; porém, no horizonte após 2100 tende a verificar-se uma descida acentuada do nível do PIB, i.e., do crescimento económico;
- iii) A redução associada de emissões de CO₂ também parece ter diferentes efeitos no PIB ao longo do tempo, i.e., até 2150 tem um efeito positivo e crescente; até 2200 continua a

acarretar um efeito positivo, mas ligeiramente decrescente; e no horizonte 2200 - 2300 produz um efeito negativo crescente;

- iv) Quer a variável económica *per se* (acumulação de capital físico), quer a ambiental parecem impactar da mesma forma no crescimento económico, i.e., o impacto da redução das emissões de CO₂ acompanha o efeito do aumento do investimento verde no PIB ao longo do tempo num horizonte alargado; pelo que parece existir um efeito sombra, justificado pelo facto de que a aquisição de capital verde se traduz, naturalmente, na consecução de metas ambientais.

A presente investigação apresenta, no entanto, várias limitações. A primeira refere-se à incompatibilidade de dados nacionais com a calibração do modelo para um contexto mundial, pelo que a implementação passou pela dedução dos valores a nível nacional para a escala mundial. Em segundo lugar, o estudo apenas incorpora o efeito dos investimentos, embora o PRR inclua investimentos e reformas, i.e., não incorpora os investimentos em obras públicas para a melhoria da qualidade de vida no âmbito da melhor higienização e recursos médicos. Embora tenham sido consideradas as medidas mais significativas em termos de peso na dotação orçamental, a terceira limitação decorre destas representarem apenas três componentes de investimentos das cinco possíveis, uma vez que existe falta de informação no que se refere a intenção de diminuição de emissões de CO₂ por componente.

Para ultrapassar esta dificuldade, os valores da redução de emissões de CO₂ foram estimados através da aplicação de uma regra de proporcionalidade direta, pelo que é aceitável que exista algum enviesamento quando se refere a redução de CO₂ por cada medida do PRR implementada.

Para além disso, embora o estudo apresente a função dano no PIB, esta apenas incorpora os choques meteorológicos, pelo que não se evidencia os potenciais choques referentes às alterações climáticas e os valores dos danos económicos ao nível global por serem muito reduzidos. Estes danos globais são induzidos do nível nacional, logo, o impacto refletido ainda será mais reduzido e insignificante para efeitos de análise, e, embora o PRR seja um processo *continuum*, cujos investimentos vão sendo pagos ao longo do tempo, tal incorporação não foi possível, pelo que retratamos o PRR como um choque exógeno no início de 2020, quer no investimento quer na redução das emissões de CO₂. No entanto, a

implementação faseada só teria impactos de desfasamento, uma vez que o modelo não modeliza custos de implementação do investimento.

Apesar de tudo, é nossa convicção que, dados os pressupostos assumidos, os resultados positivos obtidos estão subavaliados. De facto, não foram consideradas reduções, potencialmente induzidas pelo investimento “verde”, nos custos de abatimento, ainda que marginalmente. Uma vez que o investimento realizado reduz o impacto ambiental da economia, o custo de abatimento, para corrigir os efeitos nefastos da atividade económica, também tende a reduzir (parâmetro ω do modelo). A redução desse parâmetro, que não conseguimos estimar, tem um efeito positivo permanente no *output* líquido.

Pelo exposto, verifica-se a consecução dos objetivos desta dissertação, que conseguiu contribuir para responder à questão de partida, na medida em que, para além de se tratar de um trabalho pioneiro, quer no estudo do caso português, quer na metodologia aplicada, concluiu-se da existência de uma relação positiva crescente, durante um longo período, entre o investimento verde e a redução de emissões de CO₂ no PIB. Para além disso, dada a complementaridade entre o nível de investimento e o nível da redução das emissões de CO₂, verifica-se um efeito sombra da variável ambiental em causa que acompanha o investimento de forma impactante no caminho de uma economia mais hipocarbónica.

Como orientação de política, estes resultados motivam a que se façam esforços em acoplar acumulação de capital ambientalmente sustentável não só pelos ganhos ambientais implícitos, como pelo que estes podem contribuir, positiva e adicionalmente, para o crescimento real do PIB. Conclui-se também que as medidas de investimento orientadas para a eficiência energética em edifícios (Componente C13) são as mais eficientes permitindo um maior multiplicador orçamental por unidade investida em 2020. No entanto, os ganhos económicos e ambientais destes investimentos são marginais (% PIB e % redução CO₂ estimada) pelo que é importante estender o cunho ambiental transversalmente aos investimentos realizados e apostar em I&D para aumentar a eficiência de tecnologias limpas.

Em suma, este estudo contribui para comprovar, em termos gerais, uma conexão positiva entre a economia e o ambiente, e, em sentido mais estrito, um impacto positivo no crescimento, económica e ambientalmente, sustentável derivado da execução de investimentos em capital verde financiado pelo PRR.

Em função das dificuldades e limitações identificadas na produção dos resultados apresentados, recomenda-se para futuras investigações a desenvolver nesta temática, melhorias na calibração do modelo DICE no sentido de este poder ser utilizado sem recurso a aproximações de valor de certas variáveis, o que permitirá uma melhor robustez dos resultados, nomeadamente ou pela elaboração de equações matemáticas que relacionem as variáveis, ou pelo recurso a métodos estatísticos de regressão linear (ou não-linear).

No entanto, como caminho alternativo, sem o recurso ao MPC- DICE, e observando o diferencial no PIB obtido nesta dissertação, desafia-se que se aplique o modelo QUEST III da Comissão Europeia, para obter os efeitos macroeconómicos em Portugal, nomeadamente ao nível da inflação, taxa de juro e emprego, uma vez que este modelo foi criado para medir os impactos na economia europeia por Estado Membro. Porém, para além de dificuldades relacionadas com a disponibilidade do QUEST III, este modelo ainda não dispõe de uma componente ambiental devidamente estruturada e desenvolvida, pelo que a sua utilização pressupõe a prévia extensão com uma dinâmica de equações ambientais mundiais, provavelmente incluindo o bloco do RICE, permitindo uma análise extensiva de variáveis macroeconómicas reais e nominais, impactos de curto e longo prazo no produto potencial e nas variáveis ambientais.

REFERÊNCIAS

- Ackerman, F., & Stanton, E. A. (2012). Climate Risks and Carbon Prices: Revising the Social Cost of Carbon. *Economics*, 6(1), 20120010. <https://doi.org/10.5018/economics-ejournal.ja.2012-10>
- Adão, B., Gouveia, A.A.M., Lourenço, N., & Azevedo, J.V. (2022). Alterações climáticas e economia: uma introdução. Occasional Papers 2022, 01. Banco de Portugal. https://www.bportugal.pt/sites/default/files/anexos/papers/op202201_pt.pdf
- Andersson, J., Gillis, J., & Horn, G. (2016). CasADi Documentation Release 3.6.0. <https://github.com/casadi/casadi/wiki/Onboarding-Guide>
- Anthoff, D., Hepburn, C., & Tol, R. S. J. (2009). Equity weighting and the marginal damage costs of climate change. *Ecological Economics*, 68(3), 836–849. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.06.017>
- Anthoff, D., & Tol, R. S. J. (2009). The Impact of Climate Change on the Balanced Growth Equivalent: An Application of FUND. *Environ Resource Econ* 43, 351–367. <https://doi.org/10.1007/s10640-009-9269-5>
- Anthoff, D. & Tol, R.S. (2013). The uncertainty about the social cost of carbon: A decomposition analysis using FUND. *Climatic Change*, 117(3), 515–530. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0706-7>
- Anthoff, D., & Tol, R. S. J. (2014). The Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution (fund). Technical Description, Version 3.9. <https://www.fund-model.org/files/documentation/Fund-3-9-Scientific-Documentation.pdf>
- Associação Portuguesa do Ambiente. (2024, janeiro). Protocolo de Quioto. <https://apambiente.pt/clima/protocolo-de-quioto>
- Babiker, M. (2008). A forward looking version of the MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Joint Program Report Series. Cambridge, report 161. <http://globalchange.mit.edu/publication/15538>

- Baig, I. A., Chandio, A. A., Ozturk, I., Kumar, P., Khan, Z. A., & Salam, M. (2022). Assessing the long-and short-run asymmetrical effects of climate change on rice production: Empirical evidence from India. *Environmental Science and Pollution Research International* 29, 34209-34230. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35034308/>
- Banco Mundial. (2021, maio). 'Transitions at the heart of the climate challenge'. <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2021/05/24/transitions-at-the-heart-of-the-climate-challenge>
- Barrage, L. & Nordhaus, W. D. (2024). Policies, projections, and the social cost of carbon: Results from the DICE-2023 model. *PNAS*, 21 (13). <https://doi.org/10.1073/pnas.2312030121>
- Beckerman, W. (1992). Economic growth and the environment: Whose growth? Whose environment? *World development*, 20(4), 481-496. [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(92\)90038-W](https://doi.org/10.1016/0305-750X(92)90038-W)
- Berleemann, M., & Wenzel, D. (2018). Hurricanes, economic growth and transmission channels: Empirical evidence for countries on differing levels of development. *World Development*, 105, 231-247. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2017.12.020>
- Bernstein, P. M., Montgomery, W. D., Rutherford, T. F. (1999). Effects of restriction on international permit trading: the MS-MRT model. *The Energy Journal*, (special), 221-256. <https://econpapers.repec.org/article/aenjournal/1999si-a10.htm>
- Bhagwati, J. (1993). 'The Diminished Giant Syndrome: How Declinism Drives Trade Policy. *Foreign Affairs*, 72(2), 22-26. <https://doi.org/10.2307/20045521>
- Bhattarai, M., & Hammig, M. (2001) Institutions and the environmental kuznets curve for deforestation: A crosscountry analysis for Latin America, Africa and Asia. *World Development*, 29 (6), 995-1010. [https://doi.org/10.1016/S0305-750X\(01\)00019-5](https://doi.org/10.1016/S0305-750X(01)00019-5)
- Bonen, A., Semmler, W., & Klasen, S. (2014). Economic Damages from Climate Change: A Review of Modeling Approaches. SCEPA Working Paper 2014-03. https://www.researchgate.net/publication/263695038_Economic_Damages_from_Climate_Change_A_Review_of_Modeling_Approaches
- Bosetti, V., Carraro, C., Galeotti, M., Massetti, E. & Tavoni, M. (2006). A world induced technical change hybrid model. *The Energy Journal*, 26, 13-37. <https://www.jstor.org/stable/23297044>

- Burke, M., Hsiang, S. M., & Miguel, E. (2015). Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature* 527, 235–239. <https://doi.org/10.1038/nature15725>
- Burniaux, J. M., & Truong, P. T. (2002). GTAP-E: an energy-environmental version of the GTAP model. Center for Global Trade and Analysis. GTAP Technical Paper, 16. https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=923
- Butler, M.P., Reed, P.M., Fisher-Vanden, K., Keller, K. & Wagener, T. (2014). Inaction and climate stabilization uncertainties lead to severe economic risks. *Climatic Change* 127, 463–474. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1283-0>
- Câmara Municipal do Porto. (2024, junho). Descarbonização. <https://ambiente.cm-porto.pt/alteracoes-climaticas/descarbonizacao>
- Cattaneo, C., & Peri, G. (2016). The migration response to increasing temperatures. *Journal of development economics*, 122, 127-146. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2016.05.004>
- Cavalcanti, T., Hasna, Z., & Santos, C. (2022). Climate Change Mitigation Policies: Aggregate and Distributional Effects. IDB Working paper series nº IDB-WP-1387 <http://dx.doi.org/10.18235/0004535>
- Climate Transition Finance & International Capital Market Association. (2020). Manual para o financiamento da transição climática: Diretrizes para emissores. <https://www.icmagroup.org/assets/documents/Sustainablefinance/Translations/Portuguese-CTFH2020-12-300421.pdf>
- CO2Meter. (2024). Your Guide to Understanding Carbon Dioxide. <https://www.flipsnack.com/co2meter/your-guide-to-understanding-carbon-dioxide/full-view>
- CO2Meter. (2024, maio). Como medir o dióxido de carbono (CO2) com precisão <https://www.co2meter.com/blogs/news/15164297-co2-gas-concentration-defined>
- Comissão Europeia. (2024a, maio). Negócios, atividade económica, euro. Recuperação do coronavírus. Mecanismo de Recuperação e Resiliência. https://commission.europa.eu/business-economy-euro/economic-recovery/recovery-and-resilience-facility_pt

- Comissão Europeia. (2024b, maio). Estratégia e Política. Orçamento Europeu. A UE como mutuário – relações com investidores. NextGenerationEU. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/eu-budget/eu-borrower-investor-relations/nextgenerationeu_en
- Conselho Europeu. (2023). Reunião do Conselho Europeu, 12 de dezembro de 2019, Conclusões. <https://www.consilium.europa.eu/media/41788/12-euco-final-conclusions-pt.pdf>
- Conselho Europeu. (2024a, maio). Políticas. Acordo de Paris sobre alterações climáticas. <https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/climate-change/paris-agreement/>
- Conselho Europeu. (2024b, maio). Financiamento da transição climática. (<https://www.consilium.europa.eu/pt/infographics/financing-climate-transition/>)
- Diaz, D., & Moore, F. (2017). Quantifying the economic risks of climate change. *Nature Climate Change*, 7(11), 774–782. <https://doi.org/10.1038/nclimate3411>
- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets Curve hypothesis: A survey. *Ecological Economics*, 49 (4), 431-455. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.02.011>
- Dell, M., Jones, B. F., & Olken, B. A., (2014). What do we learn from the weather? The new climate-economy literature. *Journal of Economic Literature*, 52(3), 740-798. <http://dx.doi.org/10.1257/jel.52.3.740>
- Dowlatabadi, H., & Morgan, M. G. (1993). A model framework for integrated studies of the climate problem, *Energy Policy*, 21(3), 209-221. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(93\)90243-9](https://doi.org/10.1016/0301-4215(93)90243-9).
- Edmonds, G.S., Branch, R.C., & Mukherjee, P. (1994). A conceptual framework for comparing instructional design models. *ETR & D*, 42, 55–72. <https://doi.org/10.1007/BF02298055>
- Edwards, N., Greppin, H., Haurie, A., & Viguiet, L. (2005). Linking climate and economic dynamics. In: Haurie, Alain and Viguiet, Laurent eds. The Coupling of Climate and Economic Dynamics: Essays on Integrated Assessment. *Advances in Global Change Research* (22), 1-34. <https://oro.open.ac.uk/25680/1/1307greppinv3chapter1.pdf>

- Estrutura de Missão Recuperar Portugal. (2023, dezembro). Transição climática. <https://recuperarportugal.gov.pt/transicao-climatica/>
- Estrutura de Missão Recuperar Portugal. (2024, fevereiro). Monitorização. <https://recuperarportugal.gov.pt/monitorizacao/>
- Estrutura de Missão Recuperar Portugal. (2024, junho). Newsletters #38. Uma etapa cumprida com foco no futuro. <https://recuperarportugal.gov.pt/comunicacao/newsletters/>
- Fankhauser, S., & Tol, R. S. (2005). On climate change and economic growth. *Resource and Energy Economics*, 27(1), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2004.03.003>
- Faulwasser, T., Kellett, C. M., & Weller, S. R. (2018). MPC-DICE: An open-source Matlab implementation of receding horizon solutions to DICE. Australian Research Council under ARC-DP180103026. *IFAC-PapersOnLine*, 51(5), 120–125. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.221>
- Field, B. C. (1994). *Environmental economics: an introduction*. McGraw-Hill.
- Gazzotti, P. (2022). RICE50+: DICE model at country and regional level. *Socio-Environmental Systems Modelling*, 4, 18038. <https://doi.org/10.18174/sesmo.18038>
- Gerlagh, R., & Liski, M. (2018a). Consistent climate policies. *Journal of the European Economic Association*, 16(1), 1-44. <https://doi.org/10.1093/jeea/jvx010>
- Gerlagh, R., & Liski, M. (2018b). Carbon prices for the next hundred years. *The Economic Journal*, 128(609), 728-757. <https://doi.org/10.1111/ecoj.12436>
- Golosov, M., Hassler, J., Krusell, P., & Tsyvinski, A. (2014). Optimal taxes on fossil fuel in general equilibrium. *Econometrica*, 82(1), 41-88. <http://doi.wiley.com/10.3982/ECTA10217>
- González-Eguino, M. & Neumann, M. B. (2016). Significant implications of permafrost thawing for climate change control. *Climatic Change* (136), 381–388. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1666-5>
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1991). Environmental impacts of a North American free trade agreement. National bureau of economic research. NBER Working Paper, 3914, https://www.nber.org/system/files/working_papers/w3914/w3914.pdf

- Grubb, M., Wieners, C., & Yang, P. (2021). Modeling myths: On DICE and dynamic realism in integrated assessment models of climate change mitigation. *WIREs Climate Change*, 12 (3). Article e698. <https://doi.org/10.1002/wcc.698>
- Gurgel, A. C. (2012). Modelo de Equilíbrio Geral. Núcleo de Estudos de Economias de Baixo Carbono. https://www.anpec.org.br/encontro/2012/inscricao/files_I/i10-ed6dc304ee86e4e0e54fb1b3f4ab6add.pdf
- Hallegatte, S. (2023, abril). Proper use of the abatement cost to steer the transition. Institute for Climate Economics. <https://www.i4ce.org/en/proper-use-abatment-cost-steer-transition-climate/>
- Hope, C. (2013). Critical issues for the calculation of the social cost of CO₂: Why the estimates from PAGE09 are higher than those from PAGE2002. *Climatic Change*, 117(3), 531–543. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0633-z>
- Hope, C. (2015). The \$10 trillion value of better information about the transient climate response. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 373(20140429), 1-21. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0429>
- Hope, C., Anderson, J., Wenman, P. (1993). Policy analysis of the greenhouse effect: An application of the PAGE model. *Energy Policy*, 21 (3), 327-338. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(93\)90253-C](https://doi.org/10.1016/0301-4215(93)90253-C).
- Huxman, M., Anwar, M., & Nelson, D. (2019). Understanding the Impact of a Low Carbon Transition on South Africa. Climate Policy Initiative. <https://climatepolicyinitiative.org/publication/understanding-the-impact-of-a-low-carbon-transition-on-south-africa/>
- Ikefuji, M., Laeven, R. J. A., Magnus, J. R., & Muris, C. (2019). DICE Simplified. https://www3.nd.edu/~nmark/Climate/DICE-simplified_2019.pdf
- Inter-Agency Working Group. (2016). Technical support document: Technical update of the social cost of carbon for regulatory impact analysis under executive order 12866. https://www.epa.gov/sites/default/files/201612/documents/sc_co2_tsd_august_2016.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). AR5 Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>

- Kahn, M. E., Mohaddes, K., Ng, R. N. C., Pesaran, M. H., Raissi, M., & Yang, J.C. (2021). Long-term macroeconomic effects of climate change: A cross-country analysis. *Energy Economics*, 104, 105624. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105624>
- Kellett, C. M., Faulwasser, T., & Weller, S. R. (2016). DICE2013R-mc: A Matlab / CasADi Implementation of Vanilla DICE 2013R (Version 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1608.04294>
- Kellett, C. M., Weller, S. R., Faulwasser, T., Grune, L., & Semmler, W. (2019). Feedback, Dynamics, and Optimal Control in Climate Economics? *Annual Reviews in Control*, 47, 7-20. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.04.003>.
- Khurshid, N., Fiaz, A., Khurshid, J., & Ali, K. (2022). Impact of climate change shocks on economic growth: A new insight from non-linear analysis. *Frontiers Environmental Science, Section Environmental Economics and Management*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1039128>
- Kompas, T., Pham, V. H., & Che, T. N. (2018). The effects of climate change on GDP by country and the global economic gains from complying with the Paris Climate Accord. *Earth's Future*, 6, 1153-1173. <https://doi.org/10.1029/2018EF000922>
- Martins, J. O., Burniaux, J-M, Martin, J. P. & Nicoletti, G. (1992). The Costs of Reducing CO2 Emissions: A Comparison of Carbon Tax Curves with GREEN. OECD Economics Department Working Papers 118, OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/018813821426>.
- Metro do Porto. (2024, junho). Metro em números. <https://www.metrodoporto.pt/pages/307>
- Ministério do Planeamento. (2021). PRR – Recuperar Portugal, construindo o futuro. <https://recuperarportugal.gov.pt/wp-content/uploads/2021/10/PRR.pdf>
- Moore, F. C., & Diaz, D. B. (2015). Temperature impacts on economic growth warrant stringent mitigation policy. *Nature Climate Change*, 5(2), 127–131. <https://doi.org/10.1038/nclimate2481>

- Network for Greening the Financial System (NGFS). 2023. Stocktake on Financial Institutions' Transition Plans and their Relevance to Micro-prudential Authorities. https://www.ngfs.net/sites/default/files/stocktake_on_financial_institutions_transition_plans.pdf
- Newell, R. G, Prest, B. C., & Sexton, S. E. (2021). The GDP-Temperature relationship: Implications for climate change damages. *Journal of Environmental Economics and Management*, 108, 102445. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2021.102445>
- Nordhaus, W. D. (1992). An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases. *Science*, 258(5086), 1315–1319. <http://www.jstor.org/stable/2880417>
- Nordhaus, W. D. (1994). *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*, Cambridge: MIT Press.
- Nordhaus, W. D. (2013). Integrated Economic and Climate Modeling. In *Handbook of Computable General Equilibrium Modeling*, 1, pp. 1069–1131. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59568-3.00016-X>
- Nordhaus, W. D. (2014). Estimates of the Social Cost of Carbon: Concepts and Results from the DICE-2013R Model and Alternative Approaches. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 1(1/2), 273–312. <https://doi.org/10.1086/676035>
- Nordhaus, W. D. (2016). Projections and Uncertainties about Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies. NBER Working Paper, 22933. <http://www.nber.org/papers/w22933>
- Nordhaus, W. D. (2017). Integrated Assessment Models of Climate Change. *National Bureau of Economic Research Reporter*, 3, 16-20. <https://www.nber.org/sites/default/files/2019-08/2017number3.pdf>
- Nordhaus, W. D. (2018). Projections and Uncertainties about Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies. *American Economic Journal: Economic Policy*, 10(3), 333–360. <https://doi.org/10.1257/pol.20170046>
- Nordhaus, W. D. & Sztorc, P. (2013). DICE 2013R: Introduction and User's Manual. http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/documents/DICE_Manual_100413r1.pdf.

- Nordhaus, W. D., & Yang, Z. (1996). A regional dynamic general equilibrium model of alternative climate change strategies. *The American Economic Review*, 86 (4), 741-765.
<https://www.jstor.org/stable/2118303>
- Oh, C. H., & Reuveny, R. (2010). Climatic natural disasters, political risk, and international trade. *Global Environmental Change-human and Policy Dimensions*, 20, 243-254.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.11.005>
- Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico. (2011). *A caminho do crescimento verde: Um sumário para os decisores políticos*.
<https://www.oecd.org/greengrowth/48536946.pdf>
- Paltsev, S., Reilly, J. M., Jacoby, H. D., Eckaus, R.S., Mcfarland, J., Sarofim, M., Asadoorian, M., Babiker, M. (2005). The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: version 4. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Report 125. http://globalchange.mit.edu/pubs/abstract.php?publication_id=697
- Parker, M. (2018). The impact of disasters on inflation. *Economics of Disasters and Climate Change*, 2(1), 21-48. <https://doi.org/10.1007/s41885-017-0017-y>
- Patel, A., Banerjee, A., Papadimitriou, A., & Lindqvist, B. (2023). Control of ARWs. In G. Nikolakopoulos, S. Mansouri, & C. Kanellakis (Eds). *Aerial Robotic Workers* (pp. 49-65). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814909-6.00010-X>
- Pindyck, R. S. (2013). Climate change policy: What do the models tell us? *Journal of Economic Literature*, 51(3), 860-872.
https://www.nber.org/system/files/working_papers/w19244/w19244.pdf
- Pindyck, R. S. (2017). The use and misuse of models for climate policy. *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(1), 100–114.
<https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1093/reep/rew012>
- Popp, D. (2004). ENTICE: endogenous backstop technology in the DICE model of global warming. *Journal of Environmental Economics and Management*, 48 (1), 742-768.
<https://doi.org/10.1016/j.jeem.2003.09.002>

- Pottier, A., Espagne, E., Perrissin Fabert, B., & Dumas, P. (2015). The comparative impact of integrated assessment Models' structures on optimal mitigation policies. *Environmental Modeling and Assessment*, 20, 453–473. <https://doi.org/10.1007/s10666-015-9443-9>
- Puyo, D. M., Panton, A. J., Sridhar, T., Stuermer, M., Ungerer, C., & Zhang, A. T. (2024). Key Challenges Faced by Fossil Fuel Exporters during the Energy Transition. *International Monetary Fund Staff Climate Note* 2024/001, 1-33. <https://doi.org/10.5089/9798400270147.066>
- Prinn, R. G., Jacoby, H., Sokolov, A., Wang, C., Xiao, X., Yang, Z., Eckhaus, R., Stone, P., Ellerman, D., Melillo, J., Fitzmaurice, J., Kicklighter, D., Holian, G., & Liu, Y. (1999). Integrated Global System Model for climate policy assessment: Feedbacks and sensitivity studies. *Climate Change*, 41, 469–546.
- Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. (2020). Relatório do desenvolvimento humano. Próxima fronteira. O desenvolvimento humano e o Antropoceno. <https://hdr.undp.org/system/files/documents/global-report-document/hdr2020ptpdf.pdf>
- Ramsey, F.P. (1928). A Mathematical Theory of Saving. *The Economic Journal*, 38, 152, pp. 543-559. <http://www.jstor.org/stable/2224098>
- Richels, R. G., Manne, A. S., & Wigley, T. M. L. (2007). Moving beyond concentrations: the challenge of limiting temperature change. Working Paper 04-11, AEI-Brookings Joint Center for Regulatory Studies. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=545742
- Rodrigues, L., Valente, F., Carlos, S. M. (2022). Nota Técnica: monitoramento das emissões de gases causadores do efeito estufa (GEE) na matriz de combustíveis leves. Observatório de Conhecimento e Inovação em Bioeconomia. <https://eesp.fgv.br/centros/observatorios/bioeconomia>
- Rotmans, J., De Boois, H., & Swart, R. J. (1990). An integrated model for the assessment of the greenhouse effect: the Dutch approach. *Climatic Change*, 16, 331-356. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00144508>
- Rotmans, J., & Dowlatabadi, H. (1998). Integrated assessment of climate change: evaluation of methods and strategies. In S. Rainer, & E. Malone (Eds.). *Human choice and climate change: an international social science assessment* (pp. 291-377). Battelle Press.

- Russel, A. R., Kooten, G. C. V., Izett, J. G., & Eiswerth, M. E. (2022). Damage Functions and the Social Cost of Carbon: Addressing Uncertainty in Estimating the Economic Consequences of Mitigating Climate Change. *Environmental Management* 69, 919-936. <https://doi.org/10.1007/s00267-022-01608-9>
- Rutherford, T. F. (1999). Applied general equilibrium modeling with MPSGE as a GAMS subsystem: an overview of the modeling framework and syntax. *Computational Economics*, 14 (1-2), 1-46. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1008655831209>
- Sokolov, A.P., Schlosser, C.A., Dutkiewicz, S., Paltsev, S., Kicklighter, D.W., Jacoby, H.D., Prinn, R.G., Forest, C.E., Reilly, J.M., Wang, C., Felzer, B., Sarofim, M.C., Scott, J., Stone, P.H., Melillo, J.M., & Cohen, J. (2005). The MIT Integrated Global System Model (IGSM) Version 2: Model Description and Baseline Evaluation. *Joint Program Report Series Report* 124, 40. <http://globalchange.mit.edu/publication/14579>.
- Stern, N. (2006). *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University Press.
- Tsigaris, P., & Wood, J. (2016). A simple climate-Solow model for introducing the economics of climate change to undergraduate students. *International Review of Economics Education*, 23, 65–81. <https://doi.org/10.1016/j.iree.2016.06.002>
- Tol, R. S. J. (2014). Correction and Update: The Economic Effects of Climate Change. *Journal of Economic Perspectives*, 28(2), 221–226. <https://doi.org/10.1257/jep.28.2.221>
- Tol, R. S. J. (2019). A social cost of carbon for (almost) every country. *Energy Economics*, 83, 555–566. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.07.006>
- Tol, R. S. J. (2024). A meta-analysis of the total economic impact of climate change. *Energy Policy*, 185, 113922. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113922>
- Van der Ploeg, F., & Rezai, A. (2019). Simple rules for climate policy and integrated assessment. *Environmental and Resource Economics*, 72, 77–108. <https://doi.org/10.1007/s10640-018-0280-6>

- Wade, K., & Jennings, M. (2016). The impact of climate change on the global economy. *Schroders. Talking Point*.
<https://mybrand.schroders.com/m/05314293f702fa9c/original/Wade-Climate-Change-Global-Economy.pdf>
- Waldhoff, S., Anthoff, D., Rosa, S., & Tol, R. S. J. (2014). The Marginal Damage Costs of Different Greenhouse Gases: An Application of FUND. *Economics: The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, 8(2014–31). <https://doi.org/10.5018/economics-ejournal.ja.2014-31>)
- Weitzman, M. L. (2010). What Is the ‘Damages Function’ for Global Warming and What Difference Might It Make? *Climate Change Economics* 1 (1), 57–69. doi:10.1142/s2010007810000042.
- Weller, S. R., Hafeez, S., & Kellett, C. M. (2015). A receding horizon control approach to estimating the social cost of carbon in the presence of emissions and temperature uncertainty. 2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 5384–5390. <https://doi.org/10.1109/CDC.2015.7403062>
- Whalley, J., & Wigle, R. (1991). The international incidence of carbon taxes. In: Dornbush, R.; Poterba, J.M. Global warming: economic policy responses. Cambridge: MIT Press, 71-97.

ANEXOS

Anexo A - Verbas Alocadas às C10, C11, C12 e C13 do PRR, por Investimentos

C a	Dimensões b	Investimentos	Destinatários b	Verbas	
				M€ ^c	M\$ ^c
10	Mar (693M€ 18,1%)	Hub Azul, Rede de Infraestruturas para a Economia Azul	Est; Emp	99	
		Transição Verde e Digital e Segurança nas Pescas	Emp	21	7,300751686
		Centro de Operações de Defesa do Atlântico e Plataforma Naval	Est	150	52,14822633
		Desenvolvimento do “Cluster do Mar dos Açores”	Est	348	120,9838851
		Transição energética, digitalização e redução do impacto ambiental no setor da Pesca e da Aquicultura	Emp	5	1,738274211
		Tecnologias oceânicas	Emp	20	6,953096844
		Green Shipping	Emp	50	17,38274211
11	Descarbonização da Indústria (737m€ 19,2%)	Descarbonização da Indústria	Emp	987	343,1353292
12	Bioeconomia Sustentável (145m€ 3,8%)	Bioeconomia	Emp	145	50,40995212
13	Eficiência Energética em Edifícios (610M€ 15,9%)	Eficiência energética em edifícios residenciais	Fam	420	146,0150337
		Eficiência energética em edifícios da administração pública central	Est	240	83,43716213
		Eficiência energética em edifícios de serviços	Emp	150	52,14822633

Fonte: Elaboração própria a partir da informação disponibilizada da EMRP (2024, fevereiro).

Notas. Os valores em parêntesis correspondem à verba da componente e ao seu peso percentual no total, respetivamente. ^a C = Componente; ^b Est = Estado; Emp = Empresa; e Fam = Famílias. ^c M€ = milhões de euros e M\$ = milhões de dólares norte-americanos.

Anexo B - Verbas Alocadas às C14 e C15 do PRR, por Investimentos

C ^a	Dimensões	Investimentos	Destinatários ^b	Verbas	
				M€ ^c	M\$ ^c
14	Hidrogénio Renováveis (385M€ 10%)	e Hidrogénio e gases renováveis	Emp	255	88,65198476
		Potenciação da eletricidade renovável no Arquipélago da Madeira	Emp	84	29,20300674
		Transição Energética nos Açores	Emp	116	40,32796169
15	Mobilidade Sustentável (1.263m€ 33%)	Expansão da Rede de Metro de Lisboa – Linha Vermelha até Alcântara	ML	358	124,4604335
		Expansão da Rede de Metro do Porto – Casa da Música-Santo Ovídio	MP	352	122,3745045
		Metro Ligeiro de Superfície Odivelas-Loures	ML	390	135,5853885
		Linha BRT Boavista – Império	MP	66	22,94521959
		Descarbonização dos Transportes Públicos	Emp	138	47,97636822
		Digitalização do transporte ferroviário	CP	49	17,03508727

Fonte: Elaboração própria a partir da informação disponibilizada da EMRP (2024, fevereiro).

Notas. Os valores em parêntesis correspondem à verba da componente e ao seu peso percentual no total, respetivamente.

^a C = Componente; ^b Emp = Empresa; ML = Metro de Lisboa; MP = Metro do Porto; e CP = Caminhos de Ferros de Portugal. ^c M€ = milhões de euros e M\$ = milhões de dólares norte-americanos.

Anexo C - Verbas Alocadas à C21 - RePowerEU, por Investimentos

C ^a	Dimensão	Investimentos	Destinatários ^b	Verbas	
				M€ ^c	M\$ ^c
21	RePowerEU	Medida reforçada: Descarbonização da indústria	Emp	100	34,76548422
		Medida reforçada: Eficiência energética em edifícios residenciais	Fam	120	41,71858106
		Medida reforçada: Eficiência energética em edifícios de serviços	Emp	80	27,81238738
		Eficiência energética em edifícios públicos da Madeira	RAM	14	4,867167791
		Apoio ao Desenvolvimento da Indústria Verde (Medida reforçada à descarbonização da indústria)	Emp	50	17,38274211
		Medida reforçada: Hidrogénio e Gases Renováveis	Emp	70	24,33583895
		Estudos técnicos para potencial energético offshore	Fam	42	14,60150337
		Estudos técnicos para potencial energético offshore (2)	Fam	8	2,781238738
		Flexibilidade da Rede e Armazenamento (medida reforçada à descarbonização da indústria)	Emp	100	34,76548422
		One-Stop-Shop para o Licenciamento e Acompanhamento de Projetos de Energias Renováveis	Emp	10	3,476548422
		Sistema de Incentivos à aquisição e instalação de sistemas de armazenamento de energias renováveis nos Açores	RAA	6	2,085929053
		Sistema de Incentivos à produção e Armazenamento de Energia proveniente de Fontes Renováveis na Madeira e no Porto Santo	RAM	19	6,605442002
		Medida reforçada: Descarbonização dos Transportes Públicos	Emp	90	31,2889358
		Descarbonização dos Transportes	Emp	12	4,171858106
		Sistema de BRT Braga	Braga	100	34,76548422
		Aquisição de 2 ferries elétricos	RAA	25	8,691371055
		Funicular da Nazaré	Nazaré	10	3,476548422

Fonte: Elaboração própria a partir da informação disponibilizada da EMRP (2024, junho).

Notas. ^a C = Componente; ^b Emp = Empresa; Fam = Famílias; RAA = Região Autónoma dos Açores; e RMM = Região Autónoma da Madeira. ^c M€ = milhões de euros e M\$ = milhões de dólares norte-americanos.

Anexo D - Calibração do Modelo: Parâmetros de Difusão Climática e do Ciclo de Carbono

Parâmetros	DICE2013R	DICE 2016R	Descrição
Δ	5	5	<i>Time steps</i> em anos (tstep)
t0	2010	2015	Ano base
N	60	100	Comprimento do horizonte
μ_0	0.039	0.03	Fração de abatimento inicial (miu0)
Parâmetros de difusão climática			
φ_{11}	0.8630	0.8718	Coeficiente de difusão entre camadas de temperatura
φ_{12}	0.0086	0.0088	Coeficiente de difusão entre camadas de temperatura
φ_{21}	0.025	0.025	Coeficiente de difusão entre camadas de temperatura
φ_{22}	0.975	0.975	Coeficiente de difusão entre camadas de temperatura
Parâmetros de difusão do ciclo do carbono			
ζ_{11}	0.912	0.88	Coeficiente de difusão entre os reservatórios de carbono
ζ_{12}	0.03833	0.196	Coeficiente de difusão entre os reservatórios de carbono
ζ_{21}	0.088	0.12	Coeficiente de difusão entre os reservatórios de carbono
ζ_{22}	0.9592	0.797	Coeficiente de difusão entre os reservatórios de carbono
ζ_{23}	0.0003375	0.001465	Coeficiente de difusão entre os reservatórios de carbono
ζ_{32}	0.00250	0.007	Coeficiente de difusão entre os reservatórios de carbono
ζ_{33}	0.9996625	0.99853488	Coeficiente de difusão entre os reservatórios de carbono

Fonte: Elaboração própria a partir da informação disponibilizada por Faulwasser et al. (2018) e Kellett et al. (2016).

Anexo E - Calibração do Modelo: Outros Parâmetros Geofísicos

Parâmetros	DICE2013R	DICE 2016R	Descrição
η	3.8	3.6813	Forças de duplicação do CO ₂ de equilíbrio (W/m ²)(fco22x)
ξ_1	0.098	0.1005	Multiplicador para η (c1)
ξ_2	3/11	3/11	Fator de conversão de emissões para massa de carbono (GtC / GtCO ₂)
MAT,1750	588	588	Massa atmosférica de carbono no ano 1750 (GtC)
f0	0.25	0.5	2020 forçamentos de GEE não-CO ₂ (Wm2) (fex0)
f1	0.7	1.0	2100 forçamentos de GEE não-CO ₂ (Wm2) (fex1)
tf	18	17	Número de períodos em que as forçantes exógenas aumentam
EL0	3.3	2.6	Emissões iniciais do uso do solo (eland0) (GtCO ₂ /ano)
δ EL	0.2	0.115	Taxa de redução das emissões do uso do solo (deland)

Fonte: Elaboração própria a partir da informação disponibilizada por Faulwasser et al. (2018) e Kellett et al. (2016).

Anexo F - Calibração do Modelo: Parâmetros Socioeconômicos

Parâmetros	DICE2013R	DICE 2016R	Descrição
γ	0.3	0.3	Elasticidade do capital na função de produção (gama)
θ_2	2.8	2.6	Expoente da função de custo de controlo (expcost2)
a_2	0.00267	0.00236	Termo multiplicador de danos (a_2)
a_3	2	2	Expoente de dano (a_3)
δK	0.1	0.1	Taxa de depreciação do capital por ano (dk)
α	1.45	1.45	Elasticidade da utilidade marginal do consumo (elasmu)
ρ	0.015	0.015	Taxa inicial de preferência social temporal por ano (prstp)
L_0	6838	7403	População global inicial (milhões de pessoas) (pop0)
L_a	10500	11500	População global assintótica (milhões de pessoas) (popasym)
lg	0.134	0.134	Taxa de crescimento da população (popadj)
A_0	3.8	5.115	Total dos fatores de produção inicial (a_0)
ga	0.079	0.076	Taxa de crescimento inicial do total dos fatores de produção (ga_0)
δA	0.006	0.005	Taxa de depreciação do total dos fatores de produção (delta)
σ_0	0.5491	0.3503	Intensidade inicial das emissões* (GtC/ mil milhões, constante 2015USD)
$g\sigma$	0.01	0.0152	Taxa da intensidade inicial das emissões (gsigma1)
$\delta\sigma$	0.001	0.001	Taxa de depreciação da intensidade das emissões (dsig)
pb	344	550	Custo da solução de último recurso, preços constantes 2020\$ por tCO ₂ (pback)
δpb	0.025	0.025	Taxa de depreciação do custo da solução de último recurso (gback)
scale1	0.016408662	0.030245527	Valores de otimização de impacto da função custo

Fonte: Elaboração própria a partir da informação disponibilizada por Faulwasser et al. (2018) e Kellett et al. (2016).

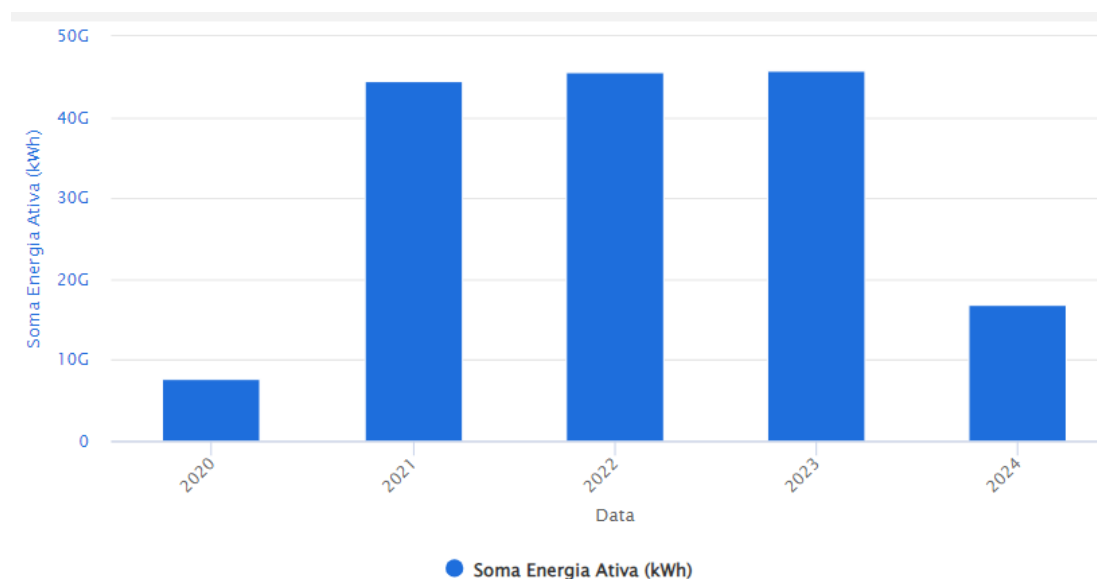
Anexo G - Calibração do Modelo: Parâmetros Iniciais e Auxiliares

Parâmetros iniciais	DICE2013R	DICE 2016R	Portugal	Descrição
TAT(0)	0.8	0.85	1.15	Desvio da temperatura atmosférica em relação ao ano de referência 1750 (°C)
TLO(0)	0.0068	0.0068	0.05	Desvio de temperatura no oceano inferior em relação ao ano de referência 1750 (°C)
MAT(0)	830.4	851	979	Massa de carbono no reservatório para a atmosfera (GtC)
MUP(0)	1527	460	485	Massa de carbono no reservatório para o oceano superior (GtC)
MLO(0)	10010	1740	1741	Massa de carbono no reservatório para o oceano inferior (GtC)
K(0)	135	223	0.00064	Stock de capital inicial (mil milhões de dólares)
Parâmetros auxiliares para calcular σ_0				
e0	33.61	35.85	0.0576	Emissões globais (GtC)
q0	63.69	105.5	0.0001869	PIB (mil milhões, constante 2015USD)
μ_0	0.039	0.03	0.03	Fração de abatimento inicial (μ_{iu0})

Fonte: Elaboração própria a partir da informação disponibilizada por Faulwasser et al. (2018) e Kellett et al. (2016).

Anexo H - Consumo de Eletricidade em Portugal

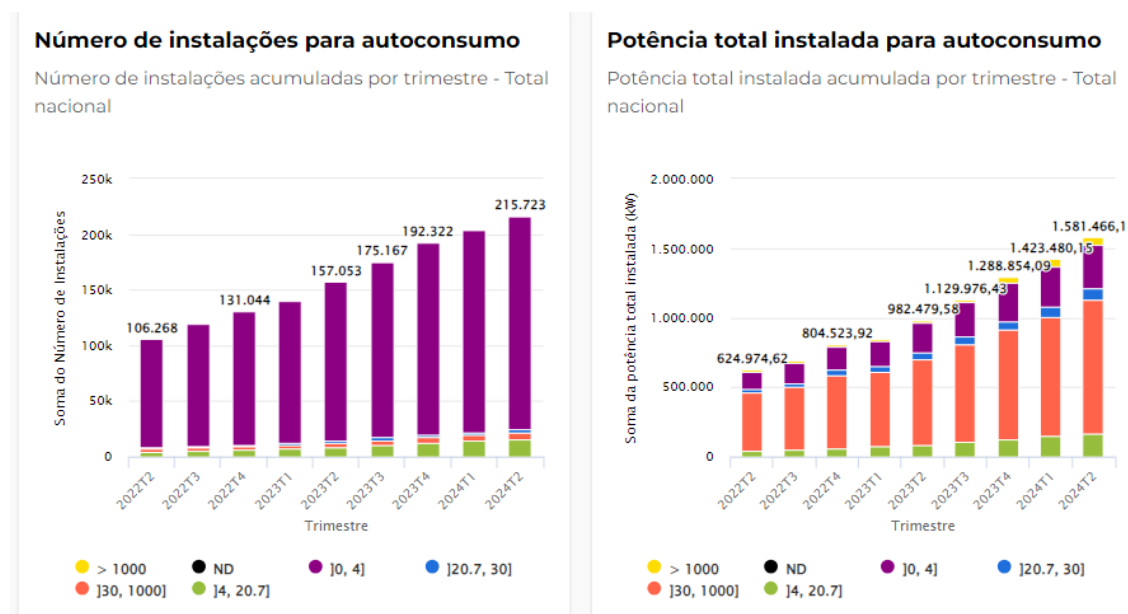
Relativamente ao consumo de eletricidade em Portugal, o gráfico indica que, nos últimos três anos, e até à data, a utilização de fontes de energia elétrica soma valores entre 40 e 50 G kWh, e que face a 2020 os valores quintuplicam: de 7.737.157.954,86 kWh, em 2020, passou para 45.797.707.189,90 kWh, em 2023. Porque se trata de valores parciais, o ano de 2024 não foi considerado nesta breve análise descritiva.



Fonte: “Portal Open Data E-REDES”, acesso julho 2024. [Online] Disponível em <https://e-redes.opendatasoft.com/pages/homepage/>

Anexo I - Número e Potência Instalada - UPCA

Em relação ao investimento verde, analisado em termos do número de UPCA instaladas, verifica-se que, nos dois últimos anos, o número de instalações tem vindo a crescer trimestralmente de forma acentuada, i.e., no período considerado há um aumento de 103% de UPAC: as instalações passam de 106.268 unidades no segundo trimestre de 2022 para 215.723 unidades para o segundo trimestre de 2024. Relativamente à capacidade produtiva, denota-se um aumento de 153%, ou seja, de 624.974,62 kWh passa para 1.581.466,1 kWh de potência instalada.

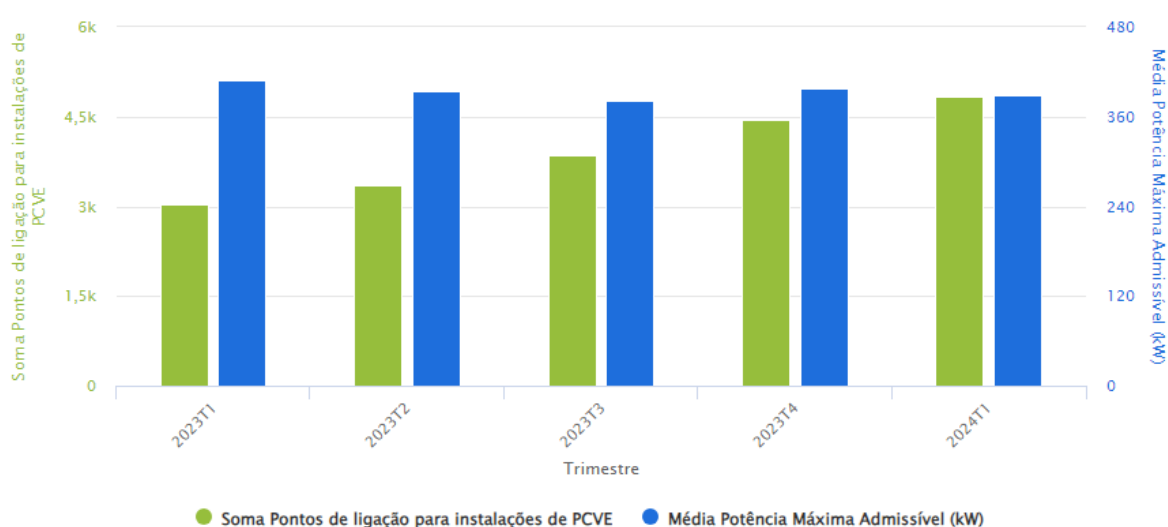


Fonte: “Portal Open Data E-REDES”, acesso julho 2024. [Online] Disponível em <https://e-redes.opendatasoft.com/pages/homepage/>

Nota. A legenda refere-se aos escalões de potência instalada.

Anexo J - Pontos de Ligação para Postos de Carregamento de Veículos Elétricos

Perspetivando o investimento verde a nível do número de pontos de ligação para Postos de Carregamento de Veículos Elétricos (PCVE), através do gráfico apresentado, pode-se concluir que esta variável, nos últimos anos, regista um substancial aumento: em 2023, primeiro trimestre, estão registadas 3.025 ligações, no segundo, 3.352; no terceiro, 3.863 e no quarto, 4.442; em 2024, no primeiro trimestre, os PCVE somam um total de 4.826 unidades. Em relação à média da potência máxima admissível instalada, esta regista valores superiores a 360 kW.



Fonte: “Portal Open Data E-REDES”, acesso julho 2024. [Online] Disponível em <https://e-redes.opendatasoft.com/pages/homepage/>