

O papel da eficiência termodinâmica no crescimento económico de Portugal entre 1960 e 2014

Desenvolvimento e aplicação de um modelo macroeconómico com exergia útil

Miguel Maria Correia Louza Viana

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia e Gestão de Energia

Orientadores: Prof. Tiago Morais Delgado Domingos

Eng. João Alexandre Almeida dos Santos

Júri

Presidente: Prof. Duarte de Mesquita e Sousa

Orientador: Eng. João Alexandre Almeida dos Santos

Vogal: Prof. Miguel Pedro Brito St. Aubyn

Outubro 2020

AMDG

Resumo

A energia é menosprezada pelos modelos de crescimento económico usados para delinear políticas económicas e de sustentabilidade, sendo estes incapazes de: 1) estimar o impacto económico de crises energéticas; 2) explicar o crescimento apenas com os factores de produção tradicionais – capital e trabalho humano. Como tem vindo a ser demonstrado, o contributo da energia na economia deve ter em conta a fase útil dos usos de energia, bem como a capacidade desta realizar trabalho físico (exergia). Modelos termodinamicamente consistentes, tais como o MAcroeconomic Resource COntsumption para o Reino Unido (MARCO-UK), evidenciam a forte ligação entre exergia útil e crescimento económico.

O objectivo deste trabalho é a adaptação e aplicação do modelo MARCO-UK a Portugal 1960-2014 (MARCO-PT). Este processo inclui: a) recolha de dados económicos e energéticos; b) testar econometricamente (cointegração) a validade das relações entre variáveis do MARCO-UK para a realidade Portuguesa; c) adaptar e/ou reformular essas relações de modo a obter um bom modelo da economia Portuguesa. Após calibração, o modelo é usado para simulações contrafactuais, isolando os efeitos da exergia útil (entre outras variáveis) no crescimento económico de Portugal.

Os resultados obtidos com o MARCO-PT fortalecem as conclusões do MARCO-UK, nomeadamente que a crescente disponibilidade de exergia útil – proveniente de aumentos na eficiência exérgica final-para-útil – tem sido um grande motor do crescimento económico em Portugal (40% do crescimento em 2014), ultrapassando o investimento em capital e o trabalho humano. Ao incluir energia de forma termodinamicamente consistente, o modelo MARCO-PT permite obter novas perspectivas para um desenvolvimento económico sustentável.

Palavras chave: Exergia útil; Cointegração; Modelo macroeconómico; Crescimento económico; Eficiência energética; Desenvolvimento Sustentável.

Abstract

Energy is underestimated by the economic growth models used to outline economic and sustainability policies, which are unable to: 1) estimate the economic impact of energy crises; 2) explain growth only with traditional factors of production - capital and labor. As has been shown, the contribution of energy to the economy must take into account the useful stage of energy uses, as well as the capacity of the latter to perform physical work (exergy). Thermodynamically consistent models, such as the MACroeconometric Resource CONsumption for the United Kingdom (MARCO-UK), demonstrate the strong link between useful exergy and economic growth.

The objective of this work is the adaptation and application of the MARCO-UK model to Portugal 1960-2014 (MARCO-PT). This process includes: a) collecting economic and energy data; b) econometrically test (cointegration) the validity of the relationships between MARCO-UK variables for the Portuguese reality; c) adapt and / or reformulate these relations in order to obtain a good model of the Portuguese economy. After some adjustments, the model is used for counterfactual simulations, isolating the effects of useful exergy (among other variables) on Portugal's economic growth.

The results obtained with MARCO-PT reinforce the conclusions of MARCO-UK, namely that the increasing availability of useful exergy - resulting from gains in final-to-useful exergy efficiency - has been a major driver of economic growth in Portugal (40% of GDP growth in 2014), exceeding capital investment and human labor. By including energy in a thermodynamically consistent way, the MARCO-PT model provides new perspectives for sustainable economic development.

Keywords: Useful exergy; Cointegration; Macroeconomic model; Economic growth; Energy efficiency; Sustainable development.

Índice

Resumo.....	3
Abstract.....	<i>Erro! Marcador não definido.</i>
1.Introdução.....	7
2. Estado da Arte	9
2.1. O papel dos recursos energéticos em modelos de crescimento económicos tradicionais.	9
2.2. Energia e eficiência energética como motores do crescimento económico.....	12
2.2.1. A energia como factor subestimado do crescimento económico.....	12
2.2.2. Energia, exergia e exergia útil.....	16
2.3. Modelo MARCO (MAcroeconomic Resource COnsumption)	21
2.3.1 Descrição do modelo	22
2.3.2 Equações do modelo MARCO-UK	23
2.3.3 Dados e processo de estimação	24
2.3.4 Modelo <i>basefit</i> e validação.....	24
2.3.5 Simulações contrafactuais	25
2.3.6 Resultados	25
2.4 Objetivos da presente tese	29
3. Metodologia.....	31
3.1 Recolha de dados para Portugal	31
3.2 Adaptação e implementação do modelo MARCO para Portugal (MARCO-PT).....	31
3.2.1 Testes de raízes unitárias e de cointegração	35
3.2.2 Estimação dos parâmetros das equações econométricas do modelo MARCO-PT	39
3.3 Modelo <i>basefit</i> e validação	40
3.4 Simulações contrafactuais (<i>ex-post</i>).....	42
4. Resultados e discussão.....	43
4.1 Recolha de dados para Portugal	43
4.2 Adaptação e implementação do modelo MARCO para Portugal (MARCO-PT)	44
4.2.1 Testes de raízes unitárias e de cointegração	44
4.2.2 Estimação dos parâmetros das equações econométricas do modelo MARCO-PT	45
4.3 Modelo <i>basefit</i> e validação	49
4.4 Simulações contrafactuais (<i>ex-post</i>).....	51
5. Conclusões	63

1.Introdução

O crescimento económico é um dos principais indicadores do desenvolvimento de uma nação, geralmente medido através da variação do Produto Interno Bruto (PIB). Os modelos macroeconómicos mais utilizados à escala mundial não contemplam de um modo relevante os recursos energéticos e a eficiência energética que permitem a produção económica. No entanto, trabalho de investigação mais recente sugere que o consumo de energia tem um efeito significativo na actividade económica, mas que este efeito é particularmente visível quando o consumo de energia é medido na sua fase útil – isto é, após os processos de transformação e conversão na indústria energética e nos bens de uso final, e antes da transformação em serviços energéticos – e em termos do seu conteúdo de exergia – isto é, a porção da energia que tem o potencial de realizar trabalho físico. A adopção de uma métrica de exergia útil permite medir e agregar de forma comparável a contribuição real da energia para a economia. Além disso, a exergia útil é também a medida do consumo de energia que melhor se correlaciona com o crescimento económico, e daí que seja defendida a sua inclusão em modelos macroeconómicos.

O objectivo principal desta tese é o de desenvolver um modelo econométrico, adaptado à economia Portuguesa, que integre explicitamente a eficiência termodinâmica e o consumo de exergia útil. Além de permitir que as interrelações entre variáveis e respectivos coeficientes sejam estimados econometricamente, em vez de especificados a priori, o modelo assentará em quatro características principais. Em primeiro lugar, este modelo seguirá a tradição de modelos pós-Keynesianos, nos quais é enfatizado o papel da procura agregada como motor fundamental do crescimento económico, assumindo, portanto, que a oferta se ajusta a essa procura. Desse modo, o modelo aqui desenvolvido não adere aos princípios de um equilíbrio geral, sendo a relação entre procura e oferta baseada em definições das contas nacionais. Em segundo lugar, o lado da oferta é representado neste modelo por funções de produção agregadas modificadas e incluindo capital, trabalho humano, e energia. Em terceiro lugar, o modelo incorporará elementos de economia ecológica, com particular destaque para a suposição de que a energia desempenha um papel mais relevante na economia do que aquele que é sugerido pela fracção de pagamentos que recebe face ao rendimento total. Finalmente, este modelo permitirá testar a influência da eficiência termodinâmica e consumo de exergia útil no crescimento económico.

O modelo desenvolvido no âmbito desta tese terá como base o modelo econométrico MARCO-UK, desenvolvido para o Reino Unido, e que será adaptado à realidade económica e energética Portuguesa. Uma primeira componente do trabalho a realizar estará, portanto, relacionada com a compilação e tratamento de dados económicos e energéticos para Portugal, entre os anos 1960 e 2014, de modo a construir séries temporais relevantes para correr o modelo. Reunidos esses dados, uma segunda componente do trabalho passará por alimentar o modelo MARCO-UK, sem alterar as interrelações estimadas especificamente para o Reino Unido que o constituem, com os dados para a economia Portuguesa. Finalmente, uma terceira componente do trabalho passará por avaliar de que forma as relações definidas no modelo MARCO-UK, para o Reino Unido, são apropriadas (ou não) à realidade económica Portuguesa, e em caso negativo, estimar econometricamente novas relações,

mais adequadas, usando análise de cointegração. Estas novas interrelações estimadas especificamente para a economia Portuguesa constituirão um modelo MARCO-PT, adaptado à realidade económica e energética de Portugal. Por fim, o modelo MARCO-PT será utilizado para realizar simulações contrafactuais, de modo a isolar o efeito de determinadas variáveis (nomeadamente a eficiência termodinâmica, mas também o trabalho humano, investimento em capital, e consumo total de energia) no crescimento económico. Com base nos resultados obtidos, serão traçadas conclusões que permitam informar decisões estratégicas ao nível económico, energético e ambiental. Estas conclusões serão também comparadas com as conclusões originalmente obtidas com o modelo MARCO-UK, para o Reino Unido.

2. Estado da Arte

Desde a revolução industrial que as nações têm como grande objetivo global o desenvolvimento económico. Este serve para medir o progresso das nações, o qual, aliado com boas políticas públicas, mede o desenvolvimento social também. Assim, a sociedade ocidental, e grande parte do mundo, utiliza o crescimento do produto interno bruto (PIB) como medidor da “qualidade” do país. Não é uma medida perfeita, evidentemente, mas ao longo do último século tem tido um papel preponderante no avanço das sociedades. Tal desenvolvimento, como pretendo mostrar, esteve fortemente relacionado com as diferentes revoluções tecnológicas, em particular com a forma como a energia foi sendo utilizada em toda a economia.

Neste capítulo, procurarei evidenciar o que tem sido publicado na literatura sobre este assunto. Inicialmente, irei demonstrar a relevância dada aos recursos energéticos – ao longo da história económica – nos modelos macroeconómicos tradicionais. Em seguida, debruçar-me-ei sobre o que na literatura é dito acerca dos recursos energéticos como factor crucial do crescimento económico. Finalmente, concluirei este capítulo com um exemplo muito concreto: um modelo macroeconómico que considera que, de facto, a energia desempenha um papel central na economia. Será baseado nesse modelo – elaborado para o Reino Unido – que o trabalho desenvolvido nesta tese se focará, aplicando-o à economia de Portugal.

2.1. O papel dos recursos energéticos em modelos de crescimento económico tradicionais.

Desde o início da teoria económica clássica, em meados do século XVIII, que o papel da energia na produção e no crescimento tem vindo a ser negligenciado. Nessa altura, a agricultura era considerada a base da economia, sendo esta apenas função do terreno (*land*) e do trabalho (*labour*). Por isso, a energia proveniente da exposição solar e a quantidade de chuva, não eram tidos em conta, e apenas apareciam valorizados subtilmente no valor do terreno explorável. Da mesma forma – nos dias de hoje – o valor da energia solar incorporada nos combustíveis fósseis é assumido como sendo refletido no preço dos combustíveis, *i.e.* nos lucros das empresas mineiras e refinarias. No passado, não fazia muito sentido contabilizar estes valores, pois existiam muitas fontes de energia disponível e a tecnologia necessária era bastante simples, ou seja, o seu custo seria baixo, logo representavam muito pouco do PIB [1].

Desta forma, durante muito tempo, os economistas acreditaram que o grande motor do crescimento económico se resumia apenas ao papel do trabalho¹ e do capital². Tendo isto em conta, foram e são desenvolvidos modelos macroeconómicos com vista, por um lado, a entender o passado, de modo a escrever as relações entre trabalho, capital, e crescimento económico e, por outro, projetar o futuro de maneira a perceber que as medidas poderão vir a ser implementadas para trazer benefícios e criar valor para o país.

Este modo de olhar a economia advém da teoria neoclássica do crescimento [2]. Esta teoria tenta explicar o crescimento a longo prazo da economia através das contribuições do capital e do trabalho humano como principais fatores de produção. Assim, constata-se que este olhar sobre o crescimento não contempla a participação da energia, facto que é justificado pela teoria alegando que a energia é contemplada como sendo um produto intermédio da economia, *i.e.*, a energia é contabilizada na economia através do dinheiro envolvido neste sector. Neste contexto, é relevante proceder a uma distinção entre conceitos: factores de produção primários e intermédios. Os primeiros, segundo a teoria neoclássica, são aqueles que existem no início do período considerado e não são utilizados directamente durante a produção. Os segundos são aqueles criados durante o período produtivo e são totalmente utilizados durante a produção. Assim, a teoria neoclássica considera o trabalho humano e o capital como sendo factores primários e a energia como um factor intermédio [3].

A teoria neoclássica do crescimento económico é aquela que teve uma maior adoção no passado e, por isso, foi a partir dela que se desenvolveram os principais modelos macroeconómicos. O modelo mais representativo desta teoria é o modelo desenvolvido pelos economistas Robert Solow e Trevor Swan (modelo de Solow-Swan), que atribui ao trabalho humano e ao capital a força motriz da produção económica, sendo esta proporcional ao que cada fator recebe, em pagamentos, do produto interno bruto. Neste modelo, o PIB é considerado como sendo a soma dos pagamentos ao capital (sob a forma de rendas, e juros) e ao trabalho humano (sob a forma de salários). Esta distribuição de pagamentos tem-se mantido contante ao longo do tempo e em diversos países, sendo, em média, 70% do rendimento total pago ao trabalho humano e os restantes 30% ao capital. Deste modo, a energia não recebe qualquer parcela de pagamentos, o que evidencia a não consideração da energia como um factor de produção primário por parte deste modelo. Para além disto, Solow e Swan assumem que a elasticidade de cada factor de produção - em relação ao PIB - é constante e igual, em valor, à porção que cada factor recebe do produto.

Este modelo utiliza, como função de produção agregada, a função de produção Cobb-Douglas (equação 2.1) que, tal como a teoria neoclássica sugere, assume que o produto da economia (Y) é movido por dois factores de produção – capital (K) e trabalho humano (L) – proporcionalmente à sua

¹ O trabalho humano pode corresponder quer ao número de indivíduos que participam na produção (função da população em idade activa, taxa de participação na força laboral, e taxa de desemprego) quer ao número de horas trabalhadas, tendo em conta a média de horas trabalhadas por indivíduo empregado.

² Consiste em activos tangíveis produzidos pelo Homem que fazem parte do processo de produção de bens e serviços. As máquinas, edifícios, veículos e meios informáticos, etc.

fatia de rendimentos do produto (α e β , respectivamente) . Por exemplo, sabendo que o capital recebe 30% do PIB em pagamentos, a sua elasticidade seria de 0,3. Isto implica que, por cada ponto percentual que o capital varie – mantendo as restantes variáveis na equação 2.1 constantes – o PIB variará 0,3%.

$$Y = K^\alpha \cdot L^\beta \quad (2.1)$$

Ao aplicar o modelo Solow-Swan ao Estados Unidos da América, entre os anos de 1909 e 1949, constatou-se que uma parte significativa do crescimento desse país ficara por explicar (resíduo de Solow) [2]. Existia uma grande diferença entre o crescimento do PIB real e o crescimento do produto estimado ao aplicar o modelo, com base apenas nas contribuições do capital e do trabalho humano, pesadas pelas suas respectivas elasticidades. O economista Solow afirmou que esta grande parcela inexplicável pelo modelo (cerca de 87% do PIB per capita dos EUA), representava o progresso tecnológico, hoje denominado de Produtividade Total de Fatores (PTF)³. Tendo isto em conta, a PTF não representa uma medida muito objetiva, pois não é calculada diretamente – como o capital e o trabalho – mas indiretamente. É estimada como um resíduo, a diferença entre o PIB observado e as contribuições do trabalho e capital (equação 2.2).

$$Y = PTF \cdot K^\alpha \cdot L^\beta \quad (2.2)$$

Alguns avanços foram feitos, de modo a mitigar a grande diferença entre o crescimento observado e o estimado, ou seja, para reduzir a contribuição para o crescimento económico associada à PTF. Assim, foi elaborado um novo modelo por Paul Romer [4] e Robert Lucas [5], em que o trabalho humano foi dividido em diferentes tipos, dependendo das habilitações e competências dos trabalhadores. Este modelo, de facto, conseguiu reduzir o resíduo de Solow, mas foi insuficiente para explicar completamente o crescimento económico observado. Existia ainda uma grande parte desse crescimento que ficava por explicar com este modelo. O facto de a PTF não ser, matematicamente, muito objetiva, leva a que o que se considera explicável por este resíduo, ser apenas especulação. Assim, o que o resíduo PTF de facto representa fica por explicar. Como já referi, pode ter que ver com o progresso tecnológico de um país, ou com mudanças políticas ou alterações no tecido social. Contudo, a PTF também pode representar a contribuição de variáveis omitidas do modelo para o crescimento económico, como é o caso da energia.

³ Esta medida pode representar tudo aquilo que não é explicado pelos fatores de produção capital e trabalho humano, desde mudanças tecnológicas, como sociais, institucionais e até políticas. Pode também “absorver” o impacto de uma variável não tida em conta e também erros de medição dos factores de produção.

Para além de não conseguirem explicar esta grande diferença, os modelos neoclássicos pecam noutra questão. São incapazes de ter em conta a disponibilidade energética, os preços e, acima de tudo, não conseguem explicar recessões causadas por crises energéticas (e.g. os choques nos preços do petróleo verificados na década de 70). Aliás, o máximo que é possível afirmar, à luz dos modelos comuns, é que estas recessões são consequência, por exemplo, da redução de horas de trabalho. Ora este acontecimento é obviamente uma consequência e não uma causa [6]. No evento de uma recessão, o desemprego cresce porque as empresas têm quebras nos lucros, mas continuam a ter que lidar com os custos (incluindo pagar aos trabalhadores). Logo têm que despedir pessoas (menos horas trabalhadas). Mas essa redução de horas trabalhadas é uma consequência da recessão, não uma causa. Em suma, ainda é muito comum a energia não ser tida como parte fundamental da produção de um país. Assim, não é contemplada na grande maioria dos modelos macroeconómicos que regem, em grande medida, as políticas nacionais. Alguns economistas chegam a afirmar que o crescimento económico é, globalmente, independente da utilização de energia [7]. Por isso, é possível afirmar que os modelos tradicionais não são capazes de descrever o desenvolvimento económico. Isto deve-se a duas razões fundamentais. Em primeiro lugar, o facto de não contemplarem a energia como sendo um factor produtivo primário, o que leva a que não sejam capazes de explicar o impacto de crises energéticas na economia. Em segundo lugar, considerando apenas o capital e o trabalho humano, fica uma grande parcela do crescimento por explicar, sendo, por isso, preciso um resíduo que não é explicado pelo modelo (PTF).

2.2. Energia e eficiência energética como motores do crescimento económico.

2.2.1. A energia como factor subestimado do crescimento económico.

Fora do que é considerado *mainstream*, existe uma linha de pensamento denominada de Economia Ecológica na qual se considera que a energia tem um papel preponderante no crescimento de uma nação. Esta teoria lida com a economia como sendo um subsistema de um sistema ambiental maior, com as interações entre fluxos económicos e energéticos sendo fundamentadas pelas leis da física. Assim, os contributos energéticos são essenciais para a produção económica – pois os processos reais necessitam sempre de energia e não podem ser descritos sem ela [8]. Esta corrente afirma que o sistema económico se insere no meio ambiente e que efectua trocas de matéria e energia com o mesmo. Tendo isto em conta, esta teoria defende que o pensamento económico se deveria basear nas leis da física, nomeadamente nas leis da termodinâmica, pois são as leis que “regem” as referidas trocas de matéria e energia.

Na literatura dentro da Economia Ecológica é frequentemente assumido um papel central da energia no crescimento económico. Existem até autores desta linha de pensamento que propõem a energia como sendo o único factor produtivo primário [9].

Qual será então a relevância de introduzir o papel da energia nos modelos macroeconómicos? Alguns autores afirmam que existe um ciclo de *feedback* positivo entre energia e crescimento económico e que o consumo de energia o fomenta, não se tratando apenas de uma consequência do crescimento. A descoberta - e posterior desenvolvimento - de novas fontes de energia e o avanço tecnológico - que permite melhorar a eficiência da conversão de energia - permitem que a produção de bens e a realização de serviços tenham um custo cada vez menor. Ora, custo baixo em economia é sinónimo de preços baixos, que por sua vez, permitem o aumento da procura que, no final, levam a crescimento económico. Para além disso, o aumento da procura, que corresponde ao somatório dos factores do pagamento em que uma parcela retorna para o fator de produção do trabalho sob a forma de salários, levará ao aumento desses mesmos salários, estimulando assim a substituição de recursos naturais, em especial os combustíveis fósseis, e do trabalho mecânico desenvolvido pelo Homem e por animais. Estas substituições vão fomentar maior crescimento em escala, experiência e aprendizagem, mantendo preços reduzidos.[10].

Tendo em conta o que foi referido na sub-secção 2.1, parece plausível duvidar que o crescimento do produto interno bruto seja totalmente explicado apenas pela acumulação de capital e trabalho humano, como tem sido defendido no passado. Primeiramente, os factores produtivos mencionados quase nunca decrescem, ao contrário do PIB. Além disso, é evidente que, tanto o trabalho como o capital, não são capazes de produzir seja o que for sem utilizarem energia. Um trabalhador precisa de se alimentar, necessita de luz na sua fábrica e um computador no seu escritório. É preciso combustível para as máquinas e para os automóveis, etc. Por conseguinte, um fluxo de energia capaz de produzir trabalho (exergia) é tão ou mais importante para economia do que o capital e o trabalho humano, devendo, por isso, ser considerada como um factor produtivo relevante [11].

Apesar da grande importância que o carvão, o petróleo e o gás natural passaram a ter no processo produtivo das economias, a energia continuou a ser ignorada. Após o embargo árabe ao petróleo e conseguinte crise energética e económica (1973-1974) e, novamente depois da revolução no Irão (1979-1980), começaram a surgir hipóteses para lidar com a energia como sendo um factor produtivo numa análise quantitativa [12] [Jorgenson, 1978] [Hamilton, 2003]. Em ambos os casos, picos nos preços do petróleo levaram a profundas crises económicas em todo o mundo. Para além destes casos, desde a 2ª Guerra Mundial, diversas flutuações nos preços do petróleo, levaram a recessões [Hamilton, 2005] [Jorgenson, 1984]. De modo a contemplar esta aparente relação entre estes *carriers* energéticos e as recessões, alguns economistas propuseram a função de produção KLEM (capital, trabalho, energia e materiais) [12] [13] [14] [15]. Apesar disto, continuaram a existir críticas à hipótese de introduzir a energia como factor relevante [10], alegando que o preço da energia não tinha um impacto muito significativo no PIB, pois a percentagem do rendimento total nas contas nacionais em pagamentos referentes à energia era cerca de 4% (muito pouco, quando comparado com a

percentagem atribuída ao capital e ao trabalho humano). Por isso, este economista justificava as recessões com a “falta de dinheiro” nas economias recessivas [10].

Esta crítica de que a energia não pode ser considerada como factor produtivo, devido à sua pouca expressão, em termos monetários, nas contas nacionais, foi sendo assumida como verdadeira, apesar de se basear num modelo muito básico da economia. Para tecer as considerações atrás referidas, a economia foi considerada como sendo constituída por um só sector que produzia um só bem. Outro economista [16] descreveu a economia, analogamente, como sendo um conjunto de pequenas padarias produtoras de pão. Neste exemplo manifestamente simples, torna-se bastante claro que cada *input* dado a cada factor é utilizado proporcionalmente à sua produção marginal⁴, mas este exemplo vai mais longe, afirmando que a elasticidade em relação ao produto dos factores de produção será exatamente igual à sua percentagem nos pagamentos totais [11].

Tendo em conta que, nos Estados Unidos, a parcela referente a cada factor tem-se mantido constante, levou a que se assumisse essa igualdade entre o pagamento aos factores (*input*) e a elasticidade em relação aos *outputs*. Por sua vez, isto justifica a utilização da função Cobb-Douglas. Para além disso, esta equação é utilizada devido à sua simplicidade matemática e fácil linearização – os seus expoentes facilitam o entendimento do impacto no PIB da variação dos factores de produção. Ainda, a função Cobb-Douglas vai de encontro à teoria neoclássica quando assume que as elasticidades em relação ao produto são constantes e iguais à *cost share* dos factores, relacionando assim a teoria da produção económica e as contas nacionais. Mas olhando criticamente para esta simplificação, da qual foram retiradas elações, também simplistas, é possível considerá-la irrealista. Pois se se considerar a economia como um sistema complexo, com diversos sectores e muitos produtos, é quase imediato verificar que o impacto da redução de um *input* essencial irá ter um impacto bastante superior na economia do que somente a parcela, na totalidade das contas nacionais, correspondente ao seu pagamento. A título de exemplo, a água corresponde a uma pequena fração do PIB, mas sem ela, todas as indústrias, alimentar, entre outras, iriam falhar. A própria indústria alimentar em Portugal, que corresponde a 4,5% do PIB, se falhasse, o seu impacto na economia nacional seria muito superior a 4,5%, pois qualquer trabalhador precisa de se alimentar e, por isso, toda a economia falharia. Assim, o argumento de Thomas Schelling [17] de que um declínio de 50% na agricultura dos EUA iria ser traduzido no PIB em apenas 2%, é totalmente falso [18]. Caso esse declínio se confirmasse, existiriam muitos mais sectores afetados, o que corresponderia a uma grande fatia do PIB.

Assim, voltando ao caso da energia, o mesmo argumento pode ser utilizado. O papel da energia no crescimento do PIB será muito superior à sua parcela no produto pois influencia todos os sectores da economia e, por isso, a energia deve ser considerada como tendo um papel chave nas produção económica.

⁴ Variação na produção que resulta da utilização de uma unidade diferente do fator de produção, mantendo constantes outros fatores como os equipamentos e as quantidades utilizadas na produção.

Existem trabalhos publicados em que os autores foram capazes de estimar crescimentos económicos passados sem resíduo de Solow, considerando a energia como factor de produção, juntamente com o capital e o trabalho humano [19], [20], [21], [22]. Embora tenham conseguido colmatar o problema referente ao resíduo de Solow, estes trabalhos não foram capazes de estimar correctamente as elasticidades dos produtos, pois afastavam-se bastante das *cost shares*⁵ dos factores, não sendo, portanto, consistentes com o teorema⁶ neoclássico das *cost shares* [23].

Destes estudos foi possível compreender que a importância da energia no crescimento económico é superior à sua *cost share*. Assim, depreende-se que este novo factor de produção poderá restringir as economias se não for abordado como tal. Por isso, foram publicados trabalhos que visavam calcular requisitos energéticos para atingir determinados níveis de crescimento [24].

Um modelo semelhante é o de [25] em que as restrições à substituição de factores de produção, causadas pelos limites adjacentes à tecnologia foram apelidados de limites à automação e limites à capacidade de utilização (como é o caso da substituição de trabalho humano por capital, ou seja, por máquinas). Para os autores, as implicações desta imposição tecnológica na maximização dos lucros e do bem-estar social levará a um equilíbrio económico que contradiz as premissas neoclássicas, nomeadamente no que diz respeito às elasticidades em relação ao produto dos factores de produção serem iguais às suas *cost shares*. Na verdade, este modelo propõe que as elasticidades serão iguais a, como referem, *cost shares* sombra, pois as restrições tecnológicas criarão custos “escondidos” que se somarão às *cost shares* “normais” [23]. Neste sentido, os autores propõem uma alternativa. As elasticidades devem ser calculadas independentemente das condições de equilíbrio, recorrendo a equações diferenciais, sem utilizar as soluções mais simples destas equações (Cobb-Douglas), mas sim as soluções dependentes de outros factores (não constantes). Assim, obtém-se uma função de produção agregada que depende linearmente da energia e exponencialmente dos quocientes dos factores. A esta função deu-se o nome de LINEX. Esta possui parâmetros tecnológicos relativos à eficácia do capital e à procura de energia por parte da totalidade do capital utilizado. Tendo em conta que estes parâmetros são dependentes do tempo, leva a que a função LINEX também o seja. Este facto faz com que a função não seja capaz de explicar crescimentos passados, se apenas se basear nos factores de produção.

Ayres and Warr [22] utilizaram esta função, usando como variável energética a exergia útil⁷. Neste trabalho, os autores procuraram testar a inclusão da energia como factor de produção independente na função. Foram então capazes de demonstrar que utilizando, como variável energética, a energia primária, o modelo não era capaz de explicar o crescimento económico dos EUA dos últimos 100 anos (à data da publicação), mas usando a exergia útil foram capazes (sem resíduo de Solow). Apesar do sucesso em suprimir o resíduo, este modelo foi alvo de duas críticas. Primeiramente, ao

⁵ Parcela dos rendimentos pagos pelo PIB a um determinado factor de produção.

⁶ Teorema que afirma que elasticidade de *output* da energia deve ser proporcional na economia à sua *cost share* no PIB.

⁷ Será explicado adiante

utilizarem a função LINEX não foram capazes de satisfazer os requerimentos de concavidade necessários [8]. Em segundo lugar, ao ajustarem qualitativamente a energia – medindo a exergia - pecaram em não conseguir fazê-lo também para os restantes factores de produção.

Existe, como foi apontado, bastante trabalho desenvolvido que propõe que a energia seja tida em consideração aquando da elaboração de modelos macroeconómicos. Aliás, para além de ser proposta é, acima de tudo, tida como peça chave da explicação do crescimento económico das nações.

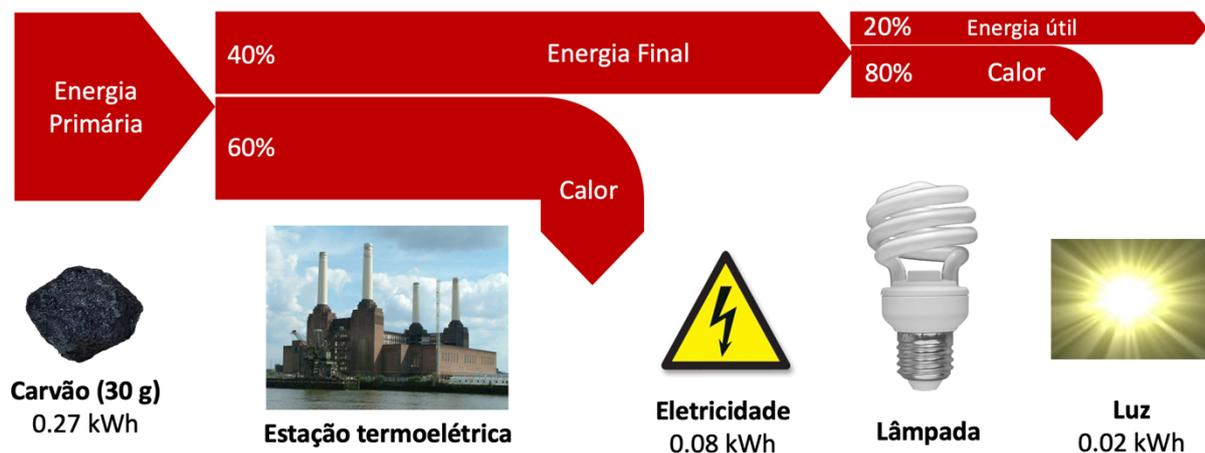


Figura 2.1: Esquema de cadeia energética

2.2.2. Energia, exergia e exergia útil.

Nesta secção irei expor os conceitos energéticos chave relevantes para esta tese. Para isso, é necessário compreender que energia é uma grandeza física demasiado lata e por isso é preciso recorrer a grandezas energéticas mais específicas. Na presente tese, tendo ela uma componente económica bastante acentuada, é imperativo que se empregue uma grandeza energética que represente a energia que de facto é útil ao processo produtivo. Será sobre isso que me deterei: se existe uma grandeza energética que distinga a utilidade da energia, que seja quantificável; e de que forma a sua utilização contribui para a gestão dos recursos energéticos.

Nas sociedades actuais as fontes de energia (energia primária), usualmente, não são utilizadas directamente para fins úteis aos consumidores. São necessárias conversões ao longo da cadeia energética. Muito poucas pessoas, nos nossos dias, queimam combustíveis fósseis para aquecer as suas casas. Estes combustíveis – por exemplo, o carvão – são utilizados para produzir eletricidade (energia final) em centrais termoelétricas e será essa eletricidade que as populações irão usar nas suas habitações – por exemplo, um radiador que converte energia eléctrica em calor (energia útil) (figura 2.1). Esta evolução deve-se ao facto de o Homem ser capaz de obter hoje energia em formas mais concentradas e mais facilmente transportáveis.

Evidentemente, a eficiência e a procura de energia num país serão importantes, pois serão esses dados que regularão a quantidade de energia primária necessária. Normalmente, a abordagem

energética para esta avaliação tem por base a 1ª Lei da Termodinâmica⁸. Ora este modo de avaliar não é totalmente fidedigno pois, para além de tratar diferentes tipos de energia como iguais (não o sendo), não ilustra que nem todos os *inputs* energéticos são passíveis de produzir trabalho. Para melhor compreender esta diferença é necessário esclarecer o que se entende por exergia, exergia útil, e eficiência .

Tendo dois sistemas, um de referência, chamado de ambiente e outro, considerado o sistema de interesse. Exergia será o máximo trabalho teórico que poderá ser obtido através da interação dos dois sistemas para alcançarem o equilíbrio [26].

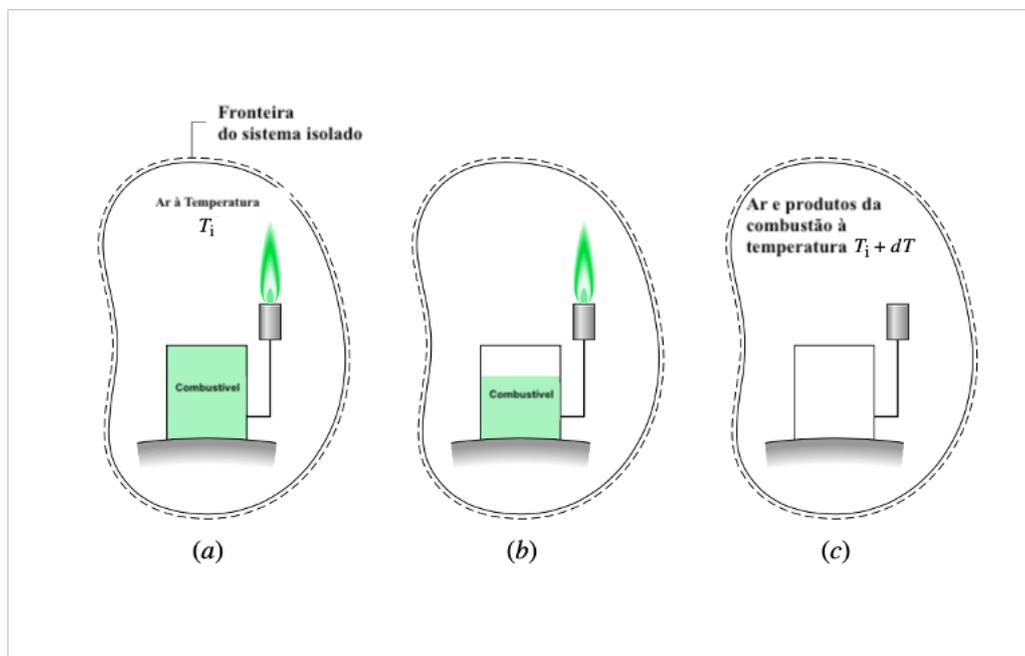


Figura 2.2: Exemplo explicativo do conceito exergia [17].

O seguinte exemplo serve para ilustrar este conceito diferenciando-o do conceito de energia propriamente dito. Imagine-se uma pequena sala isolada que contém um recipiente com gasolina. Acende-se o combustível e este arde até todo o líquido ser consumido. O resultado desta experiência será um ligeiro aumento da temperatura do ar da sala (agora contendo ar e os produtos da combustão). Assumindo que a sala é de facto bem isolada, a quantidade total de energia manteve-se. O que se alterou foi a “qualidade” da energia no interior da sala. A gasolina antes de arder tem um maior potencial para desenvolver tarefas úteis, comparada com a mistura de ar e produtos da combustão ligeiramente aquecidos. Por exemplo, a gasolina poderia ter sido utilizada para produzir eletricidade, ou fazer mover um automóvel. Já a mistura de gases aquecidos não teria a capacidade de realizar quase nada, à exceção de melhorar a sensação térmica no interior da sala. Efetivamente, o potencial inicial da gasolina (a sua exergia) foi destruída durante a combustão. Apesar de a energia se manter, a exergia é sempre destruída em todos os processos de conversão energética (2ª Lei da Termodinâmica) [27].

⁸ Toda a energia é passível de se converter em trabalho ou calor, nunca se destruindo. Conserva-se sempre.

Para melhor dominar este conceito, é ainda necessário distinguir entre eficiência de primeira lei (relacionada com energia)⁹ e eficiência de segunda lei (eficiência exergética). De modo a fazê-lo recorramos novamente a um exemplo. Considere-se um esquentador com uma eficiência energética (1ª lei) de 80% *i.e.* para cada unidade de *input* energético (e.g. Joule), o aparelho fornece 0.8 unidades de energia. Esta elevada eficiência poderia sugerir que existe pouca margem para melhorar, visto que a eficiência do aparelho está bastante próxima dos 100%. Contudo, essa conclusão estaria errada. O valor de 80% apenas se refere ao processo específico da operação em causa, neste caso, converter combustível em calor. Tendo em conta que as temperaturas envolvidas na combustão do combustível fóssil são muito mais elevadas do que aquelas requeridas pelo consumidor em sua casa, constata-se que este processo não convém às necessidades em causa, *i.e.*, trata-se de uma utilização ineficiente de combustível e do próprio aparelho.

Em vez de se ter como foco a eficiência energética, a atenção deveria estar voltada para o limite máximo teórico da eficiência, neste caso, de fornecer calor a uma habitação, tendo em conta a diferença de temperaturas entre a casa e o próprio aparelho. Ao rácio entre o valor teórico da quantidade mínima de energia necessária para determinada tarefa e a energia de facto utilizada, chama-se eficiência exergética ou eficiência de segunda lei.

Assim, parece ser uma melhor alternativa utilizar o conceito de exergia para medir a cadeia energética de uma economia a nível nacional. No topo da cadeia temos a exergia primária (à semelhança da energia primária, pode ser carvão, energias renováveis, gás natural, etc...). Estas fontes primárias são convertidas em *carriers* exergéticos com valor comercial (exergia secundária - eletricidade ou gasolina, por exemplo), que serão transportados até aos clientes (exergia final), com evidentes perdas ao longo de todo este caminho. O último estágio de conversão exergética dá-se nos aparelhos que utilizam esta exergia final para desempenhar alguma tarefa (lâmpadas, computadores, frigoríficos, carros, etc.) passando de exergia final a exergia útil, sob as formas de calor ("low heat"), trabalho mecânico, radiação eletromagnética, entre outros.

Assim, a razão principal para, nesta tese, se utilizar exergia útil para procurar explicar o desenvolvimento económico deve-se ao facto de esta grandeza captar da melhor forma a contribuição da energia na economia e no bem-estar da sociedade. A exergia destruída ao longo da cadeia energética não tem qualquer valor económico, mas a exergia útil no final da cadeia é o que produz todos os bens e serviços de uma economia. Por isso, melhorar as eficiências de segunda lei na conversão em todos os estágios da cadeia, irá permitir que mais exergia útil chegue ao consumidor, resultante da mesma quantidade de energia primária. Este aumento de exergia útil disponível é que trará desenvolvimento económico e não apenas o aumento de *output* energético dos aparelhos de conversão. Em suma, será a parte produtiva dos fluxos de energia (exergia útil) que deveria ser o foco dos modelos macroeconómicos [28].

⁹ Tem-se eficiência de primeira lei como o rácio entre a energia útil (*output*) e a energia fornecida (*input*).

[29] e [30] foram pioneiros na contabilização da exergia e exergia útil de diversas nações. O seu método resumiu-se a, primeiramente, a conversão dos dados energéticos existentes de energia final para exergia final. Em seguida, procederam à alocação do consumo exergético final de cada sector das economias por grupos de utilidade (por exemplo, calor de baixa temperaturas e calor de altas temperaturas; trabalho mecânico, luz e trabalho muscular). Em terceiro lugar, estimaram a eficiência de segunda lei para cada conversão final-útil. Finalmente, somaram todos os valores exergéticos úteis, de modo a obterem a exergia útil total.

Assim, exergia útil já tem sido, portanto, utilizada em estudos macroeconómicos, nomeadamente por Ayres e Warr, que estimaram séries temporais agregadas de exergia útil, utilizando estes dados em modelos económicos. Para além deles, também Serrenho et al. (2016), desenvolveu um estudo semelhante, focando-se em Portugal.

Serrenho et al. (2016) obtiveram os dados exergéticos referentes a Portugal, calculando as séries das intensidades de exergia (exergia final/PIB e exergia útil/PIB) entre 1856 e 2009. Depois deste estudo, Santos et al. (2018), fazendo algumas pequenas correções, retomaram estes cálculos, agora a partir de 1960. Na figura 2.3 é possível observar os resultados desses cálculos. Constata-se que existe uma relação unitária entre a exergia útil e o PIB ao longo de todo o período de estudo. Foi sempre necessário, e continua a ser, 1MJ de exergia para produzir 1€ na economia de Portugal. Assim, uma economia muito pouco desenvolvida (como era a portuguesa em 1856), precisava de 1MJ de exergia para produzir 1€. Já numa economia muito desenvolvida, como é a atual (com serviços de saúde, educação, indústria pesada, transportes, etc..) é necessária a mesma quantidade de exergia por unidade de produto económico, em termos monetários. O facto de ser necessário muito menos exergia final por cada euro do PIB (como se pode corroborar na figura 2.3, em que a intensidade de exergia final desce) significa que ao longo dos anos, os processos foram sofrendo uma grande optimização das eficiências de segunda lei.

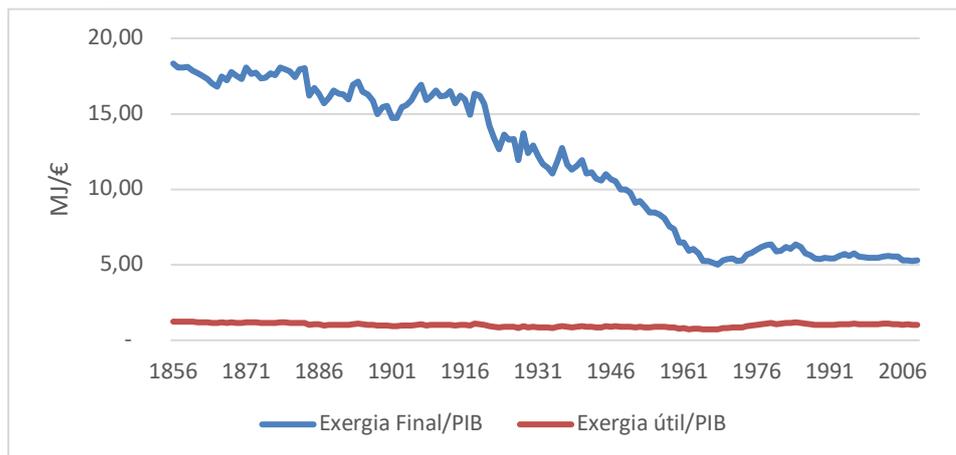


Figura 2.3: Intensidades da exergia útil e exergia final na economia portuguesa (1856-2009).

A intensidade da exergia final já não se pode dizer que se tenha mantido estável ao longo dos anos. Isto prende-se com o facto de a eficiência exergética final para útil ter crescido bastante nos

últimos anos (como evidencia a figura 2.4). Como a intensidade de exergia final é o rácio entre a exergia final e o PIB, é normal que este rácio comece a diminuir mais abruptamente por volta dos anos 50, pois é precisamente nos anos 50 que a eficiência exérgica final-para-útil em Portugal começa a crescer mais significativamente. Isto deveu-se ao progresso tecnológico na utilização de energia, mas também, como consequência da utilização de novas fontes de energia. O avanço tecnológico ditou novos aparelhos, mais eficientes. Estes avanços resumem-se, em grande medida, na adoção do motor elétrico como meio de produção [28]. A estabilização que se verifica posteriormente para a intensidade de exergia final (após 1980) deveu-se, em grande parte, ao aumento da utilização de automóveis, associados a uma muito baixa eficiência exérgica final para útil.

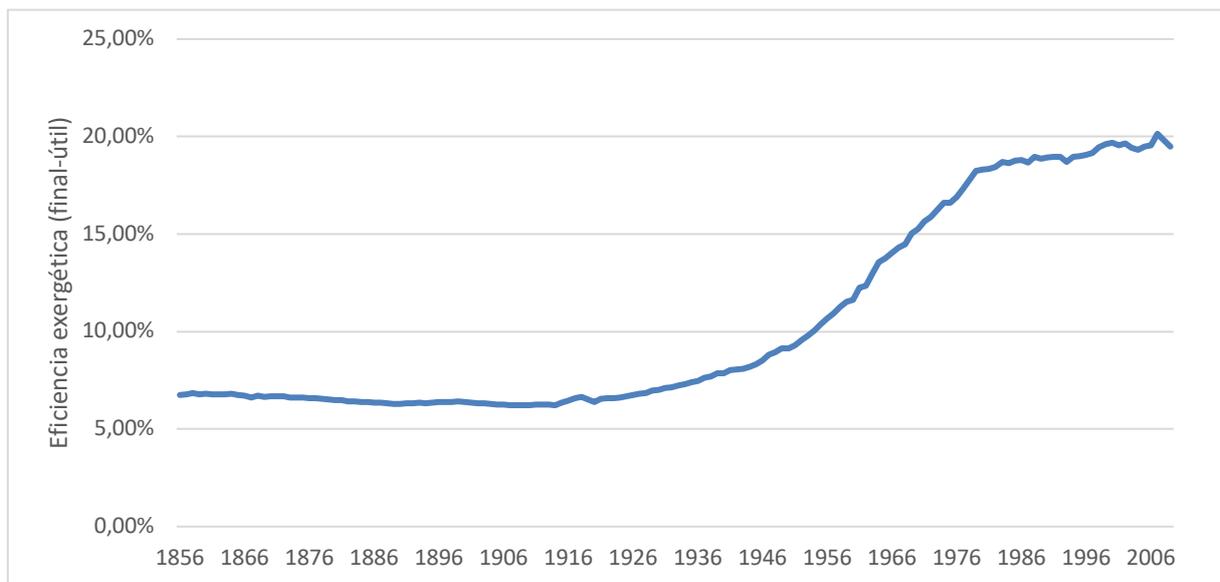


Figura 2.4: Eficiência exérgica final para útil na economia portuguesa (1856-2009).

Em suma, com o aumento da eficiência exérgica final para útil é possível manter a mesma intensidade exérgica útil do que há um século a trás, mas agora com uma economia muito mais desenvolvida. Daqui pode-se tirar a relação de que as melhorias das eficiências de segunda lei estão relacionadas com o desenvolvimento económico. É por isso que é pertinente recorrer a este conceito (exergia) para desenvolver um modelo macroeconómico, pois está diretamente relacionado com o desenvolvimento económico.

Destes resultados depreende-se que a produção e o crescimento económico estão mais fortemente relacionados com a exergia útil do que com qualquer outra variável exérgica ou energética. Isto leva a que mais autores procurem relacionar o consumo de exergia útil com o crescimento económico e com os factores de produção [31]. Tem-se investigado as relações de longo prazo – que sejam estatisticamente robustas – entre crescimento económico, trabalho humano, capital e exergia útil, recorrendo a técnicas econométricas, como é o caso da cointegração, que permite identificar relações a longo-prazo entre variáveis macroeconómicas. Para a economia portuguesa, a análise de

cointegração demonstrou que não é possível obter um modelo macroeconómico, baseado na função Cobb-Douglas, sem incluir *inputs* de exergia útil na análise [8]. O modelo de Santos et al. (2018) foi capaz de estimar o crescimento económico de Portugal sem necessitar de uma PTF exógena. Contudo, impõe um constrangimento no que diz respeito à capacidade de substituição entre factores de produção (trabalho humano, capital e exergia útil).

Estes estudos são coerentes com a ideia de que a quantidade de energia consumida - aliada com a eficiência com a qual esta é convertida, transformada e distribuída até ao consumidor – são vitais para o crescimento económico. Matthew Heun e Paul Brockway focaram-se neste fenómeno concreto: a relação entre a exergia útil e o crescimento económico, no Gana e no Reino Unido [32]. Estes autores realizaram uma análise exérgica para ambos os países. Obtiveram, como resultados, a evidência de que a eficiência termodinâmica primária-para-útil se relaciona positivamente com o crescimento económico destes dois países. Heun e Brockway propõem duas possíveis causas para esta relação que observaram. A primeira é que o aumento do produto leva ao maior investimento em equipamentos exergeticamente mais eficientes. A segunda é a de que maior eficiência exérgica resulta numa menor despesa no consumo energético que, por sua vez, deixa uma maior disponibilidade financeira para o investimento no resto da economia e assim aumentar o produto interno.

Finalmente, [33] apresentaram para Portugal que a PTF pode ser considerada como uma aproximação das alterações da eficiência de conversão de exergia final em útil. Sendo essa relação fortalecida ao desagregar o capital e considerando trabalho humano, ajustado ao nível de ensino. Ao estimarem a PTF como função da eficiência exérgica final para útil, todo o crescimento económico de longo prazo foi explicado ao medir directamente o capital, o trabalho humano e a eficiência exérgica na produção, construindo assim um modelo que fornece explicações satisfatórias do crescimento económico, baseado em energia e eficiência.

2.3. Modelo MARCO (MAcroeconomic Resource CONsumption)

Tendo tudo isto em conta, foi desenvolvido recentemente um modelo macroeconómico com vista a demonstrar as implicações da eficiência termodinâmica (2ª Lei) no crescimento económico do Reino Unido – o modelo MARCO (MAcroeconomic Resource CONsumption)¹⁰ [34]. Este modelo revela ter uma construção estatisticamente consistente e é baseado em métodos econométricos envolvendo testes empíricos. O modelo distingue-se devido a 4 características principais. Primeira, o modelo contém características pós-keynesianas em que a procura desempenha um papel essencial na economia [35], [36]. Segunda, a oferta é representada recorrendo a funções de produção agregada incorporando energia, trabalho e capital. Terceira, possui elementos de Economia Ecológica, ao

¹⁰ Daqui em diante referenciado como modelo MARCO-UK.

considerar a energia como um factor de produção essencial. Quarta - a mais notória - a capacidade do modelo testar a influência da exergia útil, e da sua eficiência, no crescimento económico do Reino Unido. Para além disto, modelos econométricos tais como o modelo MARCO-UK possuem a aptidão para desenvolver simulações *ex-post* e *ex-ante*. Este modelo permite ainda estimar econometricamente as interrelações entre diferentes variáveis e seus respectivos coeficientes, ao invés de definir essas mesmas relações *a priori*.

2.3.1 Elaboração do modelo

Na figura 2.5 é apresentado um esquema que ilustra, de forma simplificada, as relações entre as variáveis presentes no modelo MARCO-UK. Nesta imagem são distinguidas as variáveis energéticas e as que dizem respeito a factores económicos. As energéticas incluem a energia utilizada nos diferentes estádios da cadeia (primária, final e útil) e as respectivas eficiências exergéticas de conversão. A utilização de energia primária e útil no modelo correspondem a totais agregados. Para além disso, foi considerado que a economia continha três sectores consumidores de bens energéticos: Indústria, Habitações e Outros. Como foi referido, estas variáveis energéticas estão totalmente integradas no modelo, ao contrário do que é habitual em modelos macroeconómicos semelhantes.

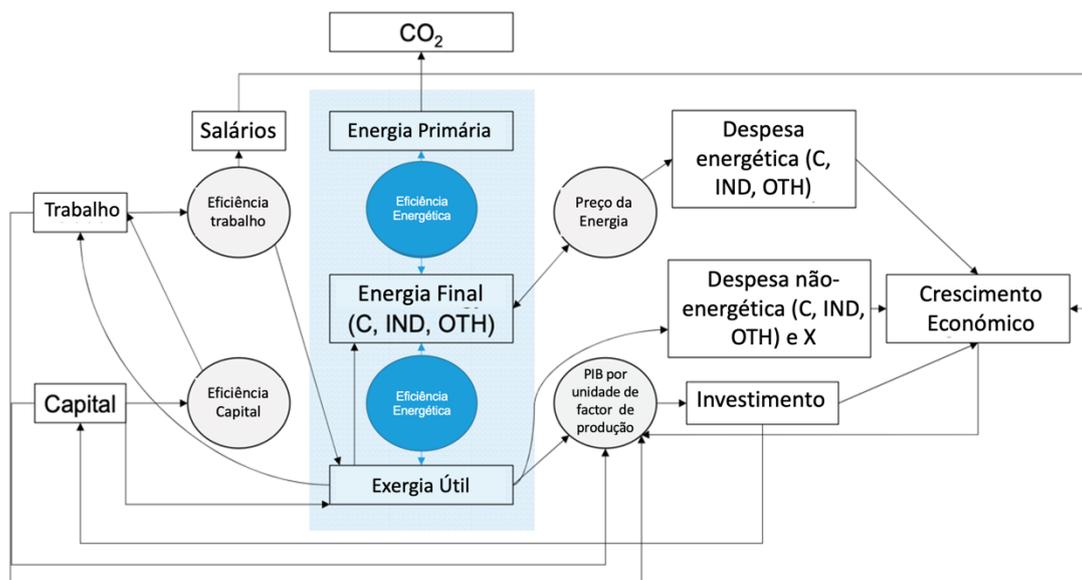


Figura 2.5: Esquema da estrutura do modelo MARCO-UK. [34]

Como foi dito anteriormente, este modelo salienta o papel da procura na economia, levando a que o lado da oferta se ajuste para satisfazer essa procura. Toda esta estrutura foi baseada nas relações presentes no sistema de contas do Reino Unido.

Assim, o total dos rendimentos da economia deve ser igual ao total da despesa, para cada ano estudado. Para isso foram assumidas diversas relações. A procura agregada depende de decisões de consumo e/ou investimento, as famílias consomem bens consoante da sua disponibilidade financeira

(os salários e subsídios que recebem), os gastos do estado são considerados como exógenos, *i.e.*, não estão relacionados com o rendimento nacional. O investimento no capital social depende da produtividade dos factores de produção. Adicionalmente, os investimentos na eficiência energética, no modelo, não são separados dos demais investimentos.

Finalmente, o modelo considera que a energia e o capital são fundamentalmente complementares, apesar de, frequentemente, serem considerados substitutos. O investimento no capital também é necessário para melhorar a eficiência energética e, é considerado que os serviços energéticos relacionam-se mais com o crescimento económico do que a energia primária ou final. Deste modo, a procura por serviços energéticos leva a que seja utilizada energia primária e energia final, estimulando assim o investimento que, por sua vez, leva ao crescimento económico. Para que tudo isto seja possível, a exergia útil foi assumida como uma aproximação dos serviços energéticos.

2.3.2 Equações do modelo MARCO-UK

À semelhança de outros modelos macroeconómicos, o modelo MARCO-UK, na sua essência, consiste num sistema de equações. Na sua totalidade existem 57 equações que constituem o modelo, que podem ser de dois tipos diferentes. O primeiro tipo são as equações compostas por identidades, que correspondem a relações entre variáveis que se verificam para todos os períodos. A maioria das identidades presentes no modelo MARCO são baseadas nas definições estabelecidas no sistema de contas nacionais para Reino Unido. Um exemplo de uma equação de identidade (2.3) é a que define o PIB, pelo lado da despesa, relacionando-o com o consumo público e privado (G e C , respetivamente), com o investimento (I), e com a diferença entre exportações (X) e importações (M).

$$Y = C + G + I + X - M \quad (2.3)$$

O segundo tipo de equações são baseadas em observações empíricas e são estimadas econometricamente. Estas não se verificam necessariamente para todos os períodos e são específicas da economia do Reino Unido, captando a essência desta economia. Cada uma destas equações relaciona uma variável (identitária ou não) em função de outras. Um exemplo de equação econométrica (2.4) é a que estima a exergia total (UEX_TOT), sendo função da exergia útil no período anterior, do trabalho humano ajustado qualitativamente (HL), do stock bruto de capital (K_GRS) e do PIB (Y).

$$UEX_TOT_t = f(UEX_TOT_{t-1}, HL_t, K_GRS_t, Y_t) \quad (2.4)$$

2.3.3 Dados e processo de estimação

O modelo MARCO-UK é constituído por séries temporais anuais de 75 variáveis, entre os anos de 1971 e 2013. Todas as variáveis económicas são apresentadas a preços constantes de 2011, tendo os dados sido recolhidos de fontes internacionais, incluindo o *UK Office for National Statistics*, o Banco Mundial, a *Penn World Tables* e as Nações Unidas.

Os parâmetros que compõe as equações econométricas foram estimados recorrendo ao método dos mínimos quadrados, utilizando as variáveis em logaritmos. Foram ainda feitos testes de estacionariedade e cointegração para averiguar a existência de relações de longo prazo entre variáveis. Ao proceder à cointegração foi possível estimar as equações usando especificações de curto e longo prazo. As especificações de curto prazo correspondem a diferenças de logaritmos, incluindo desfasamentos temporais enquanto que as especificações de longo prazo correspondem a termos de correcção de erros. Todas as variáveis estimadas foram sujeitas a testes para verificar a sua capacidade de ajuste, a significância estatística dos coeficientes e a não contradição de sinal com as expectativas teóricas. Para além disto, cada equação econométrica foi também testada quando à sua normalidade, heterocedasticidade e autocorrelação.

2.3.4 Modelo Basefit e Validação

Depois de todas equações terem sido estimadas, elas formaram – em conjunto com as equações identitárias - um sistema de equações lineares. Este é resolvido de forma dinâmica para cada período, usando o método iterativo de Gauss-Seidel [37]. Esta ferramenta matemática permite que sejam determinadas as variáveis endógenas, requerendo apenas as variáveis exógenas e de valores iniciais de variáveis endógenas (de 1971 a 1975 devido aos desfasamentos temporais, no caso do MARCO-UK). Assim, os valores estimados são utilizados para resolver o sistema de equações para os restantes períodos de tempo.

Algumas variáveis *dummy* (artificiais) foram introduzidas, para colmatar pontos de ruptura nas tendências de algumas das variáveis estimadas, nomeadamente para os períodos das recessões económicas (meados dos anos 70, inícios dos anos 80 e 2009). Finalmente, uma vez que todas as equações foram resolvidas, o modelo que estima as variáveis ao longo do tempo de estudo é denominado de modelo *basefit*.

Em suma, a validação do modelo foi feita do seguinte modo: Primeiramente, as bases de dados necessárias foram pesquisadas e validadas. Em seguida, utilizando as referidas bases de dados, as equações foram reunidas criando assim o esqueleto básico do modelo. Tudo isto foi feito recorrendo a teoria económica pós-Keynesiana. Em terceiro lugar, os resultados do modelo *basefit*, bem como os testes estatísticos efectuados, foram revistos e corrigidos, quando necessário. Posteriormente, o modelo melhorado foi revisto por elementos que não participaram na elaboração do modelo MARCO-UK, para detectar eventuais erros e falhas que possam não ter sido identificadas pelos autores. Finalmente, os resultados do modelo foram novamente revistos, de modo a fazer as últimas alterações

e melhoramentos, tendo em conta os testes estatísticos efectuados. Após todo este processo, como já foi referido, o que se obteve foi o modelo *basefit*, que será utilizado nas simulações contrafactuais.

2.3.5 Simulações contrafactuais

Como última etapa, o modelo MARCO-UK contém simulações contrafactuais. Estas simulações tiveram como objetivo expor empiricamente qual o papel da eficiência exergética no crescimento económico do Reino Unido. Para isso, os autores, a partir do modelo *basefit*, mantiveram constante ao longo do período de estudo (1971-2013) variáveis chave, de modo a compreender qual o papel de determinada variável na evolução histórica do Produto Interno Bruto. Estas simulações permitiram avaliar o efeito na totalidade da economia causada pela alteração de uma variável específica. No modelo MARCO-UK foram feitas 6 simulações. As variáveis mantidas constantes nas simulações foram as seguintes:

1. Eficiência exergética (eficiência de conversão de energia final para útil);
2. Utilização de energia final total (soma dos 3 sectores, Habitações, Indústria e Outros);
3. Exergia útil total;
4. Preços da energia (3 sectores);
5. Investimento em capitais fixos;
6. Trabalho (número de pessoas empregadas) .

2.3.6 Resultados

No modelo MARCO-UK, comparou-se o crescimento económico – estimado pelas simulações contrafactuais – com o crescimento estimado pelo modelo *basefit*. A figura 2.6 apresenta um gráfico onde é projectado as diferentes estimativas da evolução do PIB o Reino Unido. Ao interpretar a figura 2.6 é possível identificar o impacto no crescimento económico de cada uma das variáveis mantidas constantes em cada simulação. Existem, claramente, duas simulações que se afastam do crescimento estimado pela simulação *basefit*. Essas simulações dizem respeito às variáveis da eficiência termodinâmica (eficiência exergética final para útil) e do investimento do capital. Mantendo uma ou outra destas duas variáveis com valores de 1971 levaria a uma quebra do PIB de 2013 de cerca de 25%.

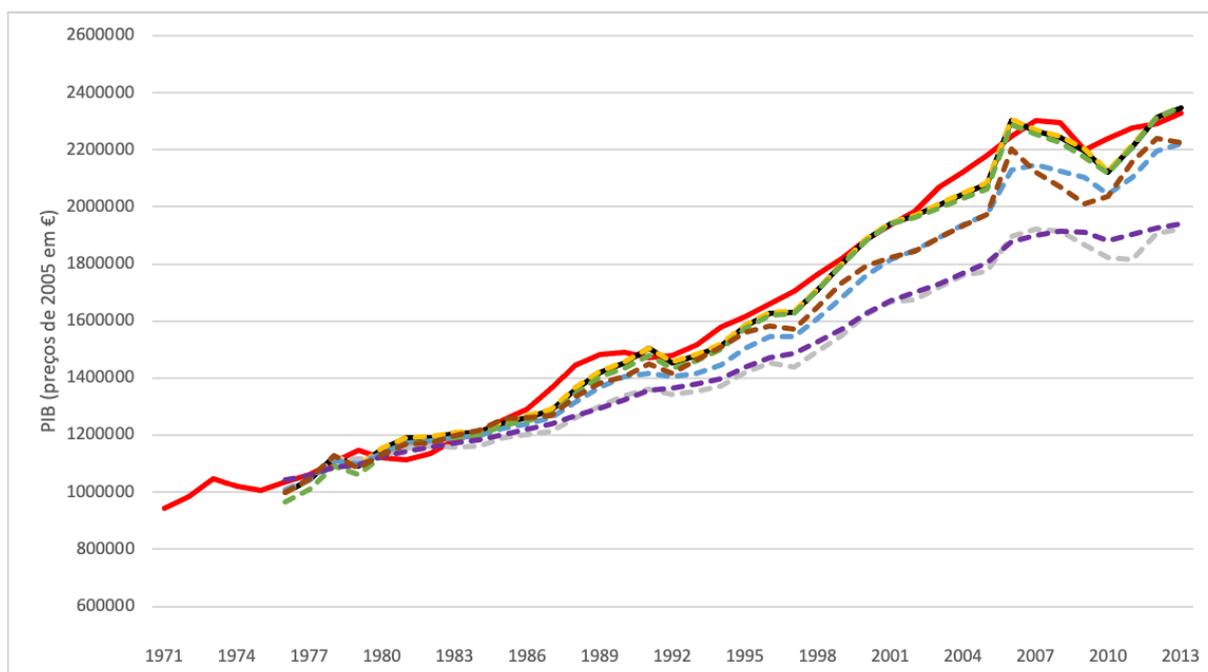


Figura 2.6 – Produto interno bruto do Reino Unido 1971-2013, estimado pela solução basefit (linha preta), e simulações contrafactuais (linhas a tracejado) : linha cinzenta, eficiência de conversão exergética final para útil (EXEFF_FU) mantida constante; linha amarela, energia final total consumida (FEN_T) mantida constante; linha roxa, investimento (I) mantido constante; linha castanha, trabalho humano (L) mantido constante; linha verde, preços da energia (P_EN_C, P_EN_IND, P_EN_OTH) mantidos constantes; linha azul, exergia útil total (UJEX_TOT) mantida constante [34].

Para além da figura 2.6, também foi elaborada a tabela 2.1, onde os autores procuraram mostrar – em maior detalhe - os efeitos no crescimento económico do Reino Unido de cada uma das simulações em diferentes sub-períodos. A tabela 2.1 promove assim uma medida quantitativa do impacto das variáveis sob as simulações. Para cada período apresentado a eficiência termodinâmica e o investimento são sempre as duas variáveis que maior impacto apresentam.

Variável	Contribuições anuais para o PIB			
	1976–1990	1990–2000	2000–2013	1976–2013
PIB_Basefit	2.73%	2.61%	1.70%	2.34%
Eficiência Exergética	0.69%	0.68%	0.37%	0.57%
Energia Final	-0.02%	0.01%	-0.01%	-0.01%
Exergia Útil	0.33%	0.44%	-0.11%	0.18%
Preços da Energia	-0.12%	-0.14%	-0.02%	-0.09%
Capital	1.01%	0.96%	0.34%	0.64%
Trabalho Humano	0.26%	0.89%	0.00%	0.14%

Tabela 2.1 - Contribuições para o crescimento do PIB de variáveis selecionadas. Cinzento claro: períodos em que o contributo para o crescimento do PIB foi entre 0,25-1,00%/ano. Cinzento médio : períodos em que o contributo para o crescimento do PIB foi entre 1,00-2,00%/ano. Cinzento escuro: : períodos em que o contributo para o crescimento do PIB foi >2,00%/ano [34].

O estudo elaborado por [34] alcançou três resultados relacionados com o papel da energia no crescimento económico. Em primeiro lugar – o papel da eficiência exergética no crescimento económico do Reino Unido. Corroborando assim os trabalhos de [7] que afirmavam que a os aumentos de eficiência exergética tiveram, têm e terão um papel preponderante no crescimento económico dos Estados Unidos da America.

Em segundo lugar, os serviços energéticos (que neste caso são tomados como sendo a a exergia útil total) teve um maior impacto no crescimento económico do que os preços da energia. E que são a variável energética que mais influencia o crescimento – quando comparada com as contribuições dos preços da energia e da energia final. Estes resultados confirmam as afirmações de [38][22][39] que defendiam que o estágio útil da energia se relacionava fortemente com o crescimento da economia. Contudo, [34], obtiveram uma relação entre energia final e crescimento económico inferior aquele obtido para a economia da Suécia [40]. Isto deve-se ao facto de o modelo MARCO-UK ter introduzido como variável a eficiência exergética final para útil, cuja influência no crescimento económico leva a uma redução do impacto da energia final e potencia o papel de outras variáveis, como o investimento e o trabalho humano.

Finalmente, os autores, separaram os aumentos da eficiência termodinâmica em dois factores. Progresso tecnológico e procura de serviços energéticos, demonstrados na figura 2.7. A linha azul mostra a simulação em que a procura de serviços de energia é mantida constante. Neste caso, a eficiência termodinâmica aumentou bastante (relativamente à linha constante de eficiência), sugerindo assim, a existência de um ganho natural que ocorre a cada ano. Os autores afirmam que estes resultados constituem a endogeneização do progresso tecnológico no modelo. Reiterando assim, o papel crucial da energia no aumento do progresso tecnológico que influencia, positivamente, o crescimento económico, como foi sugerido por [41] e [42]. Por outro lado, a linha preta mostra a evolução da eficiência exergética sob a simulação *basefit*. O aumento – em relação à linha azul – é fruto do aumento da procura de serviços energéticos.

Para além destes achados, os autores confirmaram o papel importante que o capital tem no crescimento económico e, através do seu modelo, o trabalho humano não se apresentou tão essencial como o capital e a energia. Estes resultados sugerem que o capital e a energia funcionam como complementos. Esta complementaridade entre energia e capital funciona como substituta do trabalho humano, afirmam os autores.

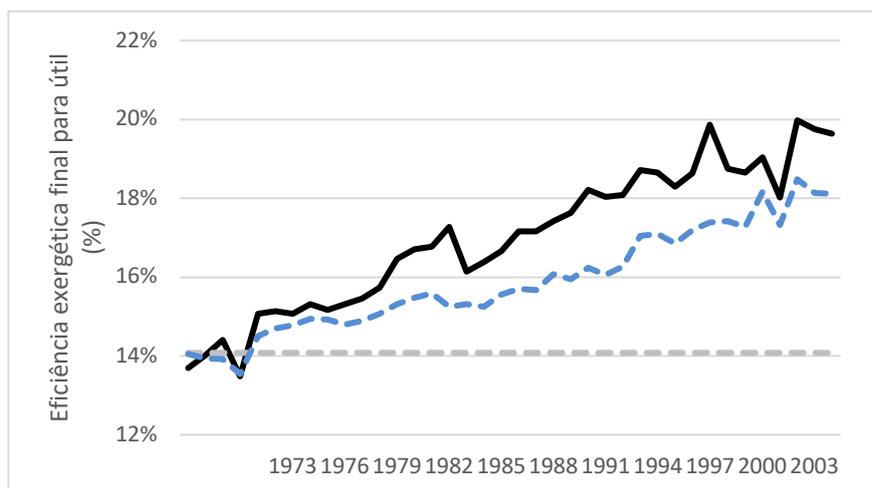


Figura 2.7 – Evolução da eficiência exergética dada pelo aumento de serviços energéticos (linha preta) e progresso tecnológico (linha azul) [34].

Em último lugar, [34] estimaram o efeito das simulações contrafactuais na produtividade do capital e do trabalho humano (figura 2.8). A produtividade do capital do Reino Unido manteve-se constante em todas as simulações à excepção daquela em que o capital é mantido constante, evidentemente. Esta estabilidade reforça o papel deste factor produtivo no crescimento da economia do Reino Unido. Em relação à produtividade do trabalho humano, este apresentou alguns desvios da simulação *basefit*. A fraca ligação entre o PIB e o trabalho humano suporta os resultados deste estudo mencionados anteriormente. O trabalho humano tem um papel muito inferior ao do capital no crescimento económico do Reino Unido.

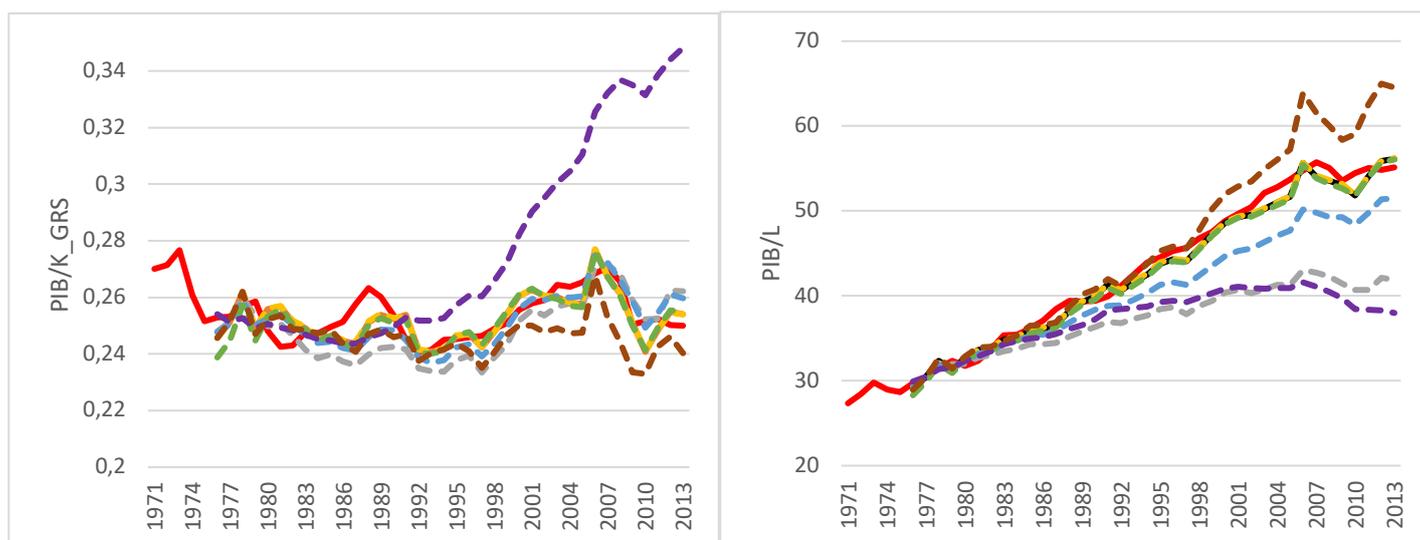


Figura 2.8 – Produtividade do capital e do trabalho humano para a economia do Reino Unido 1971-2013, submetida às simulações contrafactuais. A linha vermelha representa os valores históricos. A linha preta representa as soluções do modelo *basefit*. As linhas a a tracejado representam as simulações dos diferentes

cenários: linha cinzenta eficiência de conversão de exergia final em útil (EXEFF_FU) mantida constante; linha amarela utilização de energia final (FEN_T) mantida constante; linha roxa investimento (I) mantido constante; linha castanha trabalho humano (L) mantido constante; linha verde preços da energia (P_EN_C, P_EN_IND, P_EN_OTH) mantidos constantes; linha azul exergia útil total (UEX_TOT) mantida constante [34].

2.4 Objetivos da presente tese

Como foi demonstrado ao longo deste capítulo, os modelos tradicionais de análise do crescimento económico não consideram a energia como uma variável relevante nessa análise. Limitam-se a considerá-la como sendo mais um produto indireto do processo produtivo. Modelos mais recentes – associados à teoria de Economia Ecológica – assumem que a energia tem um papel preponderante no crescimento do produto de um país. Contudo, como foi reproduzido na secção 2.2.2, nem toda a energia desempenha um papel produtivo e útil na economia. Assim, recentemente tem havido autores a propor modelos macroeconómicos, considerando a energia como factor de produção – juntamente com o capital e o trabalho humano – em que a métrica utilizada para contabilizar a energia é a exergia útil. Dos trabalhos realizados neste âmbito, o mais completo e desenvolvido é o modelo MARCO-UK [34]. Este modelo teve como principais resultados e conclusões, evidências de que a eficiência de conversão de exergia final em útil é um motor essencial do crescimento económico, tendo sido responsável por cerca de 25% o crescimento do PIB do Reino Unido dos últimos 50 anos. Para além disso, referiram que esta eficiência tinha duas fontes distintas: 1) o progresso tecnológico e 2) o aumento da procura de serviços energéticos. Finalmente, o modelo MARCO-UK, chegou à conclusão de que, por um lado, o trabalho humano é um factor produtivo com pouca relevância no crescimento económico e, por outro, que a energia e o capital funcionam como complementos um do outro na grande influência que têm no desenvolvimento económico do Reino Unido. Todavia, este modelo – como qualquer outro – possui limitações. A presente tese tem como objectivo, com base no MARCO-UK, colmatar algumas dessas limitações. Nomeadamente, procura aplicar o modelo a outro país (Portugal), de modo a confirmar ou rejeitar as conclusões retiradas da aplicação do modelo ao Reino Unido. Para além disso, este trabalho pretende desenvolver os métodos estatísticos utilizados no modelo britânico.

3. Metodologia

Nesta secção são explicitados os métodos utilizados na análise feita nesta tese, com o objectivo de adaptar e implementar o modelo MARCO-UK [34] à realidade económica de Portugal. Uma vez implementado o modelo para Portugal (MARCO-PT), serão desenvolvidos e estudados cenários semelhantes aos desenvolvidos para o modelo MARCO-UK, e será feita uma comparação entre os resultados obtidos com ambos os modelos.

3.1 Recolha de dados para Portugal

O primeiro passo da análise conduzida nesta tese foi a identificação de cada uma das 75 variáveis incluídas na construção e implementação do modelo MARCO-UK, obtidas a partir de bases de dados internacionais tais como o UK Office for National Statistics, o Banco Mundial, Penn World Tables, e Nações Unidas. Estas variáveis dividem-se em variáveis macroeconómicas, agregadas ao nível do país (PIB, stock de capital, exportações/importações, etc.), variáveis macroeconómicas agregadas ao nível sectorial (despesa na indústria, sector residencial, etc.), preços (índice de preços ao consumidor, inflação, etc.), variáveis monetárias (taxa de câmbio, taxas de juros, etc.), variáveis energéticas (consumo, preços, eficiência, exergia etc.), e emissões poluentes (CO₂ per capita, territorial e na óptica do consumo). Uma lista exhaustiva de todas as variáveis incluídas no modelo MARCO-UK pode ser consultada em [34].

Uma vez identificadas as variáveis necessárias para a implementação do modelo MARCO-UK à realidade Portuguesa, foi feito um exercício de recolha dos dados necessários para concretizar essa implementação, através de um processo de consulta de bases de dados internacionais e específicas da economia Portuguesa, bem como de artigos individuais publicados, de modo a obter séries temporais equivalentes às utilizadas no modelo MARCO-UK. Esta recolha foi feita tendo como objectivo obter um conjunto de séries temporais para a economia Portuguesa que não só reflectisse ao máximo o conjunto de dados usados no modelo MARCO-UK, mas também que cobrisse um período o mais extenso possível, dada a disponibilidade dos dados, para este país.

3.2 Adaptação e implementação do modelo para Portugal

Conforme já foi referido na Secção 2.3, o modelo MARCO-UK [34] é constituído por 57 equações, das quais 30 correspondem a identidades, ou relações por definição entre variáveis. Estas identidades resultam de definições inseridas no sistema de contas nacionais, e por essa razão são válidas não só ao longo do tempo, mas também para todos os países. Dessa forma, estas identidades são aplicáveis quer para o Reino Unido quer para Portugal. Dois exemplos destas relações identitárias implementadas no modelo MARCO-UK são a definição do Produto Interno Bruto (PIB) na óptica da despesa, ou na óptica do rendimento, representadas abaixo, respectivamente:

$$Y = C + I + G + X - M \quad (3.1)$$

$$Y = W + YG + YF \quad .2)$$

Em ambas as equações, Y corresponde ao PIB, que na óptica da despesa - Equação 3.1 – define-se como a soma da despesa em consumo pelas habitações (C) e pelo governo (G), da despesa em investimento (I), e do balanço entre exportações (X) e importações (M). Já na óptica do rendimento – Equação 3.2 – o mesmo PIB define-se como a soma do rendimento dos trabalhadores, ou salários (W), do rendimento do governo, ou impostos menos subsídios (YG), e do rendimento de empresas e outros (YF). Ambas estas relações são válidas e produzem o mesmo resultado de PIB Y para qualquer momento da economia.

Uma vez que as relações identitárias descritas acima são obtidas das definições adoptadas pelo sistema de contas nacionais, e, portanto, válidas para qualquer país em qualquer momento no tempo, estas identidades são directamente adoptadas nesta tese para a adaptação e implementação do modelo para Portugal.

As restantes 27 equações que constituem o modelo MARCO-UK diferem das identidades descritas acima. Estas são baseadas em observações empíricas específicas da economia do Reino Unido, e capturam a estrutura dessa economia em particular. Estas equações “comportamentais” ou “estocásticas” (na restante tese irão ser apelidadas de equações econométricas) contêm parâmetros estimados por métodos econométricos rigorosos (e.g. métodos dos mínimos quadrados, cointegração), e relacionam variáveis chave do modelo, como o capital, os preços da energia, o trabalho humano, entre outras. Por exemplo o trabalho humano (L), no modelo MARCO-UK é função do PIB (Y), do capital dos serviços (K_SERV) e da exergia útil (UEX_TOT) – equação 3.3. O investimento (I), por sua vez, é dado como função do excedente das empresas (YF), da produtividade do capital (Y/K_NET), a produtividade do trabalho humano (Y/L) e a produtividade da exergia útil consumida (Y/UEX_TOT) – equação 3.4.

$$L_t = f(Y_t, K_SERV_t, UEX_TOT_t) \quad (3.3)$$

$$I_t = f(YF_t, Y_t/K_NET_t, Y_t/UEX_TOT_t, Y_t/L_t) \quad (3.4)$$

Uma lista detalhada de todas as equações – identitárias e estocásticas – implementadas no modelo MARCO-UK pode ser consultada em [34].

No processo de adaptação e implementação do modelo MARCO-UK à realidade Portuguesa, o passo mais importante será o teste da validade (ou não) das equações estocásticas inseridas no modelo MARCO-UK aos dados equivalentes recolhidos para a economia Portuguesa. Nesse exercício, é expectável que, para cada equação estocástica, um de três resultados seja obtido:

- Caso 1: a equação estocástica utilizada no modelo MARCO-UK adequa-se perfeitamente aos dados obtidos para Portugal, sem necessidade de alterações ou correções para reflectir idiosincrasias da economia Portuguesa;

- Caso 2: a equação estocástica utilizada no modelo MARCO-UK captura de uma forma geral a relação entre as variáveis equivalentes para Portugal, mas necessita de alterações ou correções pontuais de forma a reflectir mais precisamente a economia Portuguesa;
- Caso 3: a equação estocástica utilizada no modelo MARCO-UK não se adequa de todo à realidade Portuguesa;

Cada um dos casos listados acima tem consequências para a forma como a adaptação e implementação do modelo MARCO-UK para Portugal é conduzida. No Caso 1, as equações estocásticas do modelo MARCO-UK são utilizadas na implementação do modelo para Portugal (introduzindo os dados da economia de Portugal), recorrendo apenas à sua forma, i.e., utilizando todos os termos da equação do modelo MARCO-UK, exceptuando os seus coeficientes, que são re-estimados. No Caso 2, a fórmula geral da equação estocástica do modelo MARCO-UK é utilizada, apenas com eventuais alterações/correções que podem passar pela inclusão ou remoção de alguns termos de desfasamento, ou inclusão de coeficientes específicos a determinado(s) ano(s), de modo a capturar comportamentos específicos da economia Portuguesa. Finalmente, no Caso 3, uma equação estocástica é estimada, econometricamente, de raiz, procurando relacionar as mesmas variáveis, para Portugal, presentes na equação econométrica equivalente inserida no modelo MARCO-UK.

A figura 3.1 ilustra o processo de desenvolvimento das equações econométricas que irão formular o modelo MARCO-UK, partindo sempre das equações já presentes no modelo para o Reino Unido.

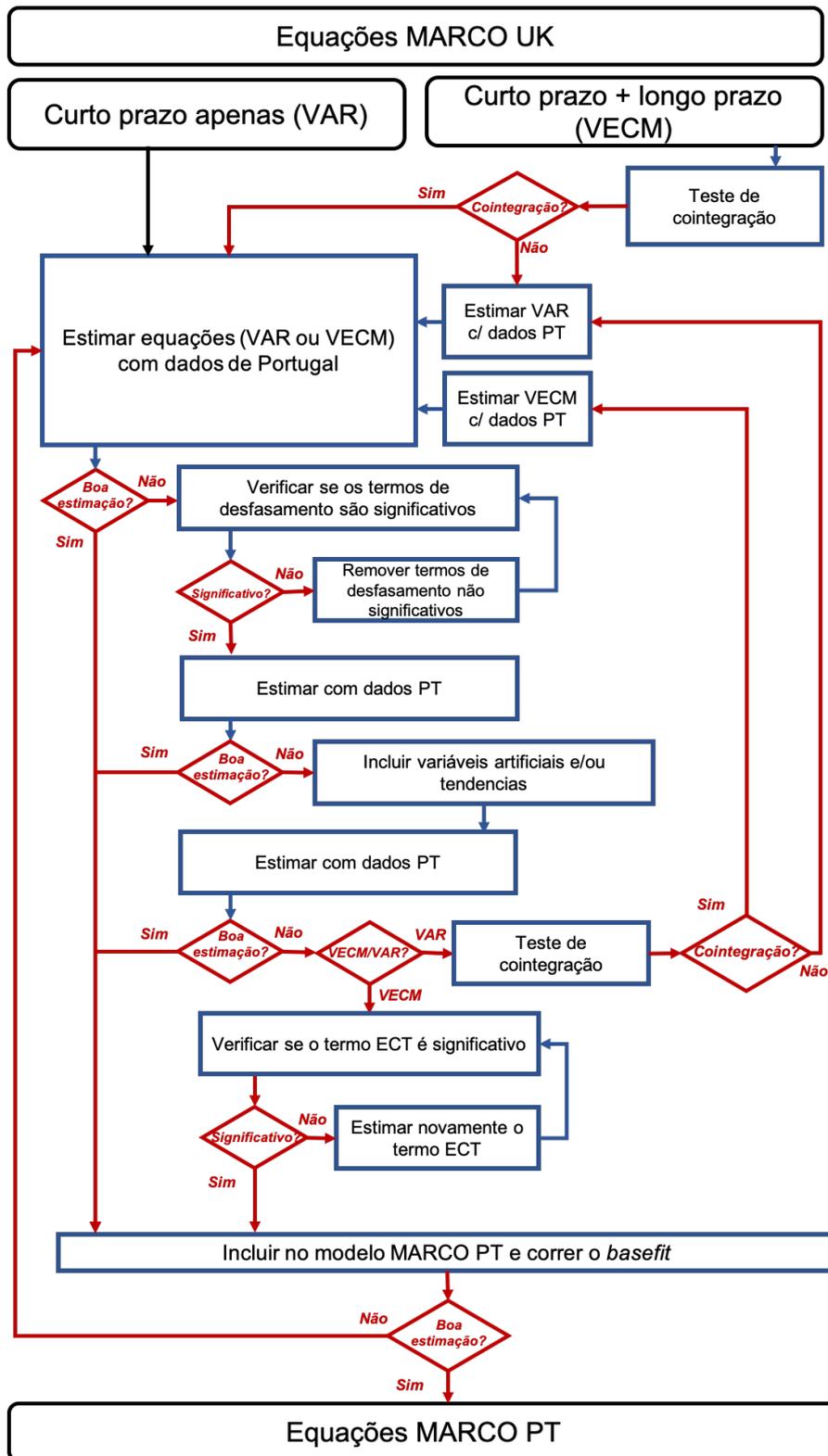


Figura 3.1 – Fluxograma que ilustra o processo de estimação das equações econométricas a serem incluídas no modelo MARCO-PT a partir das equações econométricas do modelo MARCO-UK.

O ponto de partida são sempre as equações econométricas do modelo MARCO-UK [34]. Estas podem ser divididas em dois tipos, equações que incluem apenas termos ou dinâmicas de curto prazo

(modelos VAR¹¹) e equações que incluem tanto termos de curto prazo bem como termos de longo prazo (modelos VECM¹²). No caso dos VECM, são feitos testes de cointegração, de modo a constatar se as variáveis que apresentavam relações de cointegração para a economia britânica também apresentam essas mesmas relações ao utilizar as séries temporais portuguesas. Se, de facto, as relações de cointegração se confirmarem presentes para as variáveis portuguesas – num determinado VECM do Reino Unido – este é utilizado directamente recorrendo a dados portugueses. Contudo, se não existir relação de cointegração entre um grupo de variáveis - onde existia cointegração para a economia do Reino Unido - o VECM correspondente é estimado novamente como VAR e utilizando dados para Portugal.

Os modelos VAR que possuem apenas termos de curto prazo são utilizados directamente para as estimações utilizando os dados da economia portuguesa. A razão que leva a que estes modelos não sofram qualquer tipo de alteração prende-se com o facto de a presente tese ter como objetivo adaptar o modelo MARCO-UK à economia portuguesa, sem alterar, de forma muito substancial, a estrutura do modelo inglês. Para que, no futuro, exista um ponto de partida consolidado para que o trabalho iniciado no modelo MARCO-UK possa ser cada vez mais desenvolvido e aperfeiçoado. Esse aperfeiçoamento pode ser conseguido através de testes de cointegração aplicados também a estas relações do modelo MARCO-UK, com dados para Portugal, de modo a avaliar se, ao contrário do que se verifica para o Reino Unido, existe para a economia Portuguesa uma relação significativa a longo-prazo, entre as variáveis em questão.

Quando é mencionado que as equações do modelo MARCO-UK são utilizadas directamente recorrendo aos dados portugueses, isto significa que as equações para Portugal são estimadas incluindo as mesmas variáveis, termos de correcção, desfasamentos, termos *dummy* e tendências lineares que se encontram na equação correspondente do modelo MARCO-UK. Mas os coeficientes estimados para a economia inglesa – que multiplicam por cada termo mencionando anteriormente – não serão, contudo, os mesmos. Cada coeficiente de cada termo é estimado novamente ao utilizar as equações para Portugal.

Adiante serão explicitados os métodos estatísticos e os passos representados na figura 3.1. A secção 3.2.1 explica detalhadamente os testes de raízes unitárias e os testes de cointegração. A secção 3.2.2 esclarece os passos dados no processo iterativo de estimação das equações do modelo MARCO-PT.

3.2.1 Testes de raízes unitárias e de cointegração

De modo a testar a existência de relações de cointegração entre séries temporais de variáveis incluídas em uma equação econométrica é necessário, inicialmente, testar a sua ordem de integração. Este teste

¹¹ Vectores autoregressivos

¹² *Vector error correction model*

é necessário pois o procedimento de Johansen (teste de cointegração) requer que todas as variáveis envolvidas tenham a mesma ordem de integração [43].

Cada uma das séries temporais – que estejam presentes em pelo menos uma equação econométrica – são testadas segundo a sua estacionaridade. Estes testes são baseados na presença, ou não, de raízes unitárias nas séries temporais, tanto em níveis, como em primeiras diferenças. A maioria das séries são testadas em logaritmos naturais (à exceção das séries que possuam valores negativos, em níveis, as quais são utilizadas directamente). Serão utilizados dois tipos de testes de raízes unitárias: o teste Dickey-Fuller aumentado (ADF) [44] e o teste *Phillips-Perron* [45]. Ambos os testes avaliam a hipótese nula de que determinada série temporal possui uma raiz unitária contra a hipótese de esta ser estacionária. Se uma série temporal tiver uma raiz unitária em níveis, mas não em primeiras diferenças (estacionária em primeiras diferenças), significa que esta série tem ordem de integração um, $I(1)$.

O teste ADF é, como o nome indica, uma extensão do teste *Dickey-Fuller*, pois permite testar séries de maiores dimensões:

$$\Delta y_t = \alpha + \beta t + \gamma y_{t-1} + \delta_1 \Delta y_{t-1} + \dots + \delta_{p-1} \Delta y_{t-p+1} + \epsilon_t \quad (3.5)$$

y_t representa a série temporal em estudo, α é uma constante, β é um coeficiente numa tendência temporal t e p é a ordem de defasamento do processo autorregressivo. Esta ordem de defasamento é escolhida antes de se iniciar o teste propriamente dito, examinando critérios relevantes para essa escolha. Assim, o teste de raízes unitárias pode ser iniciado, testando a hipótese nula $\gamma = 0$ contra a hipótese $\gamma < 0$. Escolhe-se um valor para a estatística de teste:

$$DF_t = \hat{\gamma} / SE(\hat{\gamma}) \quad (3.6)$$

Este valor é comparado com um valor crítico, tabelado. Se a estatística de teste for menor¹³ que o valor crítico, a hipótese nula é rejeitada, não sendo, portanto, detectada uma raiz unitária na série estudada.

Por outro lado, o teste PP parte da hipótese nula ($\delta = 0$) do teste *Dickey-Fuller* num modelo:

$$\Delta y_t = \delta y_{t-1} + v_t \quad (3.7)$$

O teste PP, à semelhança do teste ADF, aborda a questão de que o processo de geração de dados para y_t pode ter um valor de correlação superior ao que é admitido pela equação. Contudo, enquanto que o teste ADF incorpora defasamentos de Δy_t como regressores na equação de teste, o teste PP faz uma correcção não paramétrica à estatística de teste t .

A hipótese nula – de que a série é não estacionária – é rejeitada quando a estatística do teste ADF ou PP é menor que o valor crítico tabelado (a 10%, 5%, ou 1% de nível de significância), o que

¹³ A regressão não inclui valores defasados em primeiras diferenças. Em vez disso, o teste PP fixa a estatística- t usando uma estimativa da variância de longo prazo que é implementada recorrendo a um simulador de covariância denominado Newey-West.

significa que a série tem uma raiz unitária. Para os testes ADF, o número final de defasamentos a serem incluídos foi escolhido de acordo com o valor sugerido pelo critério de informação de Schwarz (*Schwarz Information Criteria* - SIC).

Depois dos testes de raízes unitárias, as variáveis presentes nas equações econométricas, tal como estão definidas no modelo MARCO-UK, são submetidas a testes de cointegração segundo o método de Johansen. As duas estatísticas de teste que formam este método (*Trace* e *Max Eigenvalue*) testam, em primeiro lugar, a hipótese nula de que não existem relações de cointegração entre as n variáveis em teste. Se a hipótese nula for rejeitada, este procedimento testará a hipótese nula de que existe, no máximo, uma relação de cointegração entre as n variáveis. E, assim sucessivamente até $n-1$ relações de cointegração entre as n variáveis. Se houver indícios de que existe cointegração entre as variáveis – não estacionárias – significa que existe uma combinação linear entre essas variáveis que é estacionária. Esta linearidade forma uma relação estatisticamente significativa de longo prazo entre as variáveis.

Matematicamente, qualquer vector $(n \times 1)$ \mathbf{Y}_t de uma série temporal singular pode ser representado por um modelo de vector autorregressivo (VAR) da forma:

$$\mathbf{Y}_t = \mathbf{c} + \sum_{j=1}^p \Gamma_j \mathbf{Y}_{t-j} + \boldsymbol{\epsilon}_t \quad (3.8)$$

Onde \mathbf{c} é um vector de constantes, Γ_j representa matrizes de coeficientes de curto prazo e $\boldsymbol{\epsilon}_t$ é um vector de erros aleatórios.

Se cada uma das n séries temporais num vector $(n \times 1)$ \mathbf{Y}_t forem todas integradas de ordem 1 – $I(1)$ – o VAR da equação 3.5 é não estacionária. Se, além disso, não existirem indícios de cointegração entre as séries temporais desse vector, não será possível inferir estatisticamente utilizando os testes e *p-values* habituais, pois as estatísticas não terão distribuições tabuladas habituais. Nesse caso, é apropriado colocar a série em primeiras diferenças no vector \mathbf{Y}_t e estimar, também em primeiras diferenças, o modelo VAR do seguinte modo:

$$\Delta \mathbf{Y}_t = \mathbf{c} + \sum_{j=1}^p \Gamma_j \Delta \mathbf{Y}_{t-j} + \boldsymbol{\epsilon}_t \quad (3.9)$$

Quando há indicações de que existe cointegração entre as séries temporais, há pelo menos uma combinação linear de \mathbf{Y}_t (vector de cointegração) que é estacionária. Nesse caso, a equação 3.9 pode ser reescrita como um VECM:

$$\Delta \mathbf{Y}_t = \mathbf{c} + \sum_{j=1}^p \Gamma_j \Delta \mathbf{Y}_{t-j} + \Pi \mathbf{Y}_{t-1} + \boldsymbol{\epsilon}_t \quad (3.10)$$

Em que Π é uma matriz de rank (ou classificação) r , podendo ser decomposta em:

$$\Pi = \alpha \beta' \quad (3.11)$$

Em que α é uma matriz $(n \times r)$ e β uma matriz de vectores de cointegração $(n \times r)$. O número de vectores de cointegração (VC) na equação 3.11, dado por r , é testado segundo o procedimento de Johansen [43]. Se esta análise não produzir indícios de vectores de cointegração de entre as séries temporais, a análise avança colocando um VAR em primeiras diferenças – tal como na equação 3.9.

Se, contudo, continuar a não existir provas de que haja um ou mais vectores de cointegração entre as séries, estas são estimadas considerando um VECM, como na equação 3.10.

Para todos os modelos o número máximo de desfasamentos admitidos é de 10 e é escolhido tendo por base o que a maioria dos critérios disponíveis indicam (rácio de probabilidade, *Final Prediction Error*, Akaike, Schwarz, and Hannan-Quinn). Para verificar se o modelo obtido está bem definido, mais testes são feitos, desta vez, à correlação dos resíduos das séries, aplicando um teste de autocorrelação de multiplicadores de Lagrange. Caso necessário, problemas de autocorrelação são resolvidos aumentando a ordem de desfasamento p .

Como já foi referido, o procedimento de teste de cointegração de Johansen contém dois testes distintos, o teste *trace* e o teste *max eigenvalue*. Ambos testam a hipótese nula de cointegração entre séries de dados contra a hipótese contrária. Os testes são baseados em *eigenvalues* ou valores próprios de transformação dos dados (λ) e representam combinações lineares dos dados que têm a máxima correlação (correlação canónica). Os testes apenas diferem nos termos das suas hipóteses alternativas.

O teste *trace* verifica se a característica da matriz Π (equação 3.12) é igual a zero. A hipótese nula é tal que $car(\Pi) = r_0$. A hipótese alternativa é $r_0 < car(\Pi) \leq n - 1$ em que $n - 1$ é o número máximo de vectores cointegrantes possível. Os testes seguintes têm como hipótese nula $car(\Pi) = r_0 + 1$ e como hipótese alternativa $r_0 + 1 < car(\Pi) \leq n - 1$. Sendo este teste um teste de rácio de verosimilhança:

$$LR(r_0, n - 1) = -T \sum_{i=r_0+1}^{n-1} (1 - \lambda_i) \quad (3.12)$$

Onde $LR(r_0, n - 1)$ corresponde às estatísticas do rácio de probabilidade para testar $car(\Pi) = r$ contra a alternativa $car(\Pi) \leq n - 1$.

O teste de *eigenvalue* máximo inicia-se testando se a característica da matriz é zero contra a alternativa que corresponde a uma característica igual a 1. De seguida, testa-se a hipótese nula $car(\Pi) = 1, 2, \dots$ contra a hipótese alternativa $car(\Pi) = 2, 3, \dots$. Este teste é também um teste de rácio de probabilidade:

$$LR(r_0, r_0 + 1) = -T \ln(1 - \lambda_{r_0+1}) \quad (3.13)$$

Em que $LR(r_0, r_0 + 1)$ corresponde às estatísticas do teste para verificar se $car(\Pi) = r_0$ contra a hipótese alternativa $car(\Pi) = r_0 + 1$. Esta estatística de teste não tem a habitual distribuição assintótica de qui-quadrado.

Se as n séries temporais – incluídas num modelo VAR – forem cointegradas (com relações de cointegração presentes), o seu VECM correspondente escreve-se do seguinte modo:

$$\Delta \mathbf{Y}_t = \mathbf{c} + \sum_{j=1}^p \Gamma_j \Delta \mathbf{Y}_{t-j} + \alpha (\beta \mathbf{Y}_{t-1} + \boldsymbol{\mu}) + \boldsymbol{\epsilon}_t \quad (3.14)$$

O termo entre parêntesis corresponde ao termo de correcção de erros (TCE), que representa a dinâmica de longo prazo entre as séries temporais. μ é uma constante que consiste num vector de coeficientes. Permitir uma tendência linear determinística nos dados leva a que os testes de cointegração possam ser feitos de um de dois modos. Podem ser feitos assumindo apenas uma constante no TCE (equação 3.14) ou podem ser feitos com uma constante e uma tendência linear no TCE. Cada um destes modos corresponde, respectivamente, aos casos 3 e 4 em [46].

Considerando como exemplo a equação 3.3, a cointegração é testada entre as variáveis correspondentes dessa equação. O trabalho humano (L), o PIB (Y), o capital dos serviços (K_{SERV}), e a exergia útil (UEX_{TOT}). Se estas séries temporais possuírem relações de cointegração entre elas, então, um modelo VECM é utilizado como na equação 3.12. Se, por outro lado, não existirem indícios de cointegração, será um modelo VAR a ser empregue, como na equação 3.7. No caso primeiro, as séries temporais indicam tanto dinâmicas de longo prazo (TCE) como de curto prazo (termos desfasados). No segundo caso, existem apenas relações de curto prazo.

3.2.2 Estimação dos parâmetros das equações econométricas do modelo MARCO-PT

As equações estocásticas (VECM e VAR) do modelo MARCO-UK são testadas substituindo as séries temporais correspondentes à economia britânica pelos dados obtidos para Portugal. Inicialmente, projectam-se as séries temporais portuguesas utilizando a funcionalidade de cada uma das equações desenvolvidas para o modelo MARCO-UK (a forma da equação, sem os coeficientes originais). Evidentemente, este passo inicial não se aplica no caso dos modelos VECM do MARCO-UK que não possam ser validados através de testes de cointegração para a economia portuguesa. Nesse caso concreto, em vez de se utilizar o VECM do Reino Unido para estimar os dados portugueses, utiliza-se um modelo VAR especificamente estimado para a economia de Portugal.

Como já foi mencionado na secção 3.2, existem três desfechos possíveis ao projectar os dados de Portugal recorrendo às equações do modelo MARCO original.

Se uma equação estocástica para o Reino Unido for capaz de estimar a variável dependente correspondente para a economia de Portugal (entre 1960-2014), então, essa mesma equação é incluída directamente no novo modelo MARCO-PT. Este caso corresponde ao primeiro caso descrito na secção 3.2.

Se, no entanto, uma equação do modelo MARCO-UK ao estimar a variável dependente correspondente para a economia portuguesa, apresentar diferenças significativas dos valores reais dessa variável dependente, então a equação entrará num processo iterativo de correcção.

Primeiramente, a significância de todos os desfasamentos presentes na equação é verificada, i.e., se a sua presença na equação – agora a estimar dados portugueses – é relevante para o efeito para que foi desenvolvida. Isto é feito observando o p -value de cada um dos componentes de

desfasamento da equação. Os desfasamentos que sejam confirmados como não significativos são removidos e a equação é estimada novamente, sem estes termos. Se após esta verificação e consequente re-estimação, os desfasamentos forem todos significativos, a equação é utilizada para estimar a variável dependente novamente. Se depois deste processo, a projecção da variável dependente continuar aquém dos valores reais, segue-se para uma próxima etapa do processo de correcção. Nesta etapa são acrescentadas *dummy variables* (variáveis artificiais) e/ou tendências lineares de modo a modelar correctamente alterações abruptas dos valores reais que não sejam captadas, nem pelos desfasamentos, nem pelo TCE. O acrescento destas variáveis artificiais ou de tendências lineares é feita comparando os valores reais da variável dependente – da equação em estudo – com os valores obtidos através da estimação feita pela equação. Ao serem acrescentados estes novos termos, é também verificada a sua significância, analisando os seus *p-values* correspondentes. Seguida esta etapa, a equação é mais uma vez estimada e projectam-se os novos resultados. Se, nesta fase, a equação conseguir projectar correctamente a variável dependente, ao longo de todo o período, a equação é incluída no modelo português sem mais alterações. Este processo corresponde ao segundo caso mencionado.

Finalmente, se depois de se verificar e corrigir todos os termos – desfasamentos, variáveis artificiais e tendências lineares – a equação continuar a não estimar satisfatoriamente a variável dependente, constata-se o terceiro caso. A equação tem de ser modificada de forma mais profunda, nomeadamente no termo das dinâmicas de longo prazo.

Neste terceiro caso, existem dois modos de proceder. Caso seja uma equação VECM, verifica-se se o TCE é significativo. Se não o for, este termo é re-estimado individualmente recorrendo ao método dos mínimos quadrados e inserido novamente na equação VECM. A equação é então estimada novamente e verifica-se se a sua projecção da variável dependente é satisfatória. No caso de a equação em causa ser do tipo VAR, mais testes são requeridos, para além dos efectuados para a equação VECM. É necessário testar se existem relações de cointegração entre a variável dependente e as variáveis independentes, de modo a inferir-se – para a economia portuguesa – se esta equação deveria ser do tipo VECM e não VAR. Para isso, são feitos os testes descritos na secção 3.2.1 com dois resultados possíveis. Se não existirem relações de cointegração entre as variáveis, a equação continua a ser utilizada como VAR e passa pelo processo de correcção iterativo novamente. Caso contrário, estima-se um VECM para as séries temporais de Portugal como está ilustrado na figura 3.1.

3.3 Modelo Basefit e sua validação

Depois de todas as equações econométricas passarem pelo método iterativo ilustrado na figura 1 e forem capazes de estimar correctamente as variáveis da economia portuguesa são introduzidas no novo modelo MARCO-PT, juntamente com as equações identitárias.

Em seguida, o modelo é resolvido – de um modo dinâmico – seguindo o método iterativo de Gauss-Seidel [37]. Numa simulação estocástica, as equações do modelo são resolvidas de modo a que os seus resíduos correspondam a erros aleatórios e, opcionalmente, que os coeficientes e variáveis exógenas do modelo variem também de forma aleatória. Nestas simulações, a resolução do modelo gera uma distribuição de resultados para as variáveis endógenas em cada período. A distribuição é aproximada resolvendo o modelo repetidamente, muitas vezes, recorrendo a amostras diferentes para as componentes aleatórias do modelo, e calculando então as estatísticas tendo em conta todos os resultados obtidos.

Com uma solução dinâmica, a projecção feita apenas utiliza variáveis endógenas anteriores à amostra da solução. Os desfasamentos são, assim, calculados recorrendo às soluções dos períodos anteriores a não a valores históricos. Este modo dinâmico de correr o modelo é o modo mais correcto de fazer projecções de longos períodos.

O método de Gauss-Seidel resolve cada uma das equações em ordem à variável endógena dependente correspondente, tratando todas as outras variáveis endógenas como fixas. De maneira a ser mais compreensível o funcionamento deste processo matemático tomemos o seguinte exemplo:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_N, z) \\
 x_2 &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_N, z) \\
 &\vdots \\
 x_N &= f_N(x_1, x_2, \dots, x_N, z)
 \end{aligned}
 \tag{3.15}$$

Em que x são as variáveis endógenas e z as exógenas. A questão, neste caso, é descobrir um ponto fixo tal que $x = f(x, z)$. Depois, o método emprega um procedimento iterativo como está na equação 3.16.

$$x^{(i+1)} = f(x^{(i)}, z) \tag{3.16}$$

Em cada iteração a equação é resolvida – através do software *Eviews* – pela ordem pela aparecem no modelo. Caso uma variável endógena já tenha sido resolvida numa equação anterior, o seu valor utilizado é aquele que já foi resolvido anteriormente. Como no seguinte exemplo:

$$x_k^{(i)} = f_k(x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \dots, x_{k-1}^{(i)}, x_k^{(i-1)}, x_{k+1}^{(i-1)}, \dots, x_N^{(i-1)}, z) \tag{3.17}$$

Como já foi referido, este modelo é resolvido de um modo dinâmico - recorrendo ao método de Gauss-Seidel - depois de se introduzirem todas as equações econométricas no modelo, para verificar se a solução *basefit* estima adequadamente os valores históricos de cada uma das variáveis endógenas. Caso o modelo *basefit* não esteja a estimar correctamente os dados da economia portuguesa, será preciso avaliar novamente cada uma das equações econométricas que compõem o

modelo segundo o processo ilustrado na figura 3.1 e explicado anteriormente. Tudo isto é repetido até se obter um modelo *basefit* adequado.

3.4 Simulações contrafactuais (*ex-post*)

Quando o modelo MARCO-PT estiver validado, ao ter um modelo *basefit* que adequadamente estima os dados da economia portuguesa, este fará simulações contrafactuais – tal como no modelo MARCO-UK [34]. Estas simulações têm como objectivo principal demonstrar, de um modo elucidativo, qual o papel da eficiência exergética (final para útil) no crescimento económico de Portugal.

As simulações contrafactuais permitem entender o impacto de determinadas variáveis na economia portuguesa, ao fixá-las, i.e., ao manter o seu valor inicial (1960) constante. Como é mencionado em [34], este modo de isolar variáveis é vantajoso em relação a outros métodos (como é o caso de modelos *Computable General Equilibrium (CGE)*). Para além de se fixar a eficiência exergética, serão feitas seis simulações contrafactuais, tal como no modelo MARCO-UK, para que seja facilitada uma comparação entre o MARCO-PT e o MARCO-UK. O resultado destas simulações servirá para entender quanto é que a economia portuguesa poderia crescer comparativamente com o crescimento demonstrado no modelo *basefit*. As seis simulações irão fixar as seguintes variáveis:

1. Eficiência termodinâmica de exergia final para útil (*EXEFF_FU*);
2. Consumo de energia final total (soma do consumo das famílias *FEN_C*, indústria *FEN_IND*, e outros *FEN_OTH*);
3. Investimento (*I*);
4. Trabalho humano (em número de trabalhadores *L*);
5. Preços da energia (pagos pelas famílias *P_EN_C*, indústria *P_EN_IND*, e outros *P_EN_OTH*);
6. Exergia útil total (*UEX_TOT*);

Os resultados obtidos desta metodologia serão apresentados e discutidos no capítulo seguinte.

4. Resultados e discussão

Nesta secção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos ao longo do trabalho realizado. Foi elaborado um sistema macroeconómico para Portugal à semelhança do modelo MARCO-UK [34].

4.1 Recolha de dados para Portugal

Como foi mencionado no capítulo anterior, foram obtidas – de diversas fontes – 66 séries temporais, entre os anos de 1960 a 2014, para serem utilizadas no modelo elaborado para Portugal, correspondendo a cada uma das variáveis deste. Uma lista com todas as variáveis utilizadas, bem como as suas unidades, fontes e descrição, pode ser consultada no Anexo [Informação suplementar – modelo MARCO-PT]. Estas variáveis são de diferentes categorias, podendo ser divididas em 5 grupos: Variáveis macroeconómicas, preços de energia, variáveis de consumo energético, variáveis sociais e outras. As variáveis de cariz macroeconómico – como o PIB (Y), as exportações (X), o investimento privado (I), entre outras - foram obtidas da base de dados da comissão europeia AMECO (Annual macro-economic database of the European Commission) [47], Penn World Tables (PWT9.0) [48], Eurostat [49], e da base de dados do Banco Mundial [50]. Os preços da energia dos diferentes sectores definidos no modelo (Habitações, Indústria e Outros) foram recolhidos da DGE (Direção-geral de energia e geologia) [51]. As variáveis correspondentes a grandezas exergéticas foram retiradas da literatura, pois não estão presentes em bases de dados. Estes valores são resultado de estudos elaborados por Serrenho et al. [28]. Nesse estudo, os autores seguiram 4 passos fundamentais para obterem dados exergéticos referentes a Portugal. Primeiramente converteram os dados existentes de energia final para exergia. De seguida alocaram o consumo de exergia final de cada sector em categorias de trabalho útil. Em terceiro lugar, estimaram as eficiências exergéticas de todas as transformações final para útil. Em último lugar, calcularam um valor total de trabalho útil somando o trabalho útil de cada categoria. Para realizar estes cálculos Serrenho et al. obtiveram os seus dados de diferentes fontes, como a Direção Geral dos Serviços Elétricos [51], a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura [52] e da Agência Internacional de Energia [53]. Recorrendo também aos estudos feitos por Henriques [54]. Existe um grupo de variáveis que foram obtidas individualmente de fontes distintas como a *Global Carbon Atlas* [55] e do trabalho de da Silva e Lains [56]. Estas variáveis foram, respectivamente, as emissões de CO₂ territoriais *per capita* e os capitais de serviços. Finalmente, o modelo necessitou de variáveis que advêm das mencionadas anteriormente, isto é, são calculadas a partir dos dados recolhidos.

As variáveis presentes nesta tese tentaram corresponder às variáveis presentes no modelo MARCO-UK. Contudo, nem todas as variáveis presentes no modelo inglês foram possíveis de obter para a economia portuguesa. Nomeadamente, o património líquido (*net wealth*) e a oferta de moeda (*Money supply*) e as emissões de CO₂ baseadas no consumo (*consumption-based CO₂ emissions*). Assim, estas variáveis não constam do modelo MARCO para Portugal, o qual é adaptado nesta tese tendo em conta estas limitações.

4.2 Adaptação e implementação do modelo para Portugal

De encontro com o que foi referido na metodologia, é possível dividir as 53 equações presentes no modelo português em dois tipos: equações identitárias e equações econométricas. As primeiras mantiveram-se as mesmas do modelo MARCO-UK, pois, tendo por base o sistema de contas nacionais, estas são válidas independentemente do país e do momento histórico em que são utilizadas. As segundas – equações econométricas – podem ser discriminadas em duas categorias: 1) equações que tiveram por base as homólogas britânicas; 2) equações estimadas de raiz para o modelo português, recorrendo a uma série de processos econométricos – indicados e explicados na metodologia na secção 3.2.

4.2.1 Testes de raízes unitárias e de cointegração

Antes de obter as equações propriamente ditas, foi necessário testar se as séries temporais correspondentes aos dados recolhidos eram integradas de 1ª ordem¹⁴. Para isso foram realizados testes de raízes unitárias a todas as variáveis (em logaritmos naturais). Com o auxílio desses testes constatou-se, de facto, que a grande maioria das séries temporais tinham ordem de integração 1 (I(1)). Assumiu-se que as variáveis que não se mostraram I(1), como é caso das variáveis referentes ao capital (K_GRS, K_NET, K_SERV) e o deflator de preços da energia (CPI_E), o eram e que a falha em obter esse resultado deveu-se a limitações dos testes realizados. Isto pode dever-se ao baixo poder, de ambos os testes, nos casos em que a hipótese alternativa e a hipótese nula estão próximas, i.e., estes testes têm dificuldade em distinguir entre processos estacionários persistentes e processos não-estacionários. O poder dos testes também diminui à medida que se incluem termos deterministas nas regressões de teste. Por exemplo, testes que incluem um termo constante e uma tendência linear na regressão de teste são menos poderosos do que se não incluírem nenhum destes termos. Em suma, não coloca nenhum constrangimento assumir que todas as séries temporais presentes no modelo são não estacionárias em primeiras diferenças, isto é, possuem ordem de integração igual a 1. Todos os resultados para os testes de raízes unitárias podem ser consultados na informação suplementar [Informação Suplementar – secção B1].

Quanto aos testes de cointegração efectuados – cujos resultados detalhados podem também ser consultados na informação suplementar [Informação Suplementar – secção B2] – constatou-se que para todas as equações econométricas existe, pelo menos, uma relação de cointegração que relaciona

¹⁴ Se uma série temporal for não estacionária em níveis (i.e. tem uma raiz unitária em níveis) e for estacionária em primeiras diferenças (i.e. não tem nenhuma raiz unitária em primeiras diferenças) diz-se que é integrada de primeira ordem. Séries temporais que possuam a mesma ordem de integração permite que seja possível serem efectuados testes de cointegração, segundo a metodologia de Johansen [ref].

as variáveis de cada equação no longo prazo. Isto significa que existe, para cada conjunto de variáveis testado, uma relação linear a longo prazo estacionária e estatisticamente significativa. Em alguns casos foi possível identificar duas relações de cointegração. Contudo, neste trabalho apenas se considera – no máximo – uma relação de cointegração entre cada grupo de variáveis que constituem uma equação econométrica do modelo, de modo a que a estrutura do novo modelo MARCO-PT seja o mais semelhante possível ao modelo MARCO-UK. Assim, para futuros desenvolvimentos do modelo MARCO, a contemplação de mais do que uma ordem de cointegração pode dar azo a novos e proveitosos avanços deste modelo.

De um modo geral, os testes de raízes unitárias e de cointegração efectuados ao modelo MARCO-PT sugerem que tanto a forma como as relações entre variáveis escolhidas para o modelo MARCO-UK são válidas para o novo modelo para a economia portuguesa.

4.2.2 Estimação dos parâmetros das equações econométricas do modelo MARCO-PT

Ao utilizar as equações presentes no modelo MARCO-UK para estimar as variáveis portuguesas – utilizando a função e os coeficientes, substituindo apenas as variáveis – 3 casos distintos surgiram como foi mencionado na secção 3.2.2. De seguida é apresentado um exemplo para cada um desses casos.

Caso 1: As equações do modelo MARCO-UK adequam-se à realidade portuguesa

No modelo MARCO-UK os salários (W) são definidos como função do excedente bruto das exploração (YF), os salários médios por hora (W_HOUR), o deflator de preços (CPI) e o trabalho humano ajustado qualitativamente (HL) – equação 4.1

$$W_t = f(YF_t, W_HOUR_t, CPI_t, HL_t) \quad (4.1)$$

A forma da equação dos salários, no modelo MARCO-UK, é ajustada com o auxílio de um termo constante, variáveis artificiais para anos específicos (1975 e 1979) e para conjuntos de anos (1998-2001 e 2008-2009). Contudo, no modelo inglês esta equação não tem um termo de correção de erros (TCE).

Para a realidade portuguesa, esta equação foi capaz de estimar a variável dependente W sem grandes desvios dos seus valores históricos dos anos 1960-2014. Evidentemente, os termos acrescentados à equação britânica são respostas a imposições específicas da economia inglesa e, por isso, para Portugal os mesmos não são necessariamente relevantes. Porém a sua presença na equação para Portugal não afecta negativamente as suas projecções. É preciso ter em conta que

alguns momentos específicos, que afectaram o Reino Unido, também se fizeram sentir na economia portuguesa, como é o caso da crise do petróleo (1975-1979), a introdução da moeda única (1998-2001) e a crise económica de 2008. Os valores dos *p-values* desta equação e todas as equações presentes no modelo MARCO-PT podem ser consultados no anexo D. A figura 2 ilustra a projecção da variável *W* pela equação 4.1, comparativamente com os seus valores históricos e a tabela 4.1 tem os coeficientes obtidos ao ajustar a mesma.

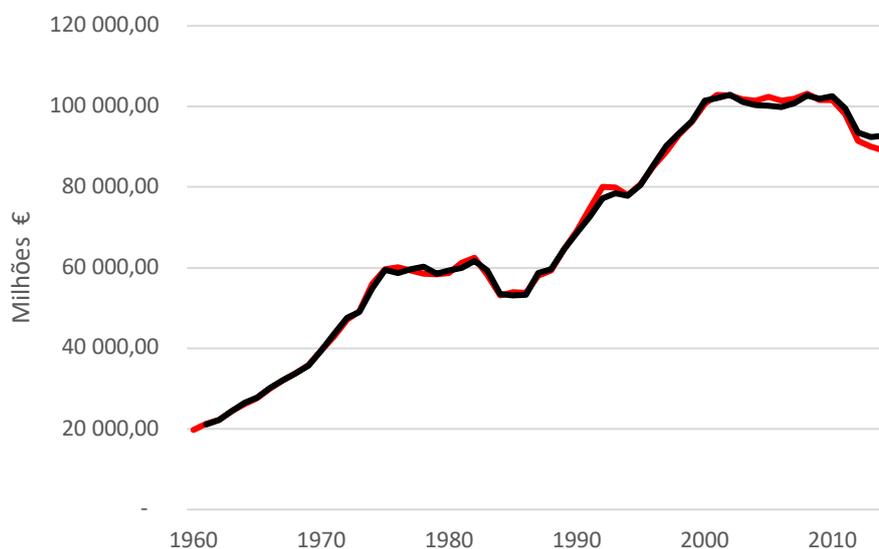


Figura 4.1 – Salários (*W*) para a economia portuguesa 1960-2014. Linha vermelha: valores históricos; linha preta: projecção obtida ao adoptar a forma funcional da equação correspondente do modelo MARCO-UK à realidade de Portugal.

Equação: C.27		Variável independente: <i>W</i>	
Variáveis independentes	Coeficientes estimados	t-stats	
Constante	-12.38372	0.0000	
LOG(<i>W</i> (-1))-@MEAN(LOG(<i>W</i>))	0.149380	0.0253	
LOG(<i>YF</i> (-1))	-0.016301	0.0591	
LOG(<i>W</i> HOUR)	0.866790	0.0000	
LOG(<i>CPI</i>)	-0.155522	0.0000	
LOG(<i>HL</i>)	1.012809	0.0000	
LOG(<i>HL</i> (-1))	-0.323926	0.0074	
<i>R</i> ²		0.998777	
Durbin-Watson		0.576367	

Tabela 4.1 - Coeficientes estimados para a Equação (21).

Caso 2: As equações do modelo MARCO-UK necessitam apenas de um pequeno ajuste para se adequarem à realidade portuguesa

No modelo MARCO-UK, a taxa de juro nominal (*R_{NOM}*) é função do PIB (*Y*) e do deflactor de preços (*CPI*) (equação 4.2). Não contém nenhuma dinâmica de longo prazo no modelo inglês, mas é complementada com variáveis artificiais para os anos 1975 e 1989.

$$R_{NOM}_t = f(R_{NOM}_{t-1}, Y_t, CPI_t) \quad (4.2)$$

Como já foi referido anteriormente, não foi possível obter dados que permitissem elaborar uma série temporal (para o período 1960-2014), correspondente à economia de Portugal, da variável *Money supply (MS)*, assim, esta não será incluída na equação aplicada à economia de Portugal. Na figura 4.2 é possível observar a projecção da variável *R_NOM* – utilizando a mesma equação sem a variável *MS* – que não se adequa aos dados históricos.

Neste sentido, foi preciso modificar as dinâmicas de curto prazo presentes na equação no modelo inglês, removendo todos os termos não significativos e acrescentado novas variáveis artificiais adequadas. Nomeadamente, acrescentaram-se variáveis artificiais para os conjuntos de anos 1961-1973, 1986-1988 e 1992-2014. Deste modo, a equação alterada já foi capaz de estimar satisfatoriamente os valores históricos de *R_NOM*, como pode ser corroborado na figura 4.2 e, por isso, foi incluída no modelo MARCO-PT. Por fim, a tabela 4.1 apresenta os coeficientes obtidos depois dos ajustes feitos.

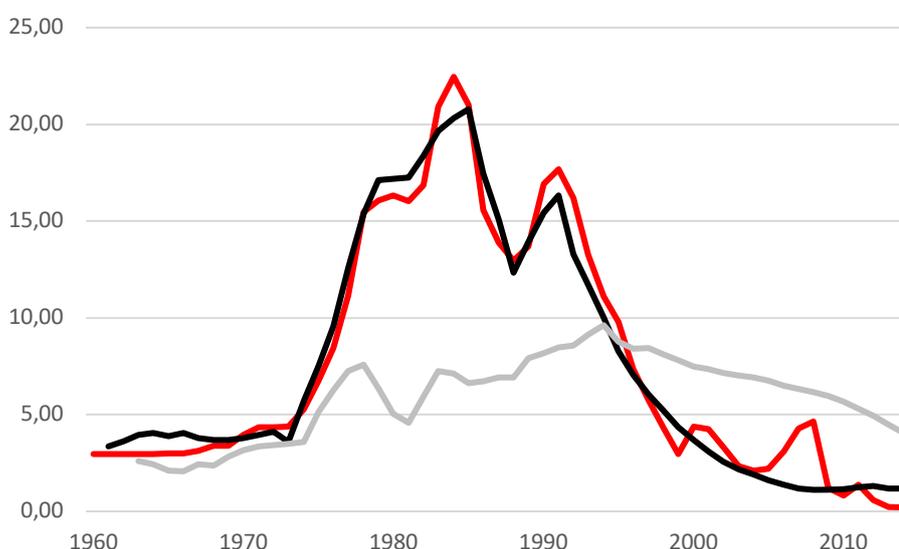


Figura 4.2 – Taxa de juro nominal (*R_NOM*) para a economia portuguesa 1960-2014. Linha vermelha: valores históricos; Linha cinzenta: estimativa obtida ao utilizar a equação do modelo MARCO-UK sem alterações; linha preta: estimativa depois de se re-estimar o TCE.

Equação: C.49		Variável independente: <i>R_NOM</i>	
Variáveis independentes	Coeficientes estimados	t-stats	
<i>R_NOM</i> (-1)	0.857503		0.0000
LOG(Y)	0.341831		0.0000
DLOG(CPI)	-7.834886		0.0099
@DURING("1961 1973")	-2.762887		0.0000
@DURING("1992 2014")	-3.893964		0.0000
@DURING("1986 1988")	-3.924045		0.0000
R ²			0.975497
Durbin-Watson			1.975654

Tabela 4.2 - Coeficientes estimados para a Equação (22).

Caso 3: As equações do modelo MARCO-UK não se adequam à realidade portuguesa

A maioria das equações presentes no novo modelo MARCO-PT pertencem a este grupo de equações do caso 3. Por exemplo, no modelo MARCO-UK o consumo de energia final por parte das famílias (FEN_C) é função dos preços da energia pagos pelas famílias (P_{EN_C}), da exergia útil total (UEX_{TOT}), dos *heating degree days* (HDD) e dos salários médios por hora (W_{HOOR}) – equação 4.3.

$$FEN_{C_t} = f(P_{EN_{C_t}}, UEX_{TOT_t}, HDD_t, W_{HOOR_t}) \quad (4.3)$$

A forma da equação presente no modelo MARCO-UK inclui TCE para os termos de longo prazo, dinâmicas de curto prazo para cada uma das variáveis independentes e variáveis artificiais para os anos 1972, 2001 e 2004.

Para Portugal, a projecção dos valores da variável dependente FEN_C não se aproxima do comportamento dos dados históricos dessa variável ao empregar a equação presente no MARCO-UK (figura 4.3). Ao contrário do caso 2 descrito acima, a simples inclusão de variáveis artificiais não é suficiente para ajustar a projecção desta equação à economia portuguesa.

De modo a obter-se uma equação capaz de estimar a variável dependente FEN_C a partir das variáveis independentes $P_{EN_C}, UEX_{TOT}, HDD, W_{HOOR}$, tendo em conta a realidade portuguesa, foram re-estimados os coeficientes para as relações de cointegração de longo prazo entre as variáveis, utilizando o método dos mínimos quadrados. Neste caso foi possível manter as dinâmicas de curto prazo, mas o mesmo não foi possível para as variáveis artificiais, que tiveram de ser alteradas para satisfazer as idiosincrasias da economia de Portugal. Foram acrescentadas duas destas variáveis para os períodos de 1988-2011 e 2008-2014. Estas modificações e acrescentos culminaram numa estimativa da variável dependente bastante satisfatória, como é possível constatar na figura 4.3 e, por isso, foi incluída no modelo português. Todos os coeficientes estimados encontram-se no anexo D da Informação Suplementar.

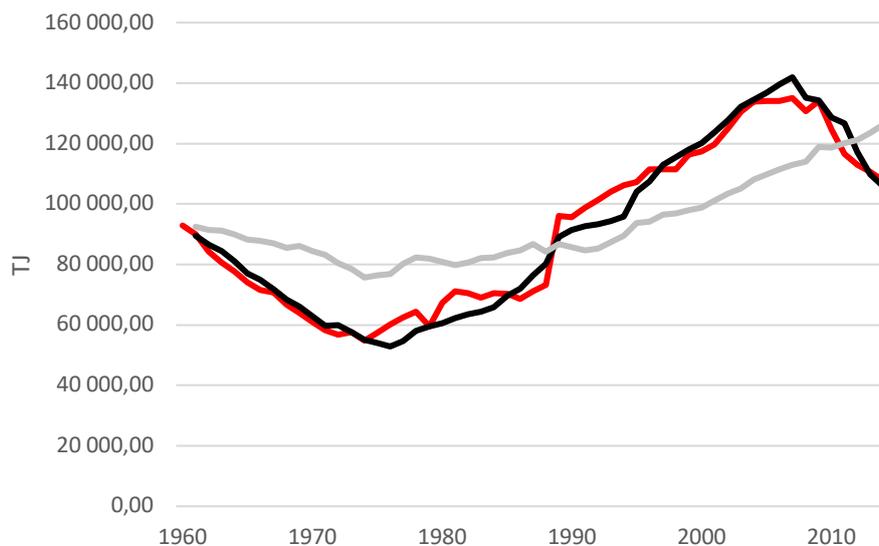


Figura 4.3 – consumo de energia final das famílias (FEN_C) para economia de Portugal 1960-2014. Linha vermelha: valores históricos; Linha cinzenta: estimativa obtida ao utilizar a equação do modelo MARCO-UK sem alterações; linha preta: estimativa depois de se re-estimar o TCE.

4.3 Modelo *basefit* e validação

Tendo todas as equações estimadas, estas são introduzidas no novo modelo MARCO-PT. Na informação suplementar (anexos C e D) é possível encontrar todas as equações bem como os seus coeficientes na sua forma final – tendo em conta que as equações necessitaram de alguns ajustes para assegurar o bom funcionamento do modelo. Ao juntarem-se todas as equações identitárias com as equações econométricas desenvolveu-se o modelo *basefit*.

Na figura 4.4 é possível visualizar o PIB real da economia portuguesa (linha vermelha) entre os anos de 1960 e 2014 e o PIB estimado pelo modelo *basefit* para o mesmo período. Fica assim claro que o modelo *basefit* é capaz de estimar correctamente o crescimento económico de Portugal no período em estudo.

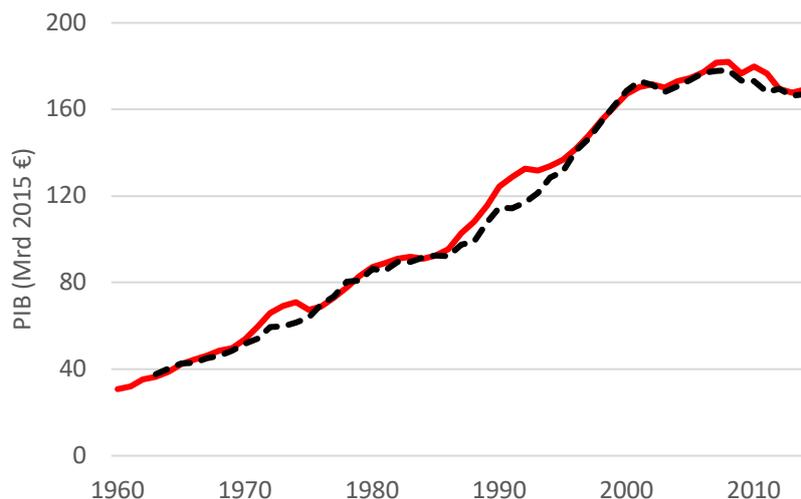


Figura 4.4 – Produto interno bruto da economia portuguesa 1960-2014. Linha vermelha: PIB histórico; Linha a tracejado: PIB estimado pela solução basefit.

A solução *basefit* tem estimativas para todas as variáveis presentes no modelo MARCO-PT e que podem ser consultadas no anexo E. Esta solução foi capaz de estimar, de um modo adequado, a grande maioria das variáveis, contudo, existe ainda espaço para serem feitas melhorias ao modelo. Nomeadamente melhorias em todo o período de estudo, como é o caso da inflação (*INF*) – figura 4.5 - ou melhorias em pequenos períodos dentro do período total, como é o caso do consumo de bens não energéticos do sector da indústria (*IND_NE*) – figura 4.6 - entre 1960 e 1985. Apesar destas pequenas imprecisões, a solução *basefit* do modelo MARCO-PT imprime uma representação fidedigna das tendências históricas da economia, do consumo de energia, entre outras de Portugal.

:

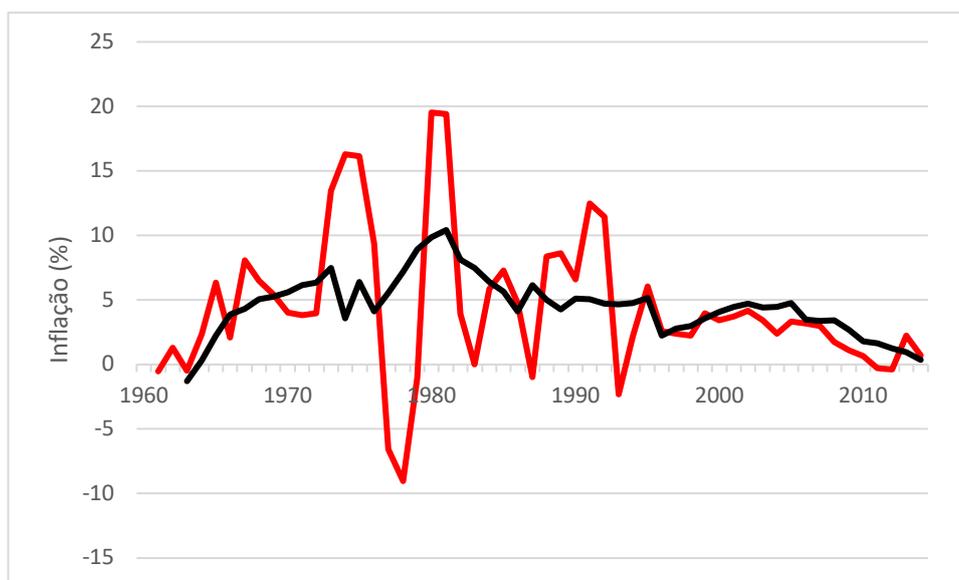


Figura 4.5 – Inflação para a economia de Portugal 1960-2014. Linha vermelha: valores históricos; linha preta: solução basefit

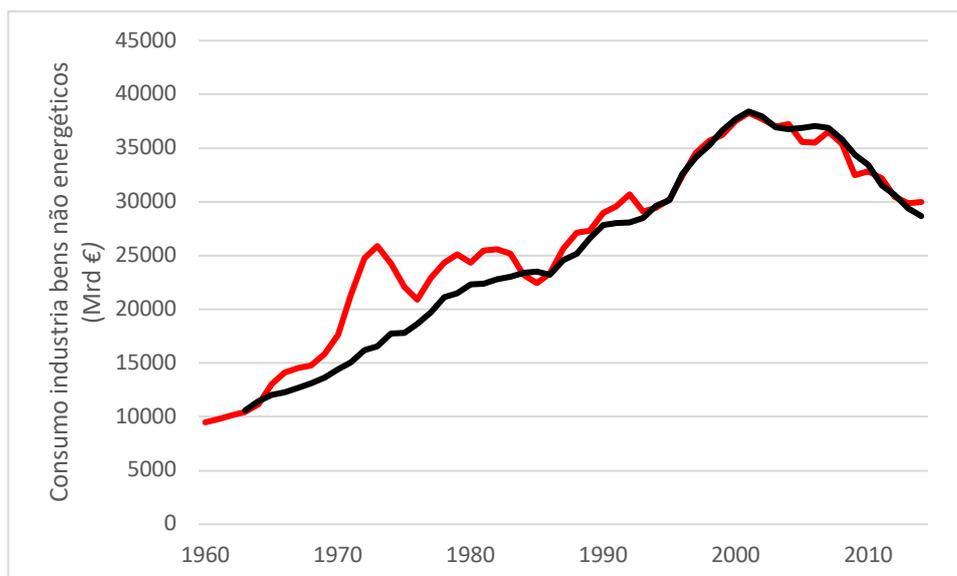


Figura 4.6 - consumo de bens não energéticos do sector da indústria para a economia de Portugal 1960-2014.
Linha vermelha: valores históricos; linha preta: solução basefit

4.4 Simulações contrafactuais (ex-post)

Na figura 4.7 estão explicitados seis gráficos referentes à estimativa do PIB (Y) de Portugal – entre 1960 e 2014 - para cada uma das simulações contrafactuais mencionadas na secção 3.4. Em cada um dos gráficos é possível identificar a projecção do Y da solução *basefit* comparando-a com a evolução do Y da simulação contrafactual. Os gráficos iniciam os seus valores em 1963 e não em 1960 devido aos termos de desfasamento.

Partindo da figura 4.7, é notório que em dois dos gráficos existe uma discrepância acentuada entre a estimativa *basefit* e a da simulação. Essa diferença leva a crer que as variáveis eficiência de conversão exérgica ($EXEFF_FU$) – figura 4.7 a) - e exérgia útil total (UEX_TOT) – figura 4.7 f) - têm um impacto acentuado no PIB de Portugal entre os anos de 1960-2014.

Fica claro que, forçando a variável $EXEFF_FU$ a manter o seu valor de 1963 (14,5% aproximadamente) durante todo o período de estudo, leva a uma queda abrupta do produto interno bruto, quando comparado com o PIB real. Nesta simulação, o PIB da solução *basefit* em 2014

representa mais de metade (aproximadamente 60%) do PIB que se obteria com a eficiência mantida constante.

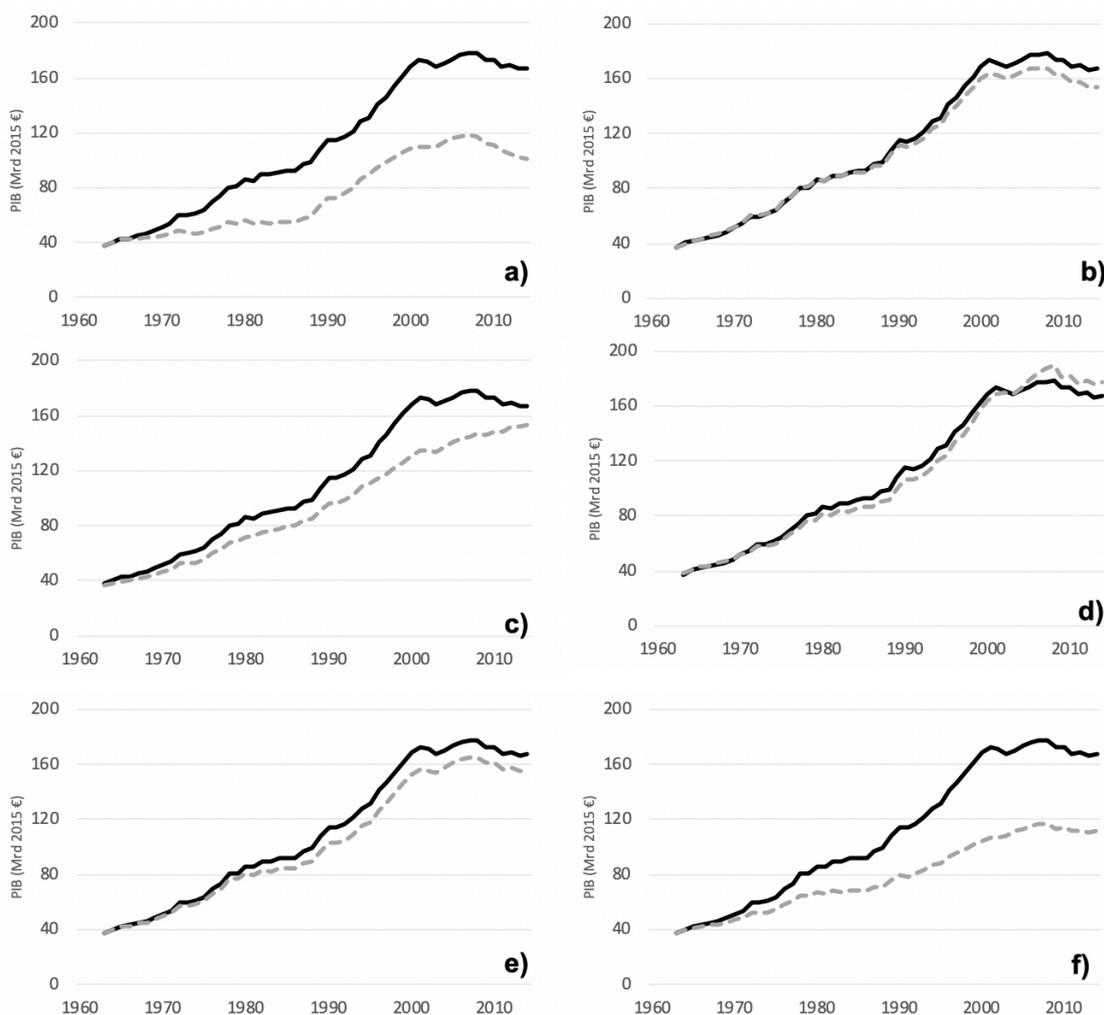


Figura 4.7: Produto interno bruto de Portugal 1960-2014, estimado pela solução *basefit* (linhas pretas), e simulações contrafactuais (linhas a tracejado): a) cenário 1, eficiência de conversão exergética final para útil (EXEFF_FU) mantida constante; b) cenário 2, energia final total consumida (FEN_T) mantida constante; c) cenário 3, investimento (I) mantido constante; d) cenário 4, trabalho humano (L) mantido constante; e) cenário 5, preços da energia (P_EN_C, P_EN_IND, P_EN_OTH) mantidos constantes; f) cenário 6, exergia útil total (UEX_TOT) mantida constante.

Em relação à fixação da exergia útil total em valores de 1963 (aproximadamente 27 PJ) até 2014, leva a que a estimativa do PIB para Portugal seja cerca de 67% inferior à estimativa *basefit* em 2014.

Analisando em conjunto estes dois factos, entende-se a vitalidade do consumo de energia – medida no estágio útil e em termos exergéticos – para o crescimento económico de Portugal. Estes resultados vão ao encontro das evidências do estudo de [34] ao empregarem o modelo MARCO-UK à economia do Reino Unido. Nesse estudo, constatou-se - à semelhança da presente tese - que a eficiência de conversão exergética final para útil tem a influência mais preponderante no PIB do Reino Unido (mantendo esta variável constante levou a uma redução de 25% do PIB no último ano de estudo, quando comparado com a estimativa *basefit*). O estudo elaborado ao longo desta tese apresenta assim mais evidências que comprovam o modelo elaborado por [57]. Nesse modelo, os autores sugeriam que

a eficiência termodinâmica tinha (e continua a ter) um papel muito significativo no crescimento económico de uma nação, nomeadamente quando essa eficiência é medida em termos de exergia, e na fase final para útil das transformações de energia.

Por outro lado, no trabalho de [34], ao manter constante o investimento (I), levou também a uma redução significativa do PIB do seu país, enquanto que para Portugal tal não se verificou, pois apenas se constata uma redução de cerca de 8%. Contudo, é pertinente salientar que a redução é maior considerando apenas o período 1995-2010.

De modo a melhor compreender e identificar as contribuições que cada uma das variáveis, presentes nas simulações contrafactuais, têm no crescimento económico de Portugal, foi replicada a tabela (tabela 4.3), presente em [34], na qual são exibidas as diferenças entre as médias anuais da taxa de crescimento do PIB – estimado pela solução *basefit* do modelo MARCO-PT – e a taxa de crescimento do PIB – estimado por cada uma das simulações contrafactuais. Tudo isto no período de estudo (1963-2014) e também em alguns subperíodos selecionados, baseado no que foi feito em [34] que, por sua vez, teve em conta o que foi elaborado para a economia da Suécia por [58]. Da mesma forma que nos trabalhos mencionados, a soma das contribuições não resulta na totalidade da taxa de crescimento.

Cenário	Variável constante	Contribuição anual para o crescimento do PIB					1963-2014
		1963-1973	1973-1985	1985-1994	1994-2005	2005-2014	
Basefit GDP		4,76%	3,75%	3,76%	2,81%	-0,42%	3,01%
Cenário 1	Eficiência exergética	2,39%	2,48%	-1,45%	0,13%	1,08%	1,01%
Cenário 2	Energia Final	-0,12%	0,13%	0,38%	0,10%	0,38%	0,16%
Cenário 3	Investimento	0,96%	0,23%	0,23%	0,42%	-1,42%	0,12%
Cenário 4	Trabalho humano	0,25%	0,43%	-0,10%	-0,80%	-0,41%	-0,11%
Cenário 5	Preços da energia	0,55%	0,38%	0,15%	-0,26%	-0,04%	0,16%
Cenário 6	Exergia útil	1,41%	1,46%	0,97%	0,37%	-0,19%	0,84%

Tabela 1

Tabela 4.3 – Contribuições para o crescimento do PIB de variáveis selecionadas. Verde claro: períodos em que o contributo para o crescimento do PIB foi entre 0,25-1,00%/ano. Cinzento médio: períodos em que o contributo para o crescimento do PIB foi entre 1,00-2,00%/ano. Cinzento escuro: períodos em que o contributo para o crescimento do PIB foi >2,00%/ano.

Tal como na figura 4.7, a tabela 4.3 ilustra muito significativamente que a eficiência exergética final-para-útil e o consumo de exergia útil são as variáveis que maior impacto tiveram na taxa de crescimento do PIB de Portugal, nos últimos 50 anos. Isto verifica-se na totalidade do período de estudo 1963-2014, mas em particular, antes da Revolução do 25 de Abril (1963-1973) e no período pós revolução (1973-1985). Esta evidência comprova o que é exibido na figura 4.4 da secção 2.2.2: o período em que o país foi mais eletrificado levou a que este fosse o período em que a eficiência exergética final para útil cresceu a um ritmo mais acelerado.

Muito diferente é a influência, no crescimento económico de Portugal, das restantes variáveis mantidas constantes. A contribuição do consumo de energia final (cenário 2 – figura 4.7 b)), do trabalho humano (cenário 4 – figura 4.7 d)) e dos preços da energia (cenário 5 – figura 4.7 e)) no crescimento económico foi muito reduzido, especialmente quando comparando com as contribuições da eficiência exergética e da exergia útil.

Tendo todos estes resultados em conta – que se alinham com os resultados obtidos pela aplicação do modelo MARCO-UK ao Reino Unido [34] – a exergia útil tem um maior impacto no crescimento económico do que a energia final consumida ou do que os preços da energia. O consumo energético, medido na sua fase útil e em termos de exergia, apresenta-se como sendo a variável energética que mais se relaciona e afecta o crescimento económico. Ora este facto corrobora os argumentos dos autores – pioneiros na área da economia exérgica - Robert Ayres e Benjamin Warr [59], que defendem a importância de exergia útil na economia, afirmando que é a exergia útil (ou trabalho útil) a métrica energética que melhor captura as contribuições dos fluxos de energia na economia. No caso concreto de Portugal, os resultados da presente tese acrescentam evidências a trabalhos anteriores. Nomeadamente, [28] que descobriram que a intensidade da exergia útil (exergia útil / PIB) é consideravelmente estável durante longos períodos de tempo – enquanto que a intensidade da energia final diminuía no mesmo período de tempo (figura 2.3 – secção 2.2.2) - e [8] que descobriram que só se obtêm funções de produção agregadas - estatisticamente significativas e economicamente plausíveis - a partir do teste de relações de cointegração entre produto económico e possíveis factores de produção quando se inclui uma medida de exergia útil no espaço de cointegração (isto é, no conjunto de variáveis para as quais se está a testar uma relação).

No modelo MARCO-PT, a relação entre o consumo de energia final e crescimento económico é significativamente inferior quando comparada com o que foi descoberto no trabalho de [58] para a Suécia. Isto deve-se, essencialmente, à presença de uma variável de eficiência de conversão de exergia final em exergia útil, no modelo MARCO-PT. Tal facto leva a que se interprete que na economia portuguesa, o que está a promover o crescimento económico, é mais a eficiência exérgica e não tanto a quantidade de energia consumida. Para além disso, em [58] a energia consumida é medida em energia final apenas, sem recorrer a métricas de exergia útil.

Tal como em [34], é possível dividir em dois componentes a contribuição da eficiência agregada de conversão de exergia final em útil: 1) contribuições fruto de avanços tecnológicos introduzidos na economia e que levaram a um aumento da eficiência exérgica (progresso tecnológico); 2) contribuições fruto do aumento da procura da exergia útil na economia (procura de serviços energéticos). Ambos podem ser identificados ao observar as estimativas para a eficiência exérgica final para útil no cenário 1 (eficiência exérgica constante) e no cenário 6 (exergia útil constante) e comparando-as com as estimativas do modelo *basefit* – figura 4.8.

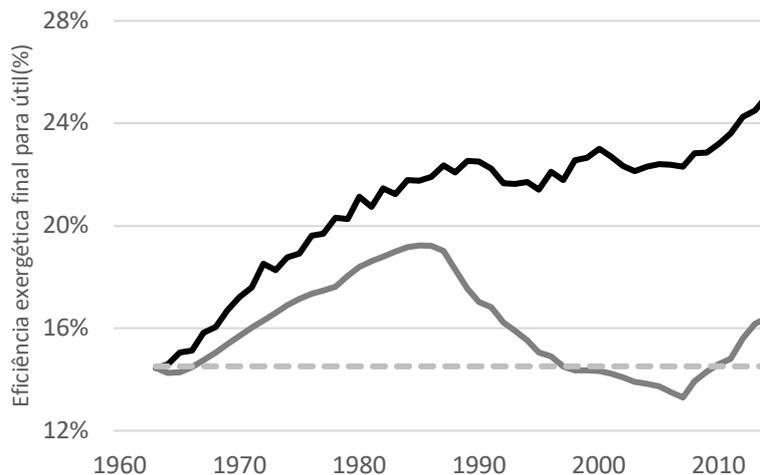


Figura 4.8 – Ganhos na eficiência exergética final para útil devido a dois componentes: progresso tecnológico e aumento da procura de serviços energéticos. Linha preta: simulação basefit; Linha cinzenta: simulação do cenário 6 (exergia útil total constante); Linha a tracejado: simulação do cenário 1 (eficiência exergética final para útil constante).

Na figura 4.8, a eficiência exergética, no cenário onde a exergia útil é mantida constante (linha cinzenta), cresceu bastante na primeira metade do período de estudo (até cerca do final dos anos 80), quando comparado com o cenário em que a eficiência se mantém constante (linha a tracejado). Como é sugerido por [34], tal pode ser interpretado como : “*um ganho natural da eficiência termodinâmica que ocorre de ano para ano*”. Os autores afirmam que este efeito se deve à mudança tecnológica endogeneizada no modelo MARCO-UK. Contudo, a diferença entre as projecções da eficiência exergética no modelo *basefit* e da do cenário onde a exergia útil é constante, presente na figura 4.8, pode ser justificada pelo aumento da procura de serviços energéticos (o mesmo seria dizer exergia útil).

Assim, fica claro, ao analisar a figura 4.8 que o progresso tecnológico – na medida em que se encontra ligado ao aumento da eficiência exergética final para útil – teve um papel preponderante no crescimento económico de Portugal. Contudo, isto apenas sucedeu na primeira metade do período de estudo (também evidenciado na tabela 1). Como foi mencionado anteriormente, este período da história coincide com o crescimento mais rápido da eficiência exergética em Portugal, devido à eletrificação em massa do país (figura 2.4 – secção 2.2.2). Na segunda metade do período de estudo, o crescimento acentuado da eficiência parou, verificando-se um aumento pouco acelerado principalmente fomentado pelo aumento da procura de serviços energéticos. Apesar deste aumento da procura, verificou-se uma certa estagnação a nível da eficiência devido a, por exemplo, o aumento da utilização do automóvel (serviço energético associado a uma baixa eficiência exergética).

Como foi apresentado na secção 2.1, a teoria neoclássica defende modelos de crescimento económico que reconhecem apenas contribuições de dois factores de produção – capital e trabalho humano. Tem sido, de um modo geral, publicado que o papel destes dois factores é insuficiente para explicar o crescimento económico que, de facto, se verifica em países desenvolvidos. Este é, portanto, também o caso de Portugal, onde contando as contribuições dos dois factores de produção mencionados – ambos com o peso correspondente à sua fatia de recebimentos – fica cerca de 40% do crescimento do PIB por explicar.

Trabalhos anteriores sugeriram que a eficiência exergética final para útil pode ser considerada como uma aproximação relevante da produtividade total dos factores (PTF), para o caso da economia de Portugal [33]. Aplicando o modelo MARCO a Portugal, estas considerações saem reforçadas. Modelando o *output* económico de Portugal, recorrendo a uma função de produção agregada comum à teoria neoclássica - como é o caso da função Cobb-Douglas (equação 4.4) - e utilizando as elasticidades dos factores contantes e iguais à média dos seus rendimentos em relação ao PIB (aproximadamente 0,3 para o capital e 0,7 para o trabalho humano), pode ser calculado a PTF residual A.

$$Y = A \cdot K^{0.3} \cdot L^{0.7} \quad (4.4)$$

Deste modo, pode-se medir a contribuição do TFP para o crescimento económico durante o período em estudo (1963-2014), calculando a mesma função de produção (equação 4.4), mas desta vez mantendo o factor A contante durante o período de estudo. Na figura 4.9 estão explícitos os resultados graficamente.

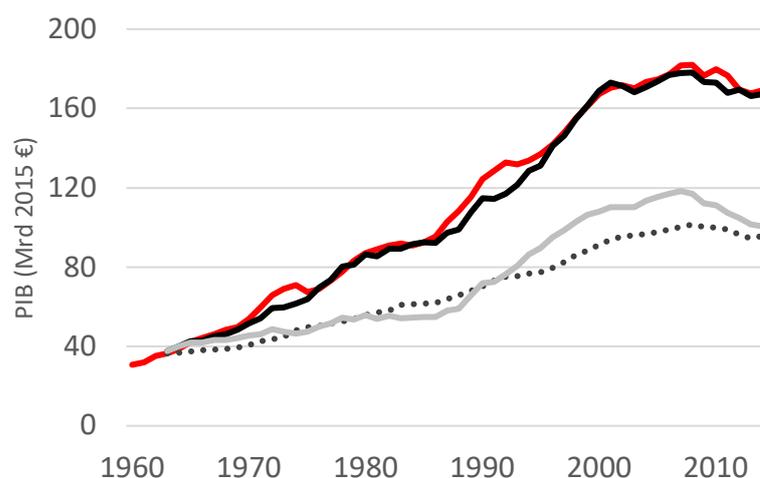


Figura 4.9 – Produto interno bruto de Portugal 1960-2014. PIB histórico (linha vermelha); PIB estimado pela simulação basefit do modelo MARCO-PT (linha preta); PIB estimado pela simulação do cenário 1 (eficiência exergética final para útil constante) do modelo MARCO-PT (linha cinzenta); PIB estimado pela função de produção agregada Cobb-Douglas (equação 4.4) mantendo o termo referente à PTF (A) constante (linha pontilhada).

Na figura 4.9, é apresentado como o progresso tecnológico exógeno, atribuído à PTF no modelo neoclássico Cobb-Douglas, está endogeneizado no modelo MARCO-PT devido à inclusão da variável da eficiência de conversão de exergia final em útil. O impacto que tem, no crescimento económico de Portugal, à luz de uma função de produção agregada neoclássica, ao manter a PTF constante durante o período de 1963-2014, é bem capturado pelo modelo MARCO-PT, quando neste a variável eficiência exergética final para útil é mantida constante. Ora, este facto corrobora as afirmações de [58] [59] e as evidências estatísticas de [33], que a mudança tecnológica assumida na teoria neoclássica – representada pela PTF – pode ser afinal explicada pela eficiência de conversão energética, em especial, na fase de final para útil, medida em termos exergéticos.

As figuras 4.10 e 4.11 mostram, respectivamente, os cenários mencionados na secção 3.4 acerca da produtividade do trabalho humano e do capital. Em Portugal, a produtividade do trabalho humano cresceu de uma forma estável nos últimos 50 anos, com é possível corroborar através das projeções do modelo *basefit* (linha preta). Evidentemente, no cenário 4 (figura 4.10 d) – em que o trabalho humano é mantido contante – a produtividade deste cresce de uma forma significativa. Mas, mantendo constante o consumo de energia final (figura 4.10 b)) ou os preços da energia (figura 4.10 e)) não existe grande alteração no crescimento da produtividade do trabalho humano, enquanto que mantendo o investimento constante leva a uma quebra da produtividade do trabalho (figura 4.10 c)). Estes resultados estão de acordo com as descobertas feitas em [34], ao aplicar-se o modelo MARCO-UK ao Reino Unido. Para além disso, para Portugal também se entende que existe uma relação algo fraca entre o trabalho humano e o Produto interno bruto. O trabalho humano tem um impacto muito menor no crescimento económico do que o capital (i.e., o investimento) – figura 4.10 e tabela 3.

Por outro lado, as figuras 4.10 a) e f), constituem uma novidade ao comparar os resultados da relação entre o trabalho humano, o consumo de exergia útil e a eficiência exergética na economia de Portugal e na do Reino Unido. Tendo em conta as simulações feitas, pelo modelo MARCO-UK, o trabalho humano desce consideravelmente nos cenários em que tanto a exergia útil como a eficiência exergética são mantidas constantes. Para Portugal, estas mesmas simulações resultaram num aumento da produtividade do trabalho humano.

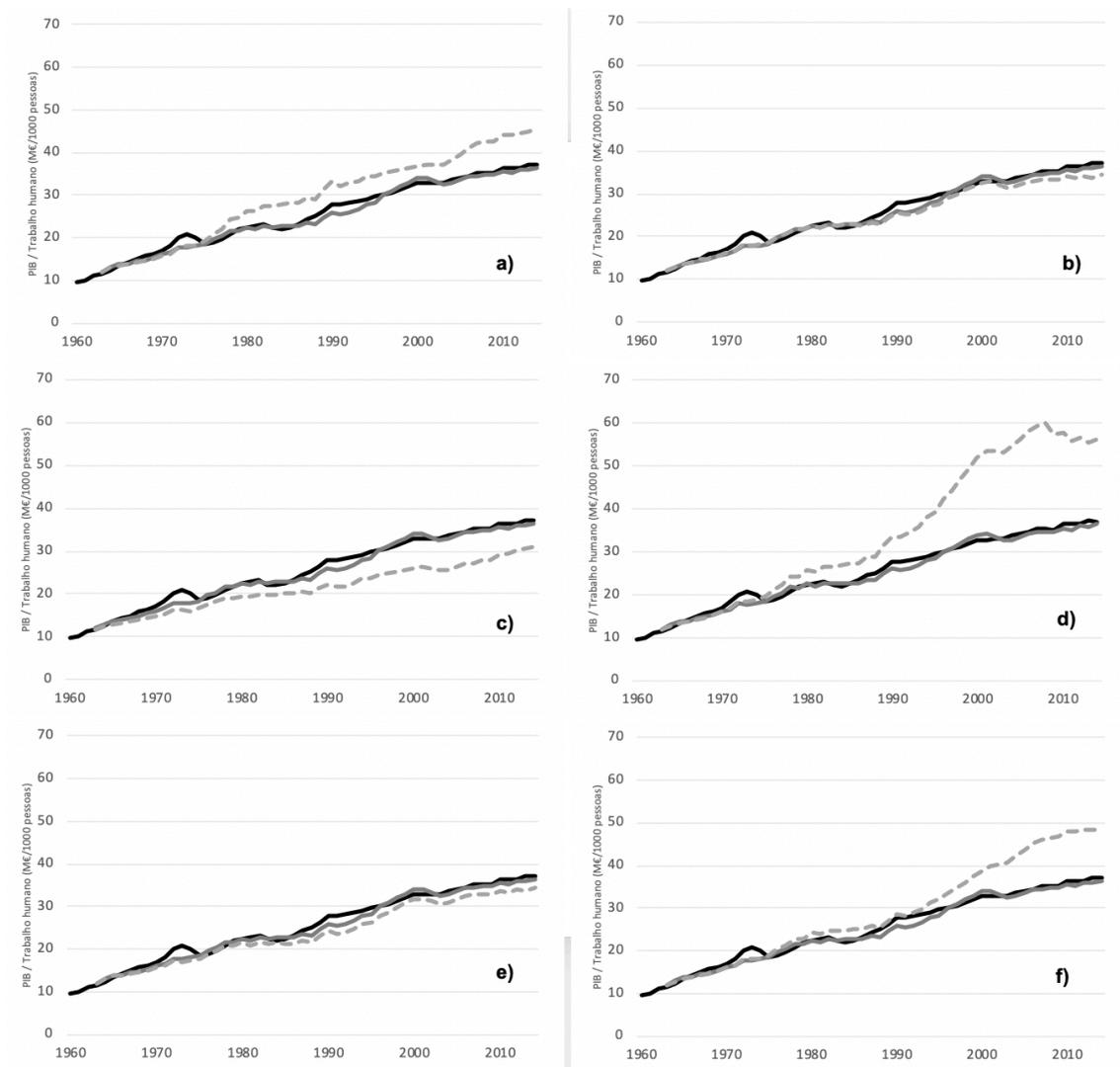


Figura 4.10 – Produtividade do trabalho humano para a economia portuguesa 1960-2014, submetida às simulações contrafactuais. A linha preta representa os valores históricos. A linha cinzenta representa as soluções do modelo *basefit*. A linha a tracejado representa as simulações dos diferentes cenários: a) cenário 1, com a eficiência de conversão de exergia final em útil (*EXEFF_FU*) mantida constante; b) cenário 2, com a utilização de energia final (*FEN_T*) mantida constante; c) cenário 3, com o investimento (*I*) mantido constante; d) cenário 4, com o trabalho humano (*L*) mantido constante; e) cenário 5, com os preços da energia (*P_EN_C*, *P_EN_IND*, *P_EN_OTH*) mantidos constantes; f) cenário 6, com a exergia útil total (*UEX_TOT*) mantida constante.

Observando a figura 4.11, constata-se que a produtividade do capital tem crescido de uma forma estável ao longo dos últimos 50 anos, apenas com um decréscimo nas duas primeiras décadas do século. Neste caso – da produtividade do capital – os resultados deste estudo equiparam-se aos resultados apurados pelo trabalho desenvolvido para o Reino Unido [34]. Em todas as simulações, o capital não varia da solução *basefit*, à excepção do cenário em que o investimento é constante (figura 4.11 c)), em que, obviamente, a produtividade aumentaria bastante, caso o investimento mantivesse os valores da década de 60 ao longo da totalidade do tempo em estudo.

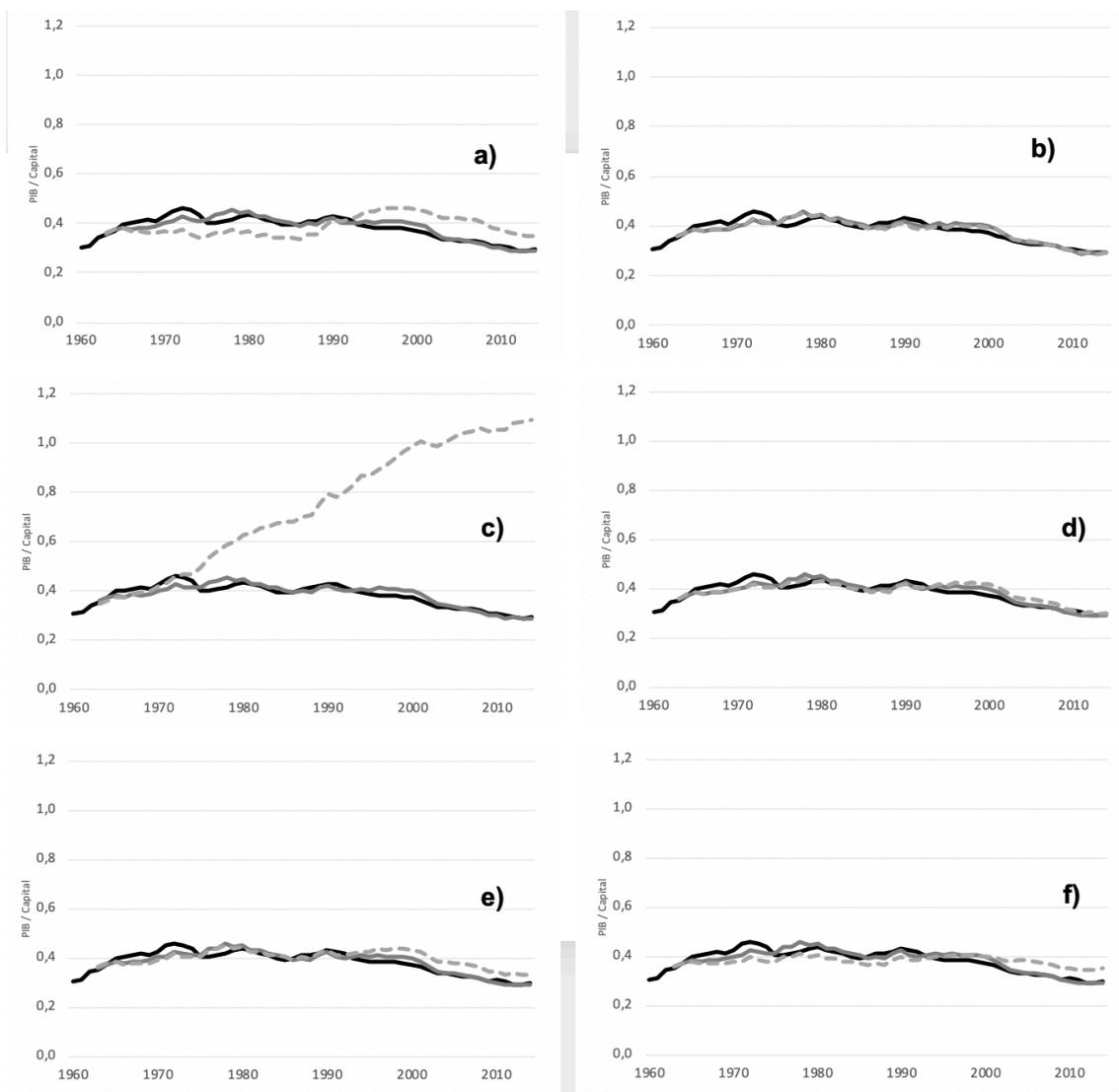


Figura 4.11 – Produtividade do capital para a economia portuguesa 1960-2014, submetida às simulações contrafactuais. A linha preta representa os valores históricos. A linha cinzenta representa as soluções do modelo basefit. A linha a tracejado representa as simulações dos diferentes cenários: a) cenário 1, com a eficiência de conversão de exergia final em útil (EXEFF_FU) mantida constante; b) cenário 2, com a utilização de energia final (FEN_T) mantida constante; c) cenário 3, com o investimento (I) mantido constante; d) cenário 4, com o trabalho humano (L) mantido constante; e) cenário 5, com os preços da energia (P_EN_C, P_EN_IND, P_EN_OTH) mantidos constantes; f) cenário 6, com a exergia útil total (UEX_TOT) mantida constante.

Finalmente, à semelhança do modelo MARCO-UK, o modelo MARCO-PT sugere que existe uma correlação entre capital e energia, como é possível corroborar na figura 4.12. Nessa figura é possível observar que o capital diminui quando a exergia útil é mantida constante (directamente ou constringindo a eficiência exergética). Por outro lado, contrariamente ao demonstrado em [34], existe também – para o presente modelo – uma relação de complementaridade entre o trabalho humano e os *inputs* energéticos, ou seja, o trabalho humano diminui nos cenários em que a exergia útil e a eficiência exergética são mantidas constantes (figura 4.13).

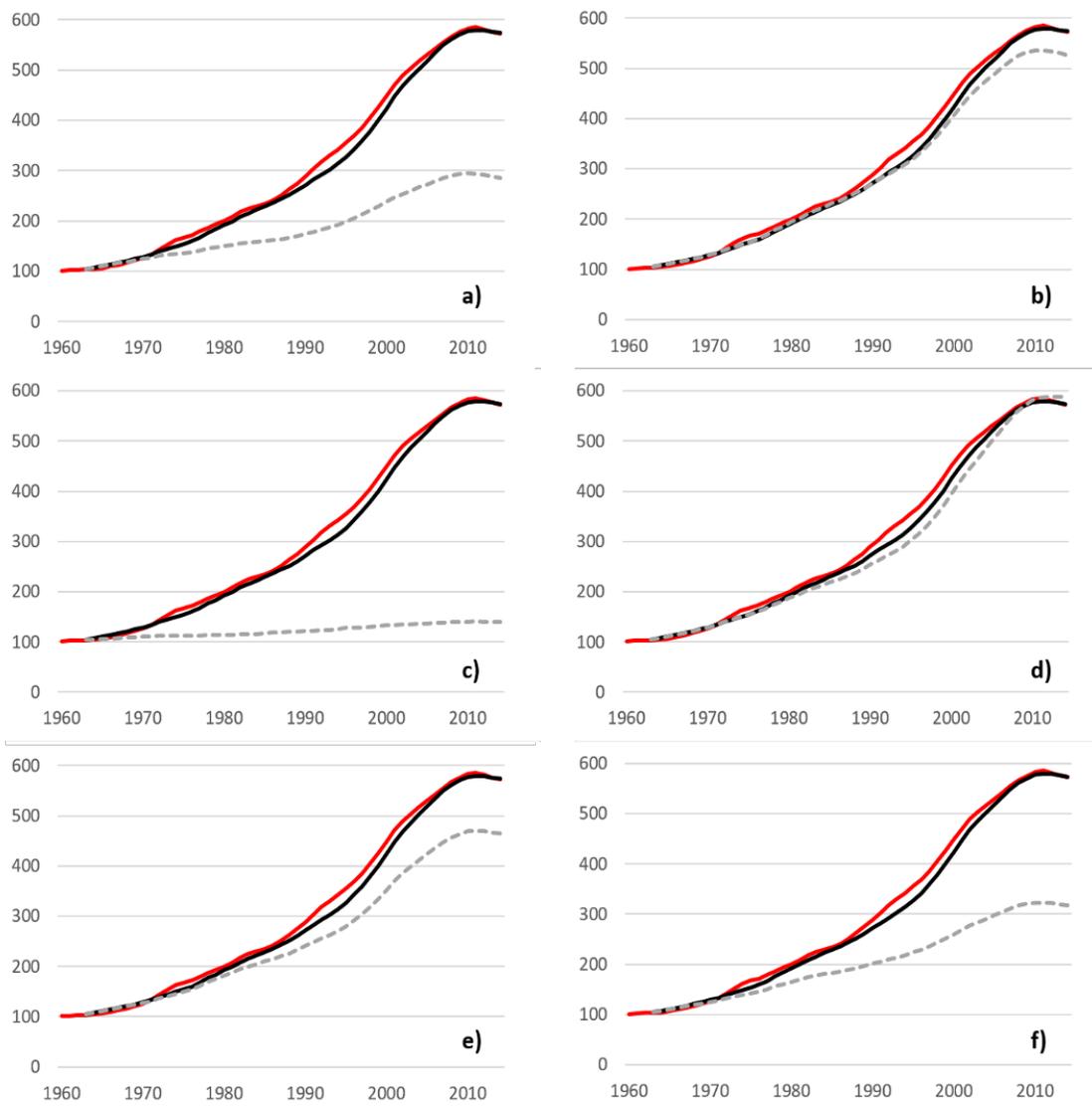


Figura 4.12 – Capital bruto (Mrd € 2015) para a economia de Portugal 1960-2014, sob as simulações contrafactuais. Linha preta representa os valores históricos. Linha cinzenta representa a simulação do modelo basefit. Linha a tracejado representa as simulações dos cenários: a) cenário 1, com eficiência exergética final-útil (EXEFF_FU) constante; b) cenário 2, com utilização de energia final total (FEN_T) constante; c) cenário 3, com o investimento (I) constante; d) cenário 4, com o trabalho humano (L) constante; e) cenário 5, com os preços da energia (P_EN_C, P_EN_IND, P_EN_OTH) constante; f) cenário 6, com a exergia útil total (UEX_TOT) constante.

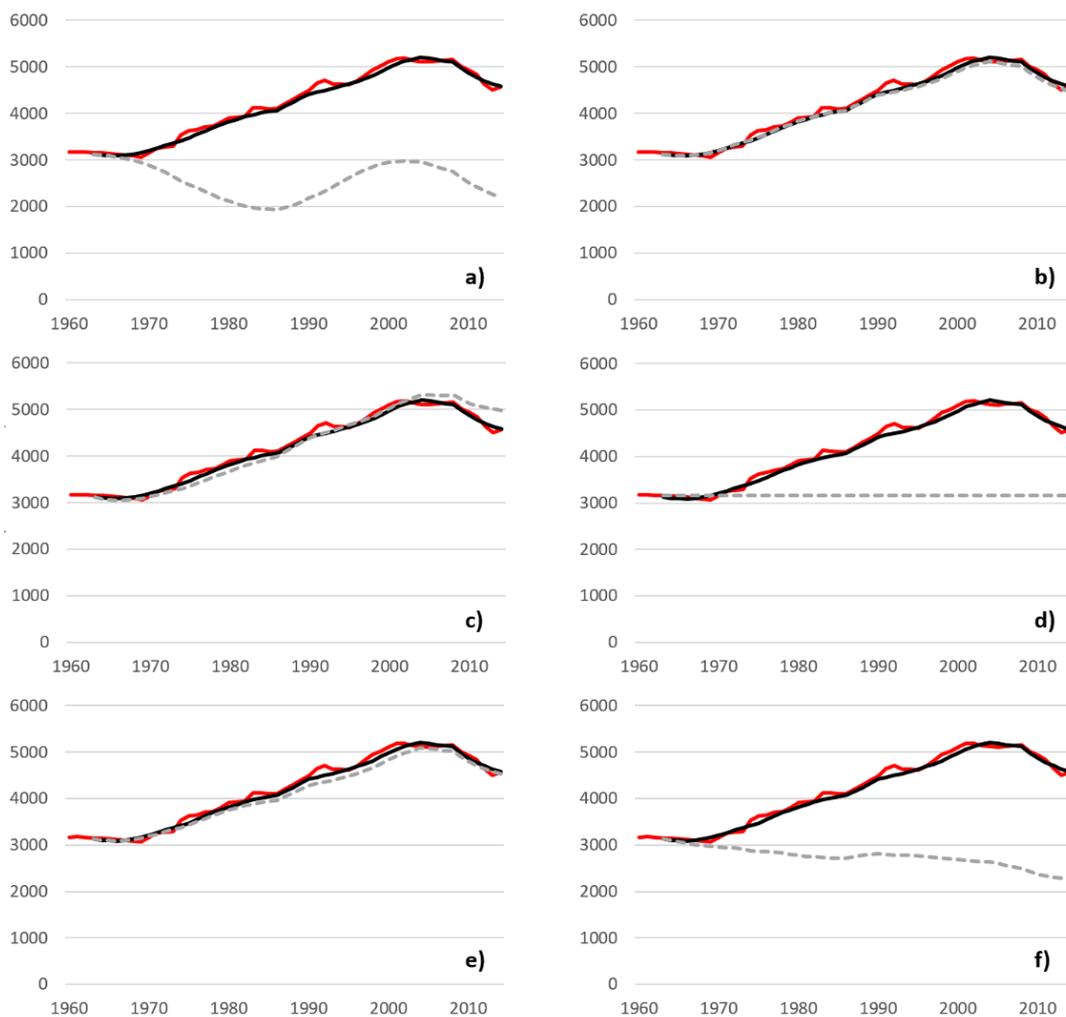


Figura 4.13 – Trabalho humano (milhar de pessoas) para a economia de Portugal 1960-2014, sob as simulações contrafactuais. Linha preta representa os valores históricos. Linha cinzenta representa a simulação do modelo basefit. Linha a tracejado representa as simulações dos cenários: a) cenário 1, com eficiência exérgica final-útil (EXEFF_FU) constante; b) cenário 2, com utilização de energia final total (FEN_T) constante; c) cenário 3, com o investimento (I) constante; d) cenário 4, com o trabalho humano (L) constante; e) cenário 5, com os preços da energia (P_EN_C, P_EN_IND, P_EN_OTH) constante; f) cenário 6, com a exergia útil total (UEX_TOT) constante.

5. Conclusões

5.1 O papel da energia no crescimento económico

A elaboração deste modelo (MARCO-PT) demonstrou o papel fulcral da energia no crescimento económico de Portugal. Tal como para a economia do Reino Unido [34], também para a economia de Portugal ficou claro que a energia desempenha um papel bastante mais importante no crescimento económico do que aquele sugerido pela sua *cost share* (5-10%). As evidências que sustentam esta conclusão são: 1) a quantificação do impacto, muito relevante no crescimento económico de Portugal, que os ganhos na eficiência exergética final para útil e na utilização de exergia útil (serviços energéticos) tiveram no período de estudo (1960-2014); 2) a separação dos aumentos de eficiência exergética final-para-útil verificados, em dois componentes, permitiu constatar que, na primeira metade do período de estudo, o aumento da eficiência exergética deveu-se, fundamentalmente, ao progresso tecnológico natural anual, enquanto que, na segunda metade do período estudado, esse aumento da eficiência exergética se deveu, em grande medida, ao aumento da procura dos serviços energéticos (este segundo período teve um crescimento da eficiência mais tímido, devido à aposta em serviços energéticos caracterizados por eficiência exergéticas reduzidas, como é o caso do automóvel); 3) finalmente, este estudo revelou também que, para Portugal, a procura de serviços energéticos (utilização de exergia útil) se revelou bastante mais preponderante, para o crescimento económico, do que a utilização de energia final ou que os preços da energia, o que suporta a ideia de que a utilização da energia no seu estágio mais próximo dos serviços energéticos influencia, de um modo mais directo, a economia.

5.2 Investir na eficiência exergética como plano de futuro

Numa altura em que o desenvolvimento sustentável se torna cada vez mais pertinente nas sociedades ocidentais, este estudo procura trazer novos dados para que as políticas públicas possam ser desenvolvidas nesse sentido. Assim, o investimento em políticas que fomentem o aumento da eficiência exergética (e não apenas a eficiência energética de 1ª lei) devem começar a ser uma realidade, tendo em conta que existem evidências de que esse investimento resultaria num maior crescimento económico. Existe, contudo, a possibilidade de as melhorias na eficiência exergética se tornarem cada vez mais difíceis e alcançar (mas este cenário só se colocaria após um período de grandes investimentos na eficiência).

5.3 Modelos com exergia

Existem modelos que assumem o trabalho humano, o capital e a energia (primária e final) como os três factores de produção fundamentais. Contudo, a eficiência exergética final para útil e os serviços energéticos (exergia útil) não são contemplados nesses modelos, pelo que é plausível afirmar que esses modelos não são termodinamicamente robustos. Contrariamente a esses modelos, este trabalho

baseou-se no modelo mais completo – que incluía medidas exergéticas, como a eficiência exergética final para útil – elaborado para a economia do Reino Unido. Ora, os resultados da presente tese – aplicada a outro país - levam a crer que a presença destes elementos nos modelos macroeconómicos é essencial, dadas as evidências encontradas, o que robustece ainda mais o modelo MARCO, pois foi aplicado a duas economias distintas, apresentando resultados semelhantes ao nível da influência directa da eficiência exergética e da utilização de exergia útil no crescimento económico. Desenvolver modelos macroeconómicos que contemplem a eficiência exergética e os serviços energéticos permitirá um melhor entendimento do papel da energia na economia e também fornecerá dados relevantes aos decisores políticos. Para além disso, esses modelos poderão prever possíveis impactos ou constrangimentos nos melhoramentos da eficiência, através da elaboração de cenários. Isto é, os modelos terão a capacidade de identificar – ao elaborar cenários – quais os mínimos requeridos, em termos exergéticos, para que exista crescimento económico.

5.4 Passos seguintes

Após desenvolver esta tese existe a possibilidade de continuar a melhorar o modelo MARCO. Para tal, seria possível dar 3 passos concretos: 1) Aplicar o modelo MARCO a mais economias ou a grupos e economias (nomeadamente para os quais já se encontram disponíveis dados de exergia final e útil, e.g. União Europeia, México, etc.). 2) Na metodologia, utilizar testes de raízes unitárias que “invertam” a hipótese nula e a alternativa dos testes utilizados (ADF e PP), de maneira a que seja possível uma verificação adicional dos resultados obtidos. Esse teste poderia ser o teste KPSS (*Kwiatkowski–Phillips–Schmidt–Shin*) o qual, – a par dos testes utilizados neste trabalho – facilitaria a distinção entre séries estacionárias, não estacionárias e séries que não são distinguíveis só com um teste. 3) Adotar mais do que uma relação de cointegração entre variáveis, sempre que os testes assim o indicarem, ao invés de apenas uma. 4) testar as variáveis incluídas numa relação a longo-prazo do modelo ao nível da sua causalidade à *Granger* (isto é, qual das variáveis tem precedência sobre a outra, ou qual causa a outra).

Referências

- [1] Ayres, R. U., van den Bergh, J. C., Kümmel, R., Lindenberger, D., & Warr, B. (2009). The Weight of Energy in Economic Growth.
- [2] Solow, R. M. (1957). Technical change and the aggregate production function. *The review of Economics and Statistics*, 312-320.
- [3] Stern, D. I. (1999). Is energy cost an accurate indicator of natural resource quality?. *Ecological Economics*, 31(3), 381-394.
- [4] Romer, P. M. (1986). Increasing returns and long-run growth. *Journal of political economy*, 94(5), 1002-1037.
- [5] Lucas, R. E. (1989). On the mechanics of economic development. *NBER Working Paper*, (R1176).
- [6] Ayres, R. U., & Warr, B. (2010). *The economic growth engine: How energy and work drive material prosperity*. Edward Elgar Publishing.
- [7] Warr, B., & Ayres, R. (2006). REXS: A forecasting model for assessing the impact of natural resource consumption and technological change on economic growth. *Structural Change and Economic Dynamics*, 17(3), 329-378.
- [8] Santos, J., Domingos, T., Sousa, T., & Aubyn, M. S. (2018). Useful exergy is key in obtaining plausible aggregate production functions and recognizing the role of energy in economic growth: Portugal 1960–2009. *Ecological Economics*, 148, 103-120.
- [9] Cleveland, C. J. (1991). Natural resource scarcity and economic growth revisited: economic and biophysical perspectives. *Ecological Economics: the science and management of sustainability*, 289-317.
- [10] Denison, E. F. (1979). Accounting for slower growth: The United States in the 1970s. *Brookings Institution, Washington, DC*.
- [11] Hudson, E. A., & Jorgenson, D. W. (1974). US energy policy and economic growth, 1975-2000. *The Bell Journal of Economics and Management Science*, 461-514.
- [12] Allen, E. L., Cooper, C. L., Edmonds, F. C., Edmonds, J. A., Reister, D. B., Weinberg, A. M., ... & Zelby, L. W. (1976). *US energy and economic growth, 1975--2010* (No. ORAU/IEA-76-7). Institute for Energy Analysis, Oak Ridge, Tenn.(USA).
- [13] Hamilton, J. D. (2003). What is an oil shock?. *Journal of econometrics*, 113(2), 363-398.

- [14] Berndt, E. R., & Wood, D. O. (1979). Engineering and econometric interpretations of energy-capital complementarity. *The American Economic Review*, 69(3), 342-354.
- [15] Mankiw, N. G. (1997). [The Neoclassical Revival in Growth Economics: Has It Gone Too Far?]: Comment. *NBER Macroeconomics Annual*, 12, 103-107.
- [16] Schelling, T. C. (2002). What Makes Greenhouse Sense-Time to Rethink the Kyoto Protocol. *Foreign Aff.*, 81, 2.
- [17] Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2010). *Fundamentals of engineering thermodynamics*. John Wiley & Sons.
- [18] Ayres, R. U., Van den Bergh, J. C., Lindenberger, D., & Warr, B. (2013). The underestimated contribution of energy to economic growth. *Structural Change and Economic Dynamics*, 27, 79-88.
- [19] Tintner, G., Deutsch, E., Rieder, R., & Rosner, P. (1977). A production function for Austria emphasizing energy. *De Economist*, 125(1), 75-94.
- [20] Kümmel, R., Lindenberger, D., & Eichhorn, W. (2000). The productive power of energy and economic evolution. *Indian Journal of Applied Economics*, 8(2), 1-26.
- [21] Lindenberger, D., & Kummel, R. (2002). Energy-Dependent Production Functions and the Optimization Model" PRISE" of Price-Induced Sectoral Evolution. *International Journal of Applied Thermodynamics*, 5, 101-108.
- [22] Ayres, R. U., & Warr, B. (2005). Accounting for growth: the role of physical work. *Structural Change and Economic Dynamics*, 16(2), 181-209.
- [23] Kümmel, R., Schmid, J., Ayres, R. U., & Lindenberger, D. (2008). *Cost shares, output elasticities, and substitutability constraints* (No. 08, 02). EWI Working Paper.
- [24] Stern, D. I. (1997). Limits to substitution and irreversibility in production and consumption: a neoclassical interpretation of ecological economics. *Ecological economics*, 21(3), 197-215.
- [26] Grubler, A., Johansson, T. B., Muncada, L., Nakicenovic, N., Pachauri, S., Riahi, K., ... & Strupeit, L. (2012). *Energy primer*.
- [27] Brockway, P., Dewulf, J., Kjelstrup, S., Siebentritt, S., Valero, A., & Whelan, C. (2016). In a resource-constrained world: Think exergy not energy. In *Report D/2016/13.324/5 Published by Science Europe, Brussels*.
- [28] Serrenho, A. C., Warr, B., Sousa, T., Ayres, R. U., & Domingos, T. (2016). Structure and dynamics of useful work along the agriculture-industry-services transition: Portugal from 1856 to 2009. *Structural Change and Economic Dynamics*, 36, 1-21.

- [31] Warr, B. S., & Ayres, R. U. (2010). Evidence of causality between the quantity and quality of energy consumption and economic growth. *Energy*, 35(4), 1688-1693.
- [32] Heun, M. K., & Brockway, P. E. (2019). Meeting 2030 primary energy and economic growth goals: Mission impossible?. *Applied Energy*, 251, 112697.
- [33] Santos, J., Borges, A., & Domingos, T. (2020). Exploring the links between total factor productivity, final-to-useful exergy efficiency, and economic growth: Case study Portugal 1960-2014.
- [34] Sakai, M., Brockway, P. E., Barrett, J. R., & Taylor, P. G. (2019). Thermodynamic efficiency gains and their role as a key 'engine of economic growth'. *Energies*, 12(1), 110.
- [35] Klein, L. R. (1950). *Economic fluctuations in the United States, 1921-1941*.
- [36] Lavoie, M. (2014). *Post-Keynesian economics: new foundations*. Edward Elgar Publishing.
- [37] Varga, R. S. (2009). Basic iterative methods and comparison theorems. In *Matrix Iterative Analysis* (pp. 63-110). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [38] Guevara, Z., Sousa, T., & Domingos, T. (2016). Insights on energy transitions in Mexico from the analysis of useful exergy 1971–2009. *Energies*, 9(7), 488.
- [39] Stresing, R., Lindenberger, D., & Kümmel, R. (2008). Cointegration of output, capital, labor, and energy. *The European Physical Journal B*, 66(2), 279-287.
- [40] Kander, A., & Stern, D. I. (2014). Economic growth and the transition from traditional to modern energy in Sweden. *Energy Economics*, 46, 56-65.
- [41] Berndt, E. R. (1990). Energy use, technical progress and productivity growth: a survey of economic issues. *Journal of Productivity Analysis*, 2(1), 67-83.
- [42] Turner, K., & Hanley, N. (2011). Energy efficiency, rebound effects and the environmental Kuznets Curve. *Energy Economics*, 33(5), 709-720.
- [43] Johansen, S. (1988). Statistical analysis of cointegration vectors. *Journal of economic dynamics and control*, 12(2-3), 231-254.
- [44] Greene, W. H. (2000). *Econometric analysis 4th edition*. International edition, New Jersey: Prentice Hall, 201-215.
- [45] Phillips, P. C., & Perron, P. (1988). Testing for a unit root in time series regression. *Biometrika*, 75(2), 335-346.
- [46] Juselius, K. (2006). *The cointegrated VAR model: methodology and applications*. Oxford university press.

- [47] AMECO. (2020). Annual Macro-economic Database of the European Commission's Directorate General for Economic and Financial Affairs. Retrieved from: https://ec.europa.eu/economy_finance/ameco/user/serie/SelectSerie.cfm
- [48] Feenstra, Robert C., Robert Inklaar and Marcel P. Timmer (2015), "The Next Generation of the Penn World Table" American Economic Review, 105(10), 3150-3182, available for download at www.ggdcc.net/pwt
- [49] EuroStat. (2019). European Statistics Database. Retrieved from: <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>
- [50] World Bank. World Development Indicators (2018). World Bank national accounts data, and OECD National Accounts data files. Retrieved from: <https://data.worldbank.org/indicator/>
- [51] DGEG. Direção-Geral de Energia e Geologia. (2019). Estatísticas e Preços – Estatística da Energia. Retrieved from: <http://www.dgeg.gov.pt/>
- [55] Global Carbon Atlas. (2018). Portugal - Territorial (MtCO₂). Retrieved from: <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>
- [56] da Silva, E. G., & Lains, P. (2013). Capital formation and long-run growth: Evidence from Portuguese data, 1910-2011. *IBEROMETRICS VI, Facultad de Economía y Empresa, Zaragoza, Spain*, 16-17.
- [57] Ayres, R., & Warr, B. (2006). *Economic Growth, Technological Progress and Energy Use in the US Over the Last Century: Identifying Common Trends and Structural Change in Macroeconomics Time Series*. INSEAD.