
Eficiência Económica e Ambiental do Mercado Elétrico Europeu

Rui Daniel Carvalho Oliveira

Dissertação

Mestrado em Economia

Orientado por

Prof. Dra. Isabel Soares

2019

Agradecimentos

A realização não só desta dissertação, mas também de todo o meu percurso acadêmico, não teria sido possível sem o apoio incondicional da minha família. Quero agradecer aos meus pais, irmã e avó por terem estado sempre ao meu lado, não apenas nos bons momentos, mas também nas alturas em que eu duvidava das minhas capacidades. Também gostaria de agradecer aos meus amigos mais próximos por me ajudarem a libertar a tensão acumulada pela universidade e a ter uma vida mais sorridente.

Agradeço também à minha orientadora, Dra. Isabel Soares, por ter apoiado a realização desta dissertação e ter contribuído com muito valor para a mesma e à Dra. Elvira Silva, por me ter dado a conhecer a metodologia utilizada nesta análise.

Gostaria de dedicar esta dissertação ao meu avô, que sempre me apoiou nos meus estudos. Apesar de não estar mais presente na minha vida, estará para sempre no meu coração.

Resumo

Nas últimas décadas, o mercado energético europeu tem passado por profundas reformas. Num curto espaço de tempo, passamos de uma série de mercados energéticos nacionais, focados nas suas próprias necessidades, para um mercado energético europeu comum, liberalizado e interligado, focado no aumento da eficiência e sujeito aos compromissos ambientais de cada estado-membro.

Esta dissertação de mestrado procura quantificar os níveis de eficiência na produção de eletricidade na União Europeia, de forma apurar quais os países mais eficientes e qual a estratégia utilizada por estes relativamente ao seu *mix* energético. Desta forma, será analisada a eficiência técnica e calculado o índice de Malmquist, para 24 países da UE, ao longo do período 1995-2016, usando o método *data envelopment analysis*. Como variáveis explicativas e explicadas serão consideradas as produções de energia nuclear, hídrica, restantes renováveis e fóssil, o produto interno bruto e os gases com efeito de estufa.

Através da análise dos resultados verificou-se, tendo em atenção o facto de nenhum país utilizar apenas um tipo de fonte energética, que a energia renovável permitiu alcançar maior produtividade e maior eficiência do que a energia nuclear. Estes resultados já seriam de se esperar, visto que as energias renováveis foram as que mais evoluíram ao longo do período analisado. Porém, apesar de a energia renovável ser a mais produtiva e eficiente, é importante realçar que energia nuclear poderia ter obtido resultados semelhantes se tivesse beneficiado do mesmo progresso tecnológico.

Códigos JEL: O13, P18, Q43, Q48

Palavras-chave: Ecoeficiência, Energia, Eletricidade, União Europeia, *Data Envelopment Analysis*.

Abstract

In the last few decades, the European energy market has undergone profound reforms. In a short amount of time, we moved from a series of national energy markets, focused on their own needs, to a common, liberalized and interconnected European energy market, focused on increasing the efficiency and subject to the environmental commitments of each member state.

This master's dissertation seeks to quantify the efficiency levels of the electrical production in the European Union in order to determine which countries are most efficient and which strategy they use in relation to their energy mix. For this purpose, it will be analyzed the technical efficiency and calculated the Malmquist index, for 24 EU countries, over the period 1995-2016, using the data envelopment analysis method. The variables used will be nuclear, hydro, remaining renewable and fossil energy production, gross domestic product and greenhouse gases.

Through the analysis of the results it was found, bearing in mind that no country uses only one type of energy source, that renewable energy achieved higher productivity and higher efficiency than nuclear energy. These results were already expected, as renewable energies evolved the most over the period analyzed. However, while renewable energy is the most productive and efficient, it is important to emphasize that nuclear energy could have achieved similar results if it had benefited from the same technological progress.

JEL Codes: O13, P18, Q43, Q48

Key-words: Eco-efficiency, Energy, Electricity, European Union, Data Envelopment Analysis.

Índice

1. Introdução	1
2. Revisão de Literatura.....	3
3. Metodologia.....	13
3.1. Eficiência Técnica.....	14
3.2. Índice de Malmquist	16
4. Amostra e Variáveis Utilizadas	18
5. Resultados Empíricos.....	21
5.1. Eficiência Técnica	22
5.2. Índice de Malmquist	30
6. Conclusão.....	41
Referências Bibliográficas	43
Anexos	47
I. Eficiência Técnica	47
II. Índice de Malmquist.....	50

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Média geométrica da eficiência técnica (1995-2016).....	22
Gráfico 2. Média geométrica anual da eficiência técnica (1995-2016).....	27
Gráfico 3. Média geométrica do índice de Malmquist (1995-2016).....	30
Gráfico 4. Média geométrica da variação de eficiência técnica (1995-2016).....	33
Gráfico 5. Média geométrica da variação tecnológica (1995-2016).....	35
Gráfico 6. Média geométrica da variação da produtividade total dos fatores (M) e da variação tecnológica (TECH) durante o período 1995-2016.....	36
Gráfico 7. Média geométrica anual do índice de Malmquist (1995-2016).....	37
Gráfico 8. Média geométrica anual da variação da eficiência técnica (1995-2016).....	38
Gráfico 9. Média geométrica anual da variação tecnológica (1995-2016).....	39

Índice de Tabelas

Tabela 1. Nomenclatura dos países da amostra.....	18
Tabela 2. Produção elétrica, por fonte energética, dos países com maior eficiência (2016).....	23
Tabela 3. Produção elétrica, por fonte energética, dos países com menor eficiência (2016).....	24
Tabela 4. Composição do grupo nuclear e do grupo renovável.....	25
Tabela 5. Produção elétrica, por fonte energética, dos países do grupo nuclear (2016).....	25
Tabela 6. Produção elétrica, por fonte energética, dos países do grupo renovável (2016)...	26
Tabela 7. Produção elétrica, por fonte energética, dos países com variação positiva do índice de Malmquist (2016).....	31
Tabela 8. Produção elétrica, por fonte energética, dos países com maior variação negativa do índice de Malmquist (2016).....	32
Tabela 9. Produção elétrica, por fonte energética, dos países com maior variação positiva da eficiência técnica (2016).....	33
Tabela 10. Produção elétrica, por fonte energética, dos países com maior variação negativa da eficiência técnica (2016).....	34

1. Introdução

Nas últimas décadas, o mercado energético europeu tem passado por profundas reformas. Em primeiro lugar, a partir de 1996, com a diretiva 96/92/EC da Comissão Europeia, foi estabelecido o objetivo de criar um mercado energético europeu comum e competitivo, ou seja, liberalizar e interligar um conjunto de diferentes mercados focados apenas em satisfazer as necessidades energéticas nacionais. Em segundo lugar, devido ao aumento do conhecimento sobre as alterações climáticas e do seu risco para o nosso futuro, países e organizações começaram a introduzir o compromisso da descarbonização nas suas agendas. Desta forma, num espaço temporal relativamente reduzido, passamos de uma série de mercados energéticos nacionais, focados nas suas próprias necessidades, para um mercado energético europeu comum, liberalizado e interligado, focado no aumento da eficiência e sujeito aos compromissos ambientais de cada estado-membro.

Esta dissertação de mestrado procura quantificar os níveis de eficiência na produção de eletricidade na União Europeia, de forma apurar quais os países mais eficientes e qual a estratégia utilizada por estes relativamente ao seu *mix* energético. O consenso da comunidade científica é que a energia renovável é a nossa melhor arma contra as mudanças climáticas. Porém, também há quem afirme que a energia nuclear é uma boa alternativa, pois permite produzir facilmente largas quantidades de eletricidade a custo reduzido e com pouco impacto ambiental. Apesar das preocupações da população relativamente a esta fonte energética, são vários os países que optaram por seguir este caminho de forma a mitigar as alterações climáticas. Deste modo, um dos principais objetivos deste estudo é apurar qual a melhor fonte energética para investir de forma a atingir as metas ambientais e a manter um nível de crescimento da economia sustentável a longo prazo.

Com o intuito de cumprir os objetivos referidos anteriormente, será analisada a eficiência técnica e calculado o índice de Malmquist e as suas componentes, para 24 países da UE, ao longo do período 1995-2016. Para tal, será utilizado o método *data envelopment analysis*, que permite a estimação de uma fronteira de produção linear, não paramétrica e com múltiplos inputs e outputs. Esta análise será realizada na ótica do output, procurando maximizar os mesmos, mantendo constantes os inputs. Como variáveis explicativas e explicadas serão consideradas as produções de energia nuclear, hídrica, restantes renováveis e fóssil, o produto interno bruto e os gases com efeito de estufa.

Na realização da revisão de literatura desta dissertação deparei-me com poucos estudos que se focam apenas no mercado elétrico, sendo que a maioria opta por analisar o mercado energético como um todo. Apesar de o mercado elétrico ser o maior componente do mercado energético, a análise do ultimo não permite aferir com total certeza conclusões válidas para o primeiro. Por outro lado, apesar da grande popularidade do método *data envelopment analysis*, que permite a quantificação da eficiência de uma forma eficaz e de fácil compreensão, ainda há algum ceticismo em relação à utilização do mesmo, sendo normalmente preferido pelos autores a utilização de abordagens econométricas. Deste modo, entendo que esta dissertação traz uma visão inovadora pelo facto de optar por utilizar um método válido, com reputação, mas que ainda é encarado com alguma desconfiança na área abordada. Outro fator que distingue esta dissertação de estudos realizados no mesmo domínio é a desagregação dos setores elétrico e energético.

A conjugação dos objetivos europeus e nacionais de liberalização e descarbonização motivaram a realização desta análise que tem como objetivo conciliar a eficiência económica com a eficiência ambiental. É esperado que as conclusões deste trabalho contribuam, não só para o aumento do conhecimento científico nesta área, mas que também auxiliem os legisladores a estabelecer metas ambientais que promovam a descarbonização e o aumento da eficiência.

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, incluindo a presente introdução. No segundo capítulo será apresentada a revisão de literatura, que terá como foco a liberalização do mercado energético europeu, a relação entre o crescimento económico e o consumo energético, a ordem de mérito das energias renováveis, a segurança energética e a ecoeficiência. No terceiro capítulo será explicada a metodologia adotada, sendo esta o método *data envelopment analysis*. No quarto capítulo serão especificadas as variáveis utilizadas e a amostra adotada, constituída por 24 Estados-Membros da União Europeia. No quinto capítulo serão expostos e comentados os resultados obtidos através to método *data envelopment analysis* para a eficiência técnica e o índice de Malmquist. Por fim, no sexto capítulo serão apresentadas as conclusões desta dissertação e as recomendações para legisladores e futuros estudos na área.

2. Revisão de Literatura

Energia e eletricidade são frequentemente representadas como sinónimos no nosso vocabulário. Porém, esta afirmação é a mais incorreta. Segundo a OCDE (2008b), são consideradas como fontes energéticas os combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, eletricidade, urânio, entre outros. Por outro lado, a eletricidade corresponde à energia proveniente de centrais térmicas, hidroelétricas, nucleares, entre outras. Desta forma, eletricidade é um produto resultante da transformação da energia. Nesta revisão de literatura serão analisados artigos tanto sobre energia, como sobre eletricidade. Porém, apenas será alvo da análise posterior a eletricidade.

Em resultado do aumento do conhecimento sobre as alterações climáticas e do seu risco para o nosso futuro, países e organizações começaram a introduzir o compromisso de descarbonização nas suas agendas, o que levou à criação de legislação nacional e a vários acordos mundiais. De acordo com a Comissão das Comunidades Europeias (2008), a União Europeia (EU) compromete-se a reduzir em pelo menos 20% as suas emissões de gases com efeito de estufa, a que as energias renováveis representem 20% do seu consumo energético e a aumentar a sua eficiência energética em 20% até 2020. De forma a conseguir atingir estes objetivos, em vez de os definir como intenções, tornou-os juridicamente vinculativos, de forma a todos os Estados-Membros (EM) se esforcem para os cumprir. Estes esforços são também equilibrados e proporcionais, tendo em atenção as características únicas de cada EM. Apesar de o objetivo principal da UE ser a descarbonização, o comunicado aponta também outros, tal como ganhar uma vantagem competitiva num mundo onde cada vez mais países comprometem-se a adotar medidas semelhantes. Outro objetivo indicado é a diminuição da dependência da UE nas importações de recursos fósseis, tornando-a menos vulnerável à alteração dos preços e à interrupção do fluxo dos mesmos, aumentando desta forma a sua segurança energética. Para além destes compromissos, a UE compromete-se a ir mais além até 2030, com os objetivos de reduzir em pelo menos 40% as suas emissões de gases com efeito de estufa e a que as energias renováveis representem pelo menos 27% do seu consumo energético (Comissão Europeia, 2014). Segundo a European Environment Agency (2017), a UE está num bom caminho, tendo já cumprido a meta da redução dos gases com efeito de estufa em 2015. Porém, é esperado que a meta de aumento de 20% da eficiência energética não

seja cumprida. A nível nacional, é previsto que 17 EM cumpram todas as metas propostas até 2020.

Contudo, a descarbonização não é o único desafio do mercado energético europeu. Em 1996, a diretiva 96/92/EC da Comissão Europeia estabelece o objetivo de criar um mercado energético europeu comum e competitivo, ou seja, liberalizar e interligar um conjunto de diferentes mercados focados apenas em satisfazer as necessidades energéticas nacionais. Como consequência, os produtores energéticos europeus passaram a encontrar-se num cenário de crescente competição, o que levou a uma série de fusões e aquisições para que estes, que até então operavam geralmente apenas a nível nacional e com elevado poder de mercado, ganhassem acesso a novos mercados e aumentassem a sua eficiência. Monastyrenko (2017) analisou os efeitos desta liberalização na ecoeficiência dos produtores de eletricidade europeus, durante o período de 2005-2013, utilizando o método *data envelopment analysis* (DEA). Observou uma tendência decrescente da ecoeficiência ao longo do período, concluindo que uma fusão conduz, por um lado, a uma diminuição da ecoeficiência no curto prazo e, por outro lado, a um aumento da mesma, embora menor, no médio prazo. Relativamente às fusões transfronteiriças, verificou que o seu impacto na ecoeficiência é menor do que o das fusões nacionais. Recomenda que os legisladores tratem as fusões e aquisições nacionais e transfronteiriças com diferente atenção de forma a promoverem o aumento da ecoeficiência. Por outro lado, Kwoka e Pollitt (2010), numa análise semelhante para os Estados Unidos da América, durante o período 1994-2003, marcado por legislação com o intuito de aumentar a liberalização do sector elétrico norte-americano, obtiveram resultados opostos. Verificaram que as empresas mais eficientes não estavam a comprar as menos eficientes, mas sim o oposto, observando uma diminuição da eficiência após as fusões, não recuperada no médio prazo como tinha verificado por Monastyrenko (2017). Apontam como potenciais causas a existência de erros na reestruturação das empresas adquiridas e a fusões defensivas com o intuito de manter o poder de mercado. Recomendam aos legisladores que tenham cuidado acrescido durante períodos de liberalização e que mantenham algum ceticismo relativamente à ideia tradicional de que as fusões melhoram sempre a eficiência das empresas envolvidas.

Muitos estudos científicos focam-se na relação entre o consumo de energia e o crescimento económico. Contudo, o foco apenas nessas variáveis tem levado a críticas que muitos autores tentam superar com a inserção de variáveis de controlo nos seus modelos.

Omri (2014) efetuou uma revisão alargada da literatura realizada entre 1978 e 2012 onde são estudadas as relações entre o crescimento económico e o consumo energético. Nesta análise verificou que não existe nenhum consenso entre a existência ou a dimensão da casualidade entre estas duas variáveis, possivelmente devido às diferentes metodologias e amostras adotadas. Tiba e Omri (2017) obtiveram as mesmas conclusões na sua análise da literatura realizada entre 1978 e 2014 onde são estudadas as relações entre o crescimento económico, o consumo energético e as condições ambientais. Relativamente a estudos em concreto, Mariam Camarero, Forte, Garcia-Donato, Mendoza e Ordoñez (2015) procuraram realizar uma análise probabilística, selecionando um vasto leque de variáveis explicativas. Para tal, efetuaram uma análise agregada e setorial para os Estados Unidos da América durante o período 1949-2010. Concluíram, tal como era de se esperar com base na vasta literatura existente, que o consumo energético é uma variável com grande importância para a análise do crescimento económico. Também verificaram que as variáveis explicativas relevantes variam em função do setor económico estudado, destacando a importância de uma análise desagregada. Por fim, realçam a necessidade de os legisladores contemplarem um vasto leque de variáveis macroeconómicas e não apenas energéticas, que podem variar de setor para setor.

O crescimento exponencial das energias renováveis nas últimas décadas é normalmente entendido como uma consequência do aumento da consciencialização ambiental. Porém, outros fatores podem ter impacto neste aumento. Aguirre e Ibikunle (2014) analisaram os fatores que determinam o crescimento das energias renováveis em 38 países da OCDE, da UE e dos BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul) durante o período 1990-2010. O que diferencia este estudo de outros realizados anteriormente é a inclusão dos países BRICS, o que permite analisar melhor a heterogeneidade entre países e o impacto do nível de desenvolvimento de um país nas suas políticas energéticas e ambientais. Consideraram que as variáveis que influenciam o crescimento das energias renováveis pertencem a três classes distintas: fatores políticos, fatores socioeconómicos e fatores específicos do país. Concluíram que algumas políticas energéticas governamentais têm um impacto negativo no investimento em energias renováveis. Também verificaram que as emissões de gases com efeito de estufa são indicadores significativos da participação das energias renováveis, enquanto que a quantidade de energia importada não o é, o que sugere que as preocupações ambientais são mais relevantes do que a segurança energética para os países analisados. Por fim, verificaram uma correlação negativa entre a participação das

energias renováveis e o uso de energia, o que sugere que durante períodos de pressão energética os países analisados optam preferencialmente por utilizar mais energias fósseis devido às suas vantagens em termos de custos. Numa análise com o mesmo propósito da anterior, Damette e Marques (2019) estudaram 24 países europeus durante o período 1990-2012. Concluíram que, tal como era de esperar, existe uma correlação negativa e estatisticamente significativa entre as emissões de gases com efeito de estufa e a produção de energia renovável. Por outro lado, observaram que a anterior apresenta uma correlação positiva com o PIB *per capita*, o consumo energético e a dependência energética. Por fim, verificaram que a preocupação ambiental não tem um impacto significativo na promoção das energias renováveis. A correlação positiva entre o PIB *per capita* e os gases com efeito de estufa também foi observada por Kais e Sami (2016) na sua análise de 58 países durante o período 1990-2012.

Uma ideia presente na literatura analisada é que existe uma ordem de mérito das energias renováveis. De acordo com Roldan-Fernandez, Burgos-Payan, Riquelme-Santos e Trigo-Garcia (2016a), a integração no *mix* elétrico de energia renovável, com custos marginais bastante baixos (ou até mesmo nulos), provoca uma deslocação da curva da oferta para a direita, causando uma diminuição dos preços e um aumento da eletricidade comercializada. Esta diminuição dos preços é causada pelos custos marginais muito reduzidos da energia renovável, o que dá uma vantagem competitiva a este tipo de produção e expulsa do mercado parte dos produtores tradicionais, com custos marginais mais elevados e maior emissão de gases de efeito de estufa. No seu estudo analisaram o efeito desta ordem de mérito no mercado elétrico ibérico, para o ano de 2014, utilizando um modelo baseado na linearização do mercado em torno do seu equilíbrio. Observaram, tal como tinham previsto, que a introdução de energia renovável provocou uma deslocação para a direita da curva da oferta de eletricidade, em resultado dos seus custos marginais mais reduzidos, causando uma diminuição do preço de mercado e um aumento da quantidade transacionada. Num estudo complementar, Roldan-Fernandez, Burgos-Payan, Riquelme-Santos e Trigo-Garcia (2016b) compararam a integração de energia renovável com os planos de eficiência energética. Para tal, utilizaram o mesmo método, período e amostra do estudo anterior de forma a analisar vários cenários com o objetivo de quantificar os seus impactos no mercado elétrico ibérico. Observaram que a eletricidade comercializada e o seu preço decrescem linearmente em função da quantidade de energia poupada, ou seja, com o aumento da eficiência energética. Desta forma, concluíram que o

aumento da eficiência energética apresenta, comparativamente com o aumento da energia renovável, não só melhores retornos económicos, devido a redução do preço e dos custos energéticos, mas também melhores retornos ambientais, graças a redução da quantidade de energia fóssil utilizada e das suas emissões de gases com efeito de estufa.

Resultados semelhantes em relação aos preços foram obtidos por Sensfuß, Ragwitz e Genoese (2008), para a Alemanha, durante o período 2001-2006. Contudo, decidiram ir mais além, examinando outros fatores, tais como os preços dos combustíveis, através de uma análise da sensibilidade à variação dos mesmos. Verificaram que a variação dos preços do gás e do carvão têm um impacto considerável na ordem de mérito, possivelmente devido ao peso destes recursos na produção de eletricidade na Alemanha. Desta forma, caso os preços destes recursos desçam demasiado, os ganhos gerados pelo aumento da energia renovável diminuem de forma considerável. Por fim, concluem que, apesar dos custos significativos dos esquemas de incentivo às energias renováveis, que são transmitidos aos consumidores finais através dos preços, se for considerada a ordem de mérito das energias renováveis e o seu impacto na diminuição dos preços da eletricidade, estes custos podem ser mitigados, sendo até possível observar ganhos líquidos.

Gelabert, Labandeira e Linares (2011) analisaram os efeitos da introdução de energia renovável e da cogeração nos preços da eletricidade na Espanha durante o período 2005-2009, utilizando um modelo de regressão multivariável. Obtiveram relativamente aos preços os mesmos resultados que Roldan-Fernandez et al. (2016a) e Sensfuß et al. (2008). Contudo, o que diferencia este estudo dos anteriores foi a conclusão de que, apesar do aumento contínuo da contribuição da energia renovável no *mix* elétrico espanhol, a diminuição nos preços fez-se a um ritmo decrescente. Apontaram como possíveis causas o aumento da contribuição de centrais de ciclo-combinado na produção elétrica espanhola e a eventual exerceção de poder de mercado por parte dos produtores tradicionais. Verificaram também que os custos evitados pela redução do preço da eletricidade não compensaram os custos dos esquemas de apoio à energia renovável, salientando que para ter ganhos líquidos devem ser tidas em consideração as tecnologias promovidas e a configuração dos apoios.

Um fator importante que não foi considerado em nenhum dos estudos anteriores foi o comportamento dos produtores já instalados no mercado. É de esperar que a entrada em massa de concorrentes com custos marginais mais reduzidos os possa retirar do mercado, mas é importante realçar que os mercados elétricos europeus são constituídos por empresas

com grande poder de mercado, podendo estas adotar comportamentos estratégicos de forma a defenderem-se. Esta vertente é explorada por Ciarreta, Espinosa e Pizarro-Irizar (2017), na Espanha, durante o período 2002-2013. Verificaram uma diminuição do declive da curva da procura após a entrada em massa de energia renovável, o que aponta para uma eventual alteração do comportamento competitivo dos produtores já estabelecidos. Apesar de, teoricamente, com a entrada das energias renováveis, o mercado elétrico espanhol se encontrar numa situação mais competitiva, na prática, verificaram o oposto. Esta diminuição na competição pode ser explicada pelo facto de os produtores tradicionais terem maiores retornos no mercado secundário, mas, devido à legislação em vigor, não poderem aceder a ele sem oferecerem toda a sua produção no mercado primário. Desta forma, estes podem ter ajustado os seus preços de forma a não conseguirem vender no mercado primário e a ficarem elegíveis para o mercado secundário. Recomendam que os legisladores tenham em atenção o comportamento estratégico dos produtores de eletricidade na elaboração de esquemas de incentivo às energias renováveis e na definição de objetivos energéticos.

A importância do balanço entre os custos dos incentivos às energias renováveis e a redução dos preços da eletricidade referidos por Sensfuß et al. (2008) e Gelabert et al. (2011) são quantificados no estudo de Ciarreta, Espinosa e Pizarro-Irizar (2014), para a Espanha, durante o período 2008-2012. Concluíram que estes incentivos são sustentáveis, ou seja, a poupança nos custos elétricos compensa os custos dos incentivos, mas apenas até um determinado ponto, sendo que a Espanha o ultrapassou em 2010. Verificaram também que este ponto varia de tecnologia para tecnologia, sendo que a energia eólica e a pequena hidroelétrica apresentaram ganhos líquidos durante quase todo o período analisado. Realçam que algumas destas tecnologias poderão já estar desenvolvidas o suficiente para competirem no mercado sem o auxílio de incentivos.

Relativamente ao tipo de incentivos e de medidas públicas utilizadas na promoção das energias renováveis, Marques e Fuinhas (2012) testaram empiricamente o seu impacto em 23 países europeus durante o período 1990-2007. Por um lado, verificaram que certas medidas como o estabelecimento de quotas e programas de R&D não tiveram o impacto esperado na promoção das energias renováveis. Por outro lado, medidas como incentivos e subsídios foram eficazes na provação das energias renováveis. Por fim, verificaram que a dependência energética, normalmente nas fontes tradicionais de energia, tem um impacto

negativo no desenvolvimento das energias renováveis, atuando como uma barreira à entrada das mesmas. Resultados semelhantes foram obtidos por Polzin, Migendt, Täube e Von Flotow (2015) para 32 países da OCDE durante o período 2000-2011, por Kilinc-Ata (2016) para 27 países da EU e para os EUA durante o período 1990-2008 e por Bolkesjø, Eltvig e Nygaard (2014) para os cinco países europeus com maior consumo elétrico (Espanha, França, Itália, Alemanha e Reino Unido). Todos recomendam que estas medidas sejam específicas para cada tecnologia, que sejam definidos objetivos claros e transparentes a longo prazo e a que se tenha em conta as condições de mercado

Um outro objetivo realçado como essencial pela UE é o aumento da sua segurança energética (Comissão das Comunidades Europeias, 2008). Porém, este é um conceito que carece de uma definição universal. A forma mais simples de o definir seria o “fornecimento adequado de energia a custos razoáveis” (Obadi e Korček, 2017, p. 114), mas cada um dos estudos efetuados nesta área incluiu objetivos adicionais no conceito de segurança energética. Com o intuito de alcançar uma definição universal, Ang, Choong e Ng (2015), analisaram 104 estudos, realizados durante o período de 2001-2014, no âmbito da segurança energética. Identificaram várias dimensões principais utilizadas na definição do conceito de segurança energética, tais como a disponibilidade, a infraestrutura, os preços e o impacto ambiental da energia. A disponibilidade energética está fortemente relacionada com a diversificação das fontes de energia, quer domésticas, quer internacionais, e com o contexto geopolítico, sendo que ambos podem causar uma interrupção do fluxo de energia. As infraestruturas de produção e de transmissão energéticas são essenciais para uma produção e um fluxo de energia estável e sem interrupções no curto e no longo prazo. O preço da energia está sujeito às flutuações do valor das matérias-primas e ao nível de competição no mercado energético. No caso das energias renováveis, não existem custos das matérias-primas, mas mantem-se a competição com as fontes energéticas tradicionais. Por outro lado, as fontes de energia que utilizam recursos fósseis estão bastante sujeitas à volatilidade dos seus preços e, caso estes recursos sejam importados, às taxas de câmbio. Por fim, os impactos ambientais podem ser causados quer pela energia não renovável, como a emissão de gases com efeito de estufa, que contribuem para as mudanças climáticas, quer pela energia renovável, como as inundações causadas por projetos hidroelétricos.

Obadi e Korček (2017) analisaram a segurança energética de 26 países da UE durante o período 2005-2014. Focaram-se nas dimensões de disponibilidade, preço e impacto ambiental da energia e num período marcado por uma subida acentuada do preço do petróleo (seguida por uma forte descida) e pela crise financeira. Concluíram que os países com maior segurança energética tiveram uma melhor performance na dimensão da disponibilidade, destacando-se aqueles com reservas de recursos energéticos, quer sejam estes renováveis ou não renováveis. Pelo contrário, os países que aderiram mais recentemente à UE apresentam piores resultados devido ao grande aumento do peso do setor industrial nas suas economias e à consequente subida das suas emissões de gases com efeito de estufa, prejudicando-os bastante na vertente do impacto ambiental.

Um dos objetivos mais comum dos estudos desta área é a quantificação da ecoeficiência. De acordo com a OCDE (2008a), ecoeficiência corresponde à “eficiência em que os recursos ecológicos são utilizados de forma a satisfazer as necessidades humanas”. Por outras palavras, equivale à capacidade de empresas ou países produzirem bens ou serviços com o menor impacto ambiental e consumo de recursos naturais possíveis. Por outro lado, a OCDE (2008b) define eficiência como o alcance do “máximo de output a partir de uma determinada quantidade de recursos”. Desta forma o que diferencia os conceitos de eficiência e ecoeficiência é a internalização dos impactos ambientais. Robaina-Alves, Moutinho e MacEdo (2015) procuraram estimar esta ecoeficiência, para 26 EM da UE, durante o período 2000-2011, utilizando o método DEA. Como durante o período analisado ocorre, em 2005, a implementação do Protocolo de Quioto, foi possível analisar o seu impacto na ecoeficiência. Concluíram que os países mais eficientes antes e depois do acordo são os mesmos, o que indica que já possuíam uma boa vantagem em relação aos outros. Porém, alguns países também conseguiram entrar neste grupo, o que indica que efetuaram reformas que permitiram com que a sua ecoeficiência crescesse de forma superior aos restantes. Estas reformas basearam-se principalmente no aumento da produtividade do capital, na redução da intensidade da energia fóssil e no aumento do uso de energia renovável. Apesar disto, alguns países verificaram uma diminuição da sua ecoeficiência após a implementação do acordo, devido ao inverso do referido anteriormente.

Num estudo semelhante, Beltrán-Esteve e Picazo-Tadeo (2017) analisaram a ecoeficiência dos 28 países da UE durante o período 2001-2013, utilizando o método DEA

e os indicadores de produtividade de Luenberger. Este estudo difere de Robaina-Alves et al. (2015) devido à consideração de outras pressões ambientais para além do aquecimento global, tais como a formação de ozono, a acidificação e a formação de partículas. Concluíram que a performance ambiental melhorou na amostra agregada durante o período analisado, em grande parte devido ao progresso técnico, enquanto que o efeito *catching up* teve um impacto mais reduzido.

Através da combinação do método DEA com uma abordagem econométrica, M. Camarero, Castillo, Picazo-Tadeo e Tamarit (2013) examinaram a convergência da ecoeficiência de 22 países da OCDE ao longo de 1980-2005. Consideraram na análise três gases com efeito de estufa, sendo um dos quais o dióxido de carbono (CO₂). Concluíram que a ecoeficiência melhorou ao longo do período analisado, em grande parte devido à diminuição das emissões de CO₂, o gás com efeito de estufa mais emitido e, portanto, sujeito a maiores restrições. Apuraram também uma tendência de convergência entre os países mais eficientes e entre os países menos eficientes, o que parece indicar a existência de uma UE a mover-se em ritmos diferentes.

Por outro lado, Burgos-Payán, Roldán-Fernández, Trigo-García, Bermúdez-Ríos e Riquelme-Santos (2013) combinam a ordem de mérito da energia renovável com a ecoeficiência, em Espanha, durante a primeira década do século XXI. Concluíram que a integração de energia renovável na Espanha teve efeitos muito favoráveis a nível económico, social e ambiental. Verificaram os mesmos efeitos nos preços apurados por Roldan-Fernandez et al. (2016a) e Sensfuß et al. (2008), o que permitiu à Espanha diminuir a sua dependência na importação de recursos fósseis. A energia renovável também permitiu à Espanha reduzir as suas emissões de gases com efeito de estufa, o que contribuiu para cumprimento das metas ambientais estabelecidas e para uma melhoria da ecoeficiência.

A maioria dos estudos referidos anteriormente realiza uma análise agregada, o que permite observar o panorama global de uma amostra. Porém, como estes estudos têm como propósito informar e auxiliar os legisladores na criação de propostas e incentivos que permitam atingir um determinado objetivo, uma análise setorial tem a vantagem de providenciar a informação necessária para a execução de medidas específicas para cada sector, o que pode ajudar a atingir melhores resultados. Desta forma, Burke e Csereklyei (2016) estimaram, a elasticidade setorial entre o uso de energia e o PIB, para 132 países durante o período 1960-2010. Para tal, foram considerados cinco sectores: residencial,

agricultura, transporte, industrial e serviços. É de salientar a grande heterogeneidade e amplitude da amostra utilizada, considerando um vasto leque de países desenvolvidos e em desenvolvimento. Relativamente ao setor residencial, verificaram uma elasticidade muito reduzida devido à dependência de muitas economias em desenvolvimento nos combustíveis tradicionais. Com a exclusão destes combustíveis, verificaram uma maior elasticidade, o que sugere que o crescimento económico induz as famílias a utilizarem fontes de energia de qualidade superior, tendo estas a vantagem de produzir menos gases com efeito de estufa. Por outro lado, o uso energético do setor da agricultura foi bastante reduzido, tendo este obtido uma elasticidade também reduzida. Nos restantes setores, a elasticidade entre a energia e o PIB foi superior. Por fim, como a elasticidade agregada no longo prazo foi menor que a unidade, verificaram que o crescimento económico provoca uma redução da intensidade energética.

Num estudo semelhante, Gutiérrez-Pedrero, Tarancón, Del Río e Alcántara (2018) analisaram a intensidade elétrica dos setores não residenciais em 18 países da UE durante o período 1995-2011, com o objetivo de determinar os principais fatores que afetam essa intensidade. Este estudo tem a vantagem, relativamente ao de Burke e Csereklyei (2016), de considerar uma amostra mais homogênea. Verificaram que a acumulação da capital tem um impacto positivo na intensidade elétrica, enquanto que o progresso tecnológico tem um impacto negativo. Por outro lado, observaram que o preço da eletricidade tem um impacto muito reduzido na intensidade elétrica. Por fim, recomendam que os legisladores adotem medidas direcionadas tanto para o lado da procura, como para o lado da oferta, visto que ambas são necessárias para a redução da intensidade elétrica e para a transição para um sistema elétrico descarbonizado.

3. Metodologia

Nesta dissertação será utilizado o método *data envelopment analysis* (DEA), desenvolvido por Charnes, Cooper e Rhodes (1978), que permite a estimação de uma fronteira de produção linear, não paramétrica e com múltiplos inputs e outputs. Podem ser utilizados neste método rendimentos constantes à escala (Charnes et al., 1978) e rendimentos variáveis à escala (Cooper, Seiford e Tone, 2007). De acordo com Coelli (1996), rendimentos constantes à escala são ideais nas situações em que todas as observações estão a operar no seu potencial máximo, mas tal pode não ocorrer devido a assimetrias de informação, falhas de mercado, entre outros. Por outro lado, segundo Robaina-Alves et al. (2015), rendimentos variáveis à escala têm a vantagem de “capturar em parte a heterogeneidade” das observações da amostra. Os resultados obtidos através deste método podem ser expressos em duas óticas: a do input e a do output. Por um lado, na ótica do input, procura-se minimizar os inputs, mantendo constantes os outputs. Por outro lado, na ótica do output, pretende-se maximizar os outputs, mantendo constantes os inputs. Ambas são o inverso uma da outra, o que não altera o *ranking* dos elementos da amostra mas sim a forma como é feita a interpretação dos resultados.

Serão analisados nesta dissertação, utilizando o método DEA, 24 países da UE. Dada a heterogeneidade da amostra, serão utilizados rendimentos variáveis à escala. Desta forma, é assumido que países com diferentes características podem obter o máximo de eficiência, ou seja, não há apenas uma forma de ser eficiente. Relativamente à ótica, será utilizada a do output. Não existe uma vantagem específica relativamente ao tipo de ótica escolhida, mas dado o que é pretendido nesta dissertação, a ótica do output permite fazer uma melhor interpretação dos resultados.

3.1. Eficiência Técnica

Antes de descrever a eficiência técnica, é necessário ter uma noção do que é um conjunto de outputs. Um conjunto de outputs, $P(x)$, corresponde ao conjunto de todos vetores de outputs que são possíveis produzir com, pelo menos, um dado vetor de inputs, podendo ser representado da seguinte forma:

$$P(x) = \{ y \in \mathfrak{R}_+^m : (x, y) \in Y \} \quad (1)$$

sendo $x \in \mathfrak{R}_+^n$ um vetor de input, $y \in \mathfrak{R}_+^m$ um vetor de outputs, (x, y) um plano de produção tecnologicamente possível e Y o conjunto de possibilidades de produção. Desta forma, observações que se encontrem na isoquanta de $P(x)$ são eficientes, visto que produzem o máximo de output possível dada a quantidade de input. Esta isoquanta equivale à fronteira de possibilidades de produção.

Desta forma, a eficiência técnica, $TE(x, y)$, segundo a ótica do output, representa o montante máximo que um vetor de outputs pode ser radialmente expandido, mantendo constante o vetor de inputs. $TE(x, y)$ pode ser representada da seguinte forma:

$$TE(x, y) = \frac{1}{\max_{\theta} \{ \theta : \theta y \in P(x) \}, y \in P(x)} \quad (2)$$

sendo $P(x)$ o conjunto de outputs.

Com o propósito de estimar a eficiência técnica, será assumida uma amostra $S_K = \{ (x^k, y^k), k = 1, \dots, K \}$, com dimensão K , em que x^k e y^k correspondem aos vetores de inputs e outputs, respetivamente, da observação k . É pressuposto que todos os elementos dos vetores x^k e y^k são maiores ou iguais a zero. Desta forma, o estimador da eficiência técnica, $\widehat{TE}$, utilizando a ótica dos outputs e assumindo rendimentos variáveis à escala é representado da seguinte forma:

$$\widehat{TE}(x^k, y^k) = \frac{1}{\max \theta} \quad (3)$$

$$\text{s.a } \sum_{k=1}^K z^k y_m^k \geq \theta y_m^k, \quad m = 1, \dots, M;$$

$$\sum_{k=1}^K z^k x_n^k \leq x_n^k, \quad n = 1, \dots, N;$$

$$z^k \geq 0, \quad k = 1, \dots, K;$$

$$\sum_{k=1}^K z^k = 1, \quad k = 1, \dots, K.$$

Assim sendo, observações com um valor estimado de $TE = 1$ são eficientes, visto que não conseguem produzir mais outputs sem aumentar o consumo de inputs. Por outras palavras, estas observações encontram-se na isoquanta de $P(x)$, ou seja, na fronteira de possibilidades de produção. Nos casos em que o valor estimado de $TE < 1$ existe ineficiência, podendo o vetor de outputs ser radialmente expandido, mantendo constante o vetor de inputs.

3.2. Índice de Malmquist

O Índice de Malmquist, M , permite analisar a variação da produtividade total dos fatores entre dois períodos consecutivos. Devido às suas características, apenas o é possível calcular com rendimentos constantes à escala. Utilizando a ótica do output, M pode ser representado da seguinte forma:

$$M^t(x^{t+1}, y^{t+1}, x^t, y^t) = \frac{TE^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{TE^t(x^t, y^t)} \quad (4)$$

sendo TE a eficiência técnica e t e $t+1$ dois períodos consecutivos. Deste modo, o índice em (4) compara a distância dos planos de produção (x^{t+1}, y^{t+1}) e (x^t, y^t) à fronteira de produção do período t . Isto traduz-se na variação da produtividade total de fatores entre t e $t+1$, usando como tecnologia de referência a tecnologia de produção do período t .

De forma análoga, pode ser utilizada como tecnologia de referência a tecnologia de produção do período $t+1$. Neste caso, o índice passa a ser representado do seguinte modo:

$$M^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, x^t, y^t) = \frac{TE^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{TE^{t+1}(x^t, y^t)} \quad (5)$$

Como os índices (4) e (5) são geralmente diferentes, uma vez que consideram tecnologias de referência distintas, e de forma a evitar a escolha arbitrária de um deles, o índice de Malmquist é, por convenção, dado pela média geométrica de ambos:

$$M(x^{t+1}, y^{t+1}, x^t, y^t) = \sqrt{\frac{TE^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{TE^t(x^t, y^t)} * \frac{TE^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{TE^{t+1}(x^t, y^t)}} \quad (6)$$

Desta forma, $M > 1$ representa um aumento da produtividade total dos fatores entre dois períodos consecutivos, enquanto que $M < 1$ representa uma diminuição.

Consequentemente, o índice de Malmquist pode, segundo Färe, Grosskopf, Norris e Zhongyang (1994), ser decomposto na variação tecnologia e no efeito *catching up*. Para tal, basta reescrever a expressão (6) como:

$$M = \frac{TE^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{TE^t(x^t, y^t)} \sqrt{\frac{TE^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{TE^{t+1}(x^t, y^t)} * \frac{TE^t(x^t, y^t)}{TE^{t+1}(x^t, y^t)}} \quad (7)$$

Consequentemente, é obtida a seguinte igualdade:

$$M = \text{EFFCH} * \text{TECH} \quad (8)$$

$$\text{com } \text{EFFCH} = \frac{\text{TE}^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{\text{TE}^t(x^t, y^t)}$$

$$\text{TECH} = \sqrt{\frac{\text{TE}^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{\text{TE}^{t+1}(x^t, y^t)} * \frac{\text{TE}^t(x^t, y^t)}{\text{TE}^{t+1}(x^t, y^t)}}$$

sendo que EFFCH representa “efficiency change” e TECH representa “technical change”.

EFFCH, ou “efficiency change”, corresponde à variação da eficiência técnica entre os períodos t e $t+1$. Por outras palavras, equivale ao efeito *catching up*, ou seja, a aproximação ou afastamento de um plano de produção à fronteira de referência. Assim, $\text{EFFCH} > 1$ representa uma aproximação à fronteira de referência, enquanto que $\text{EFFCH} < 1$ representa um afastamento. Por outro lado, TECH, ou “technical change”, equivale à variação tecnológica, ou seja, a deslocação da fronteira de produção entre t e $t+1$. Logo, $\text{TECH} > 1$ representa progresso técnico, enquanto que $\text{TECH} < 1$ representa retrocesso técnico.

Por fim, é de realçar que, de acordo com Färe, Grosskopf e Pasurka (2001), a fronteira de possibilidades de produção realizada com observações do período t pode não conter uma observação do período $t+1$, ou vice-versa, levando a um resultado com valor infinito. Alguns estudo empíricos, tal como o referido acima, optam por reportar o número de casos em que este problema ocorre. O mesmo será realizado nesta dissertação.

4. Amostra e Variáveis Utilizadas

Os dados analisados correspondem ao período 1995-2016 para 24 estados-membros da União Europeia: Alemanha, Áustria, Bélgica, Bulgária, Croácia, Dinamarca, Eslováquia, Eslovénia, Espanha, Estónia, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Itália, Letónia, Países Baixos, Polónia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Roménia e Suécia. Não serão incluídos na amostra o Chipre e a Malta por se encontrarem isolados do mercado elétrico europeu. Por outro lado, como esta análise é feita com base na produção de eletricidade e não no consumo, serão igualmente excluídos a Lituânia e o Luxemburgo por produzirem menos de 50% da eletricidade que consomem, com base no último ano em análise. Os países da amostra serão representados, em todos os gráficos e tabelas, pelas seguintes siglas:

Tabela 1. Nomenclatura dos países da amostra.

País	Sigla	País	Sigla
Alemanha	GE	Grécia	GR
Áustria	AU	Hungria	HU
Bélgica	BE	Irlanda	IR
Bulgária	BU	Itália	IT
Croácia	CR	Letónia	LA
Dinamarca	DE	Países Baixos	NE
Eslováquia	SK	Polónia	PL
Eslovénia	SV	Portugal	PT
Espanha	SP	Reino Unido	UK
Estónia	ES	República Checa	CZ
Finlândia	FI	Roménia	RO
França	FR	Suécia	SW

No que diz respeito aos inputs utilizados, estes serão definidos da seguinte forma:

- **N** – Percentagem de energia nuclear na produção total de eletricidade.
- **H** – Percentagem de energia hídrica na produção total de eletricidade.
- **R** – Percentagem de energia renovável (excluindo a hídrica) na produção total de eletricidade.
- **F x D** – Multiplicação da percentagem de energia fóssil na produção total de eletricidade (F), por um fator de desconto (D), de forma a interiorizar as emissões de gases com efeito de estufa. Este fator de desconto é definido como:

$$D = 1 - \frac{GHG_E}{GHG_T}$$

sendo que GHG_E corresponde às emissões de gases com efeito de estufa do setor elétrico e de aquecimento (devido à inexistência de fontes que os representem em separado) e GHG_T corresponde a todas as emissões de gases com efeito de estufa.

Nas energias renováveis são consideradas as energias solar, eólica e geotérmica. A energia hídrica, apesar de ser renovável, será considerada separadamente das restantes por ser a mais antiga e a mais utilizada. Por exemplo, em 2016, a energia hídrica foi responsável por 12% da produção de eletricidade da UE, enquanto que as restantes, apesar de produzirem mais, apenas corresponderam a 13% da produção. Por outro lado, não serão consideradas outras energias renováveis como por exemplo a biomassa e a energia das marés devido à participação muito reduzida que estas têm no *mix* elétrico europeu.

É também importante salientar que não são apenas as fontes de energia fósseis que têm impactos adversos no ambiente. Porém, esta análise terá apenas em consideração o impacto da energia fóssil, sob a forma de emissão de gases com efeito de estufa, por esta ser a única que têm um impacto nas alterações climáticas e também por ser a que mais importância é dada por cientistas e legisladores, tanto a nível europeu como mundial. Em análises posteriores seria interessante ter em atenção os impactos negativos das restantes fontes energéticas para o cálculo da ecoeficiência.

No que diz respeito ao output utilizado, este será definido da seguinte forma:

- **PIB/ GHG_E** – Rácio do produto interno bruto (PIB) pelas emissões de gases com efeito de estufa do setor elétrico (GHG_E).

É de salientar que alguns artigos da literatura utilizam o inverso deste output. Contudo, como nesta análise será utilizada a ótica do output, onde o objetivo é maximizar os outputs, mantendo constantes os inputs, esta variável tem necessariamente de ser definida deste modo de forma a tratar os gases com efeito de estufa como um output indesejado.

O PIB está expresso em paridade de poder de compra e constante para o ano 2011, em milhões de Euros. Os gases com efeito de estufa estão expressos em milhões de toneladas equivalentes de CO_2 . Na produção de eletricidade, apenas são considerados os produtores primários e as centrais de ciclo-combinado. Não são considerados os auto produtores

devido ao facto de a sua produção não ser incorporada na rede de eletricidade. Os valores do PIB foram obtidos na base de dados do Banco Mundial. Os valores dos gases com efeito de estufa são da autoria da Agência Europeia do Ambiente. Os restantes valores foram obtidos na base de dados do Eurostat.

5. Resultados Empíricos

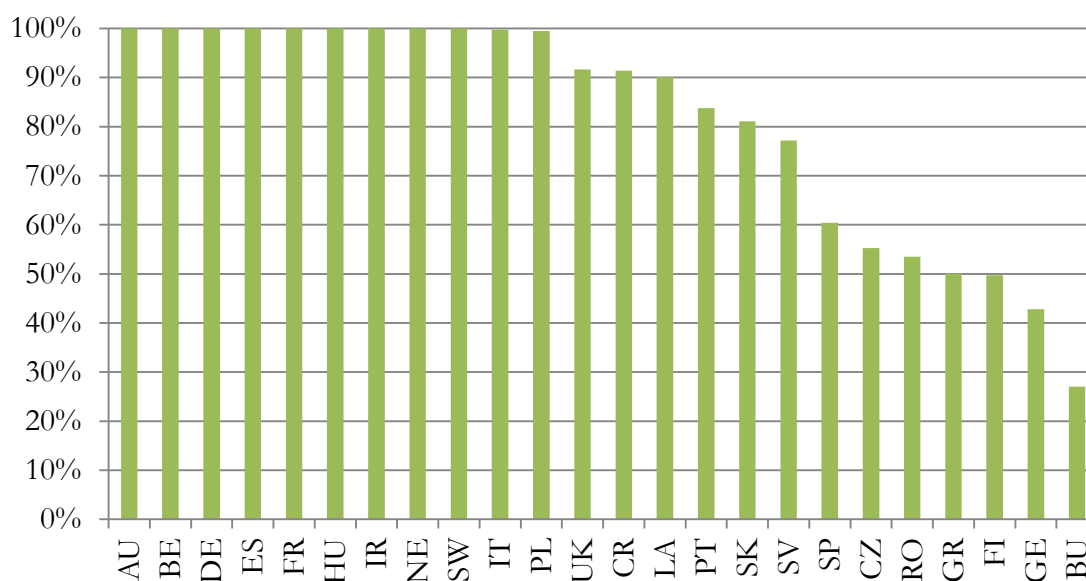
Neste capítulo serão apresentados e comentados os resultados obtidos através da aplicação do método DEA. Em primeiro lugar, serão analisados os resultados obtidos para a eficiência técnica, segundo a ótica do output e assumindo rendimentos variáveis à escala. Em seguida, serão analisados os resultados obtidos para índice de Malmquist e as suas componentes, segundo a ótica do output. Todos os valores obtidos para cada uma destas medidas encontram-se expostos em anexo.

5.1. Eficiência Técnica

Neste subcapítulo serão apresentados e comentados os resultados da eficiência técnica, na ótica do output, assumindo rendimentos variáveis à escala. De forma a simplificar a análise, todos os valores apresentados estarão expressos em percentagens. Em primeiro lugar, serão apresentadas e comentadas as médias geométricas da eficiência técnica, para cada país da amostra, ao longo do período 1995-2016. Em seguida, será analisada a evolução anual da eficiência técnica ao longo do período referido anteriormente. Nesta análise, a amostra será dividida em grupos distintos: o grupo nuclear, com mais de 30% de produção de eletricidade a partir de energia nuclear e o grupo renovável, com mais de 30% de produção de eletricidade a partir de energia renovável (incluindo a hídrica). Por fim, será efetuada uma breve síntese deste subcapítulo.

No gráfico 1 estão apresentadas as médias geométricas da eficiência técnica, para cada país da amostra, ao longo do período 1995-2016.

Gráfico 1. Média geométrica da eficiência técnica (1995-2016).



Como é possível observar, nove países (Áustria, Bélgica, Dinamarca, Estónia, França, Hungria, Irlanda, Países Baixos e Suécia) tiveram 100% de eficiência, ou seja, dado os seus inputs, conseguiram produzir o máximo de outputs possíveis. Na tabela seguinte encontra-se decomposta, para o ano 2016, a produção elétrica destes países em cada uma das fontes energéticas consideradas.

Tabela 2. Produção elétrica, por fonte energética, dos países com maior eficiência (2016).

	N	H	R	F
AU	0%	62%	9%	17%
BE	50%	2%	6%	29%
DE	0%	0%	44%	47%
ES	0%	0%	6%	93%
FR	72%	12%	5%	8%
HU	51%	1%	2%	42%
IR	0%	3%	21%	69%
NE	3%	0%	7%	70%
SW	40%	40%	10%	6%

Deste modo, dos nove países com maior eficiência, quatro atribuíram uma grande importância à energia nuclear (França, Hungria, Bélgica e Suécia). De facto, estes quatro estiveram no topo da amostra, juntamente com a Eslováquia, em relação ao peso da energia nuclear na produção elétrica. Destes, apenas a Suécia teve outra fonte de energia com tanta relevância como a nuclear, sendo esta a hídrica. Os restantes países, ou produziram uma quantidade muito reduzida (Dinamarca), ou não utilizaram energia nuclear. Por outro lado, destes nove países, apenas dois (Áustria e Suécia) utilizaram uma percentagem considerável de energia hídrica na sua produção elétrica e apenas dois (Dinamarca e Irlanda) usaram uma percentagem considerável de energia renovável. Por fim, é de salientar que este grupo esteve bastante dependente das energias fósseis, com todos, exceto três países (Áustria, França e Suécia), acima de 25% de produção elétrica a partir destas fontes energéticas, sendo que três (Estónia, Países Baixos e Irlanda) produziram pelo menos metade da sua eletricidade a partir de fontes fósseis. Desta forma, os países mais eficientes foram caracterizados pelas energias nuclear e fóssil, com uma participação considerável das restantes.

No oposto do espectro, a Bulgária, a Alemanha, a Finlândia, a Grécia, a Roménia, a República Checa e a Espanha foram os países menos eficientes, ou seja, dado os seus inputs, poderiam ter produzido uma quantidade de outputs consideravelmente superior. Na tabela seguinte encontra-se decomposta, para o ano 2016, a produção elétrica destes países em cada uma das fontes energéticas consideradas.

Tabela 3. Produção elétrica, por fonte energética, dos países com menor eficiência (2016).

	N	H	R	F
BU	36%	11%	7%	45%
CZ	30%	3%	3%	52%
FI	34%	22%	5%	26%
GE	13%	4%	19%	55%
GR	0%	11%	18%	67%
RO	17%	30%	13%	29%
SP	21%	15%	23%	29%

Como se pode verificar, dos sete países com menor eficiência, todos atribuíram uma grande importância à energia nuclear, com apenas a exceção da Grécia, que não utilizou esta fonte energética. Por outro lado, a importância da energia hídrica para estes países foi mais reduzida, mas ainda considerável, com apenas a exceção da República Checa e da Alemanha. Relativamente à energia renovável, todos atribuíram a esta uma importância significativa, apenas com a exceção da República Checa, da Finlândia e da Bulgária. Por fim, é de salientar que este grupo, tal como o grupo dos países mais eficientes, esteve bastante dependente das energias fósseis, com todos acima de 25% de produção elétrica a partir desta fonte energética, sendo que três (Alemanha, Grécia e República Checa) produziram pelo menos metade da sua eletricidade a partir de fontes fósseis. Desta forma, os países menos eficientes foram caracterizados pelas energias nuclear e fóssil, com uma participação considerável das restantes.

Quando comparado o grupo dos países mais eficientes com o grupo dos menos eficientes, não é possível observar imediatamente o que os diferencia. Ambos os grupos foram caracterizados pelas energias nuclear e fóssil, com uma participação considerável das restantes. Desta forma, têm obrigatoriamente de existir outras variáveis que influenciem consideravelmente a eficiência. O grupo dos países mais eficientes foi caracterizado principalmente por alguns dos países com maior PIB *per capita* da UE, sendo que o grupo dos países menos eficientes é caracterizado pelo oposto, contudo ambos têm algumas exceções notáveis, como por exemplo a Estónia e a Alemanha. Deste modo, é possível afirmar que a eficiência também foi influenciada por fatores macroeconómicos não considerados nesta análise.

Em seguida, será analisada a evolução anual da eficiência técnica ao longo do período 1995-2016. Nesta análise, a amostra será dividida em grupos distintos: o grupo nuclear, com mais de 30% de produção de eletricidade a partir de energia nuclear e o grupo renovável, com mais de 30% de produção de eletricidade a partir de energia renovável (incluindo a hídrica). Para tal, serão utilizadas as percentagens de energia do último ano analisado, ou seja, 2016. Cada um dos grupos tem oito elementos. Não será considerada a Suécia por intercalar ambos os grupos. Esta divisão em grupos tem o intuito de averiguar se o foco em energia nuclear ou em energia renovável tem um impacto diferente na eficiência técnica e, caso tenha, qual destas fontes de energia é a melhor para investir de forma a alcançar os compromissos de descarbonização. Os dois grupos são compostos pelos países seguintes:

Tabela 4. Composição do grupo nuclear e do grupo renovável.

Grupo Nuclear	N	Grupo Renovável	H + R
França	72%	Áustria	71%
Eslováquia	55%	Croácia	65%
Hungria	51%	Portugal	51%
Bélgica	50%	Letónia	45%
Bulgária	36%	Dinamarca	44%
Eslovénia	35%	Roménia	43%
Finlândia	34%	Espanha	37%
República Checa	30%	Itália	32%

Nas tabelas 5 e 6 encontram-se decompostas, para o ano 2016, a produção elétrica de dos grupos nuclear e renovável, em cada uma das fontes energéticas consideradas.

Tabela 5. Produção elétrica, por fonte energética, dos países do grupo nuclear (2016).

	N	H	R	F
FR	72%	12%	5%	8%
SK	55%	18%	1%	16%
HU	51%	1%	2%	42%
BE	50%	2%	6%	29%
BU	36%	11%	7%	45%
SL	35%	29%	0%	31%
FI	34%	22%	5%	26%
CZ	30%	3%	3%	52%

Assim sendo, quase todos os países do grupo nuclear tiveram como maior fonte energética a energia nuclear, apenas com a exceção da Bulgária e da República Checa, nos quais a maior fonte energética foi a fóssil. Por outro lado, apesar de dominada pela energia nuclear, a Hungria teve uma percentagem relativamente semelhante de energia fóssil. No caso da Eslovénia e da Finlândia foi atribuída uma importância relativamente idêntica às energias nuclear, hídrica e fóssil. Nenhum destes país foi caracterizado por uma percentagem significativa de energia renovável. Em suma, este grupo foi caracterizado pelas energias nuclear e fóssil, com uma participação moderada de hídrica.

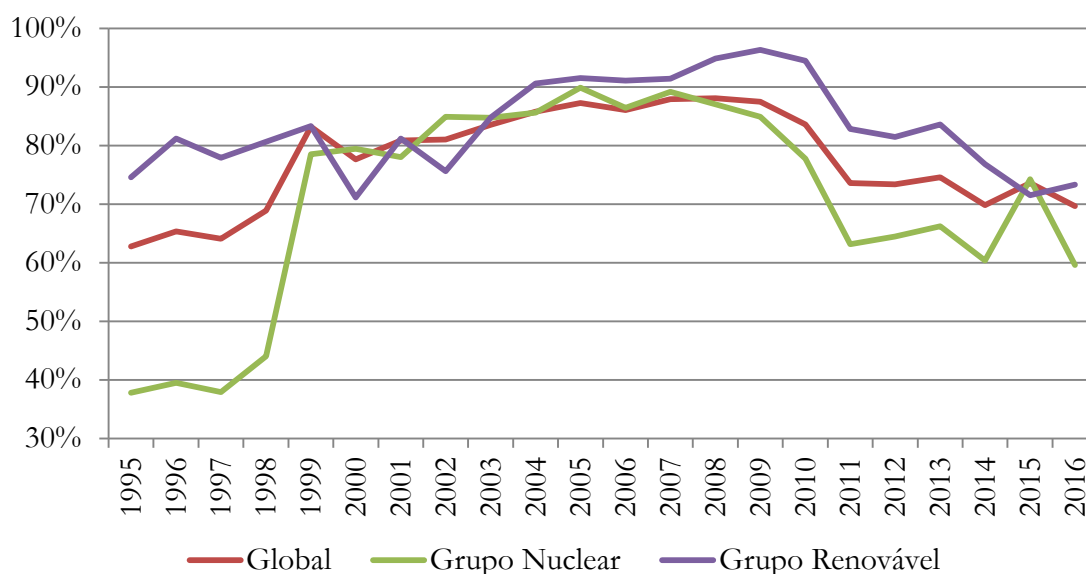
Tabela 6. Produção elétrica, por fonte energética, dos países do grupo renovável (2016).

	H+R	N	H	R	F
AU	71%	0%	62%	9%	17%
CR	65%	0%	57%	9%	32%
PT	51%	0%	29%	22%	36%
LA	45%	0%	43%	2%	52%
DE	44%	0%	0%	44%	47%
RO	43%	17%	30%	13%	29%
SP	37%	21%	15%	23%	29%
IT	32%	0%	15%	16%	62%

Por outro lado, no grupo renovável, quase todos os países tiveram como maior fonte energética a energia renovável (incluindo a hídrica), apenas com a exceção da Letónia, da Dinamarca e da Itália, nos quais a maior fonte energética foi a fóssil. Com a separação da energia hídrica das restantes renováveis, é possível observar que em quase todos os países foi dada primazia à energia hídrica, com a exceção da Dinamarca. Por outro lado, Portugal, Espanha e Itália tiveram percentagens de energia hídrica e de restantes renováveis relativamente próximas. É de salientar também que apenas dois países deste grupo (Espanha e Roménia) utilizaram energia nuclear e em quantidades significativas. Desta forma, este grupo foi caracterizado pela energia renovável, especialmente a hídrica, e pela energia fóssil. Curiosamente, a energia fóssil foi mais significativa no grupo renovável do que no grupo nuclear, com médias de 27% e 35%, respetivamente, o que em partida pode permitir afirmar que a energia nuclear é o mais eficaz na objetivo da descarbonização.

No gráfico 2 estão apresentadas as médias geométricas anuais da eficiência técnica para o grupo nuclear, o grupo renovável e a amostra global, ao longo do período 1995-2016.

Gráfico 2. Média geométrica anual da eficiência técnica (1995-2016).



Em primeiro lugar, é possível observar que o grupo renovável apresentou durante quase todo o período analisado uma melhor eficiência do que o grupo nuclear e a amostra global. Ao longo dos 22 anos analisados, apenas em três (2000, 2002 e 2015) não se encontrou em primeiro lugar. Em 2000 e 2002, a principal causa para este facto foi a queda substancial da eficiência na Letónia, o que é curioso, visto que esta verificou o maior aumento de output nesses anos, com pouca variação dos inputs. Porém, é de salientar que na altura a Letónia ainda não era membro da UE e que a eficiência técnica é determinada pela distancia à fronteira de possibilidades de produção, sendo esta definida pelos países mais eficientes. Por outras palavras, a Letónia não conseguiu acompanhar a subida da fronteira de possibilidades de produção. Por outro lado, a queda da eficiência em 2015 foi causada pela Croácia e por Portugal em resultado da diminuição da produção de energia hídrica e na sua compensação com energia fóssil.

No que diz respeito ao grupo nuclear, é possível observar dois períodos de grande aumento da eficiência, em 1999 e em 2015, sendo que este último aparenta, à primeira vista, ser uma anomalia. Em 1999, os ganhos de eficiência deste grupo deveram-se principalmente à Bulgária, à Eslovénia e à Eslováquia, países que conseguiram aumentar o seu output (exceto no caso da Eslováquia) e diminuir a produção de energia fóssil. No caso da Eslovénia e da Eslováquia, os ganhos da eficiência foram sustentáveis e mantiveram-se até ao final do período analisado, enquanto que na Bulgária apenas se verificaram até 2005. Por outro lado, o ano de 2015 é na realidade uma anomalia causada pelos ganhos de

eficiência temporários da República Checa e da Finlândia. No caso da Finlândia, este aumento da eficiência foi causado por um aumento da produção de energia hídrica e uma consequente diminuição da energia fóssil. O caso da República Checa é mais surpreendente, visto que conseguiu aumentar a sua eficiência com uma diminuição da energia nuclear compensada por um aumento da energia fóssil. Porém, este país verificou um aumento muito reduzido de emissões de gases com efeito de estufa e um aumento considerável do PIB, o que leva a supor que estes foram os principais fatores para o aumento da sua eficiência.

Por outro lado, é de realçar o impacto da crise financeira na eficiência técnica, sendo possível observar uma diminuição considerável da mesma a partir de 2010 em todos os grupos, diminuição esta não recuperada durante o restante período analisado. Este resultado já era previsível, visto que um dos outputs é o PIB, sendo que este foi severamente afetado durante a crise financeira na generalidade dos países analisados. Em 2010, os países como maiores quedas de eficiência foram a Roménia, a Bulgária, a Grécia e o Reino Unido, enquanto que, curiosamente, Portugal e Espanha verificaram ganhos de eficiência devido ao aumento da produção de energia hídrica e consequente diminuição da energia fóssil. No ano seguinte, a queda da eficiência alcançou à República Checa, à Espanha, à Croácia e Portugal, enquanto que na Roménia e no Reino Unido verificaram-se diminuições pelo segundo ano consecutivo. Apenas em 2012 é que a situação começou a estabilizar, exceto para o grupo renovável que continuou em queda até 2015. É de realçar que neste grupo estão inseridos Portugal, Espanha e Itália, três dos países mais afetados pela crise financeira, pelo que seria de esperar que as perdas de eficiência deste grupo se prolongassem por mais alguns anos. Contudo, apesar disto, o grupo renovável esteve sempre em primeiro lugar no que diz respeito à eficiência durante a crise financeira, apenas com a exceção de 2015.

Concluindo, através do cálculo da eficiência técnica, foi possível observar que dos 24 países estudados, apenas nove (Áustria, Bélgica, Dinamarca, Estónia, França, Hungria, Irlanda, Países Baixos e Suécia) obtiveram 100% de eficiência durante todo o período analisado, ou seja, dado os seus inputs, conseguiram produzir o máximo de outputs. Por outro lado, a Bulgária, a Alemanha, a Finlândia, a Grécia, a Roménia, a República Checa e a Espanha foram os países menos eficientes. Na generalidade destes países, as energias dominantes foram a nuclear e a fóssil. Desta forma, não foi possível determinar o impacto

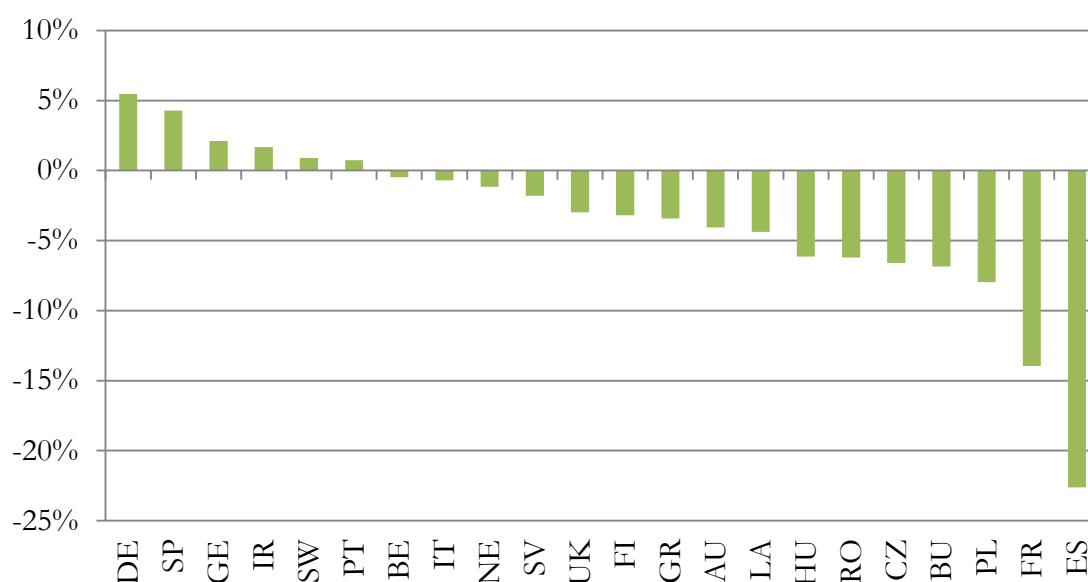
de cada fonte energética na eficiência apenas com os resultados de países individuais. De forma a resolver este problema, foi importante a divisão da amostra em dois grupos distintos: o grupo nuclear, com mais de 30% de produção de eletricidade a partir de energia nuclear e o grupo renovável, com mais de 30% de produção de eletricidade a partir de energia renovável (incluindo a hídrica). Tendo em conta esta divisão e analisando a evolução anual das médias geométricas da eficiência técnica, foi possível apurar que o grupo renovável apresentou durante quase todo o período uma maior eficiência do que o grupo nuclear e a amostra global. Desta forma, é possível afirmar que as energias renovável e hídrica conduziram a ganhos de eficiência superiores aos da energia nuclear. Por fim, é de realçar o impacto da crise financeira na eficiência técnica, sendo possível observar uma diminuição considerável desta a partir de 2010 em todos os grupos, diminuição esta não recuperada durante o restante período analisado. Esta situação apenas começou a estabilizar em 2012, somente com a exceção do grupo renovável que, apesar disto, continuou em primeiro lugar no que diz respeito à eficiência durante o período da crise financeira.

5.2. Índice de Malmquist

Neste subcapítulo serão apresentados e comentados os resultados obtidos para o índice de Malmquist e as suas componentes, utilizando a ótica do output. De forma a simplificar a análise, todos os valores apresentados estão expressos em variações percentuais. Em primeiro lugar, serão apresentadas e comentadas as médias geométricas de cada uma das medidas, para cada país da amostra, ao longo do período 1995-2016. Em seguida, será analisada a evolução anual de cada medida ao longo do período referido. Nesta análise, a amostra será novamente dividida em dois grupos distintos: o grupo nuclear, com mais de 30% de produção de eletricidade a partir de energia nuclear e o grupo renovável, com mais de 30% de produção de eletricidade a partir de energia renovável (incluindo a hídrica). Por fim, será efetuada uma breve síntese deste subcapítulo. Ao contrário do subcapítulo anterior, neste apenas serão analisados 22 países devido à exclusão da Croácia e da Eslováquia causada pela obtenção de valores infinitos para os anos de 2004 e 2009.

No gráfico 3 estão apresentadas as médias geométricas do índice de Malmquist, para cada país da amostra, ao longo do período 1995-2016. Esta medida representa a variação da produtividade total dos fatores, ou seja, uma variação positiva representa um aumento da produtividade, enquanto que uma variação negativa representa uma diminuição.

Gráfico 3. Média geométrica do índice de Malmquist (1995-2016).



Como se pode observar, a maioria dos países observados verificou uma diminuição da produtividade total dos fatores ao longo do período analisado. Dos 22 países estudados,

apenas seis (Dinamarca, Espanha, Alemanha, Irlanda, Suécia e Portugal) verificaram variações positivas da produtividade. Na tabela seguinte encontra-se decomposta, para o ano 2016, a produção elétrica destes países em cada uma das fontes energéticas consideradas.

Tabela 7. Produção elétrica, por fonte energética, dos países com variação positiva do índice de Malmquist (2016).

	N	H	R	F
DE	0%	0%	44%	47%
SP	21%	15%	23%	29%
PT	0%	29%	22%	36%
IR	0%	3%	21%	69%
GE	13%	4%	19%	55%
SW	40%	40%	10%	6%

Deste modo, os países com uma variação positiva da produtividade foram fortemente caracterizados pela energia renovável. De facto, estes seis países estiverem entre os dez com maior percentagem de eletricidade produzida a partir de energia renovável durante o ano de 2016. Por outro lado, a energia hídrica também obteve uma forte presença, apenas com as exceções da Irlanda, da Alemanha e da Dinamarca. No que diz respeito à energia nuclear, três países (Suécia, Espanha e Alemanha) produziram quantidades significativas da mesma, enquanto que os restantes não utilizaram esta fonte energética. Por fim, todos os países, com a exceção da Suécia, apresentaram fortes participações de energia fóssil no seu *mix* energético. Em suma, os países com uma variação positiva da produtividade foram caracterizados pelas energias renovável e fóssil, com uma participação considerável das restantes.

No oposto do espectro, a Estónia e a França foram os países em que a produtividade total dos fatores mais diminuiu, seguidos pela Polónia, Bulgária, República Checa, Roménia e Hungria. Na tabela seguinte encontra-se decomposta, para o ano 2016, a produção elétrica destes países em cada uma das fontes energéticas consideradas.

Tabela 8. Produção elétrica, por fonte energética, dos países com maior variação negativa do índice de Malmquist (2016).

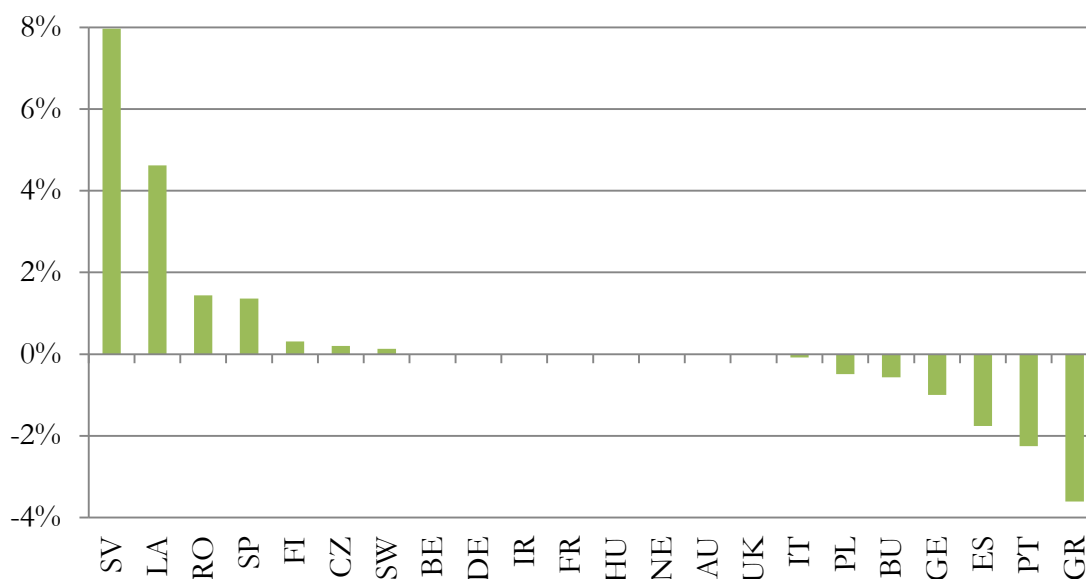
	N	H	R	F
BU	36%	11%	7%	45%
CZ	30%	3%	3%	52%
ES	0%	0%	6%	93%
FR	72%	12%	5%	8%
HU	51%	1%	2%	42%
PL	0%	2%	8%	84%
RO	17%	30%	13%	29%

Assim sendo, os países com uma maior variação negativa da produtividade, ao contrário do grupo anterior, tiveram uma participação bastante reduzida da energia renovável. Relativamente à energia hídrica, apenas três países (Roménia, França e Bulgária) apresentaram participações significativas da mesma. No que diz respeito à energia nuclear, apenas a Estónia e a Polónia não utilizaram esta fonte energética, enquanto que os restantes produziram quantidades bastante significativas. Por fim, todos os países, com a exceção da França, apresentaram fortes participações de energia fóssil no seu *mix* energético. Resumindo, os países com uma maior variação negativa da produtividade foram caracterizados pelas energias fóssil e nuclear, com uma participação considerável da hídrica.

Quando comparados os extremos da variação da produtividade, o que os parece diferenciar é a importância dada à energia renovável, que caracterizou os países onde a produtividade mais aumentou, e à energia nuclear, que caracterizou, até certo ponto, os países onde a produtividade mais diminuiu. Desta forma, pode ser afirmado que a energia renovável conduziu a um maior aumento da produtividade e que a energia nuclear a uma maior diminuição da mesma. No caso da energia renovável, este resultado já era esperado visto que nos últimos anos a energia solar e eólica têm ganho grande relevância e beneficiado de contínuos aperfeiçoamentos tecnológicos e apoios governamentais, o que favoreceu claramente o aumento das suas produtividades. Relativamente à energia nuclear, apesar de a tecnologia ter evoluído muito pouco nos últimos anos e de a maioria dos países favorecer a energia renovável em detrimento desta na questão de descarbonização, é importante realçar que, em ambos os grupos analisados, estão presentes países tanto com produções significativas como sem produção de energia nuclear.

No gráfico 4 estão apresentadas as médias geométricas da variação de eficiência técnica, para cada país da amostra, ao longo do período 1995-2016. Por outras palavras, esta medida representa o efeito *catching up*, ou seja, a aproximação ou afastamento de um país à fronteira de possibilidades de produção. Desta forma, uma variação positiva representa uma aproximação à fronteira, ou convergência, enquanto que uma variação negativa representa um afastamento, ou divergência.

Gráfico 4. Média geométrica da variação de eficiência técnica (1995-2016).



Como é possível observar, os países que mais convergiram durante o período analisado foram a Eslovénia, a Letónia, a Roménia e a Espanha. Na tabela seguinte encontra-se decomposta, para o ano 2016, a produção elétrica destes países em cada uma das fontes energéticas consideradas.

Tabela 9. Produção elétrica, por fonte energética, dos países com maior variação positiva da eficiência técnica (2016).

	N	H	R	F
LA	0%	43%	2%	52%
RO	17%	30%	13%	29%
SL	35%	29%	0%	31%
SP	21%	15%	23%	29%

Desta forma, os países com maior convergência foram fortemente caracterizados pelas energias hídrica e fóssil. Por outro lado, a energia nuclear também teve um peso significativo, com a exceção da Letónia que não utilizou esta fonte energética. Relativamente à energia renovável, apenas a Espanha e a Roménia tiveram produções significativas desta fonte energética. Em suma, este grupo foi fortemente caracterizado pelas energias hídrica e fóssil, com uma participação significativa de energia nuclear.

Por outro lado, os países que mais divergiram durante o período analisado foram a Grécia, Portugal, Estónia e a Alemanha. Na tabela seguinte encontra-se decomposta, para o ano 2016, a produção elétrica destes países em cada uma das fontes energéticas consideradas.

Tabela 10. Produção elétrica, por fonte energética, dos países com maior variação negativa da eficiência técnica (2016).

	N	H	R	F
ES	0%	0%	6%	93%
GE	13%	4%	19%	55%
GR	0%	11%	18%	67%
PT	0%	29%	22%	36%

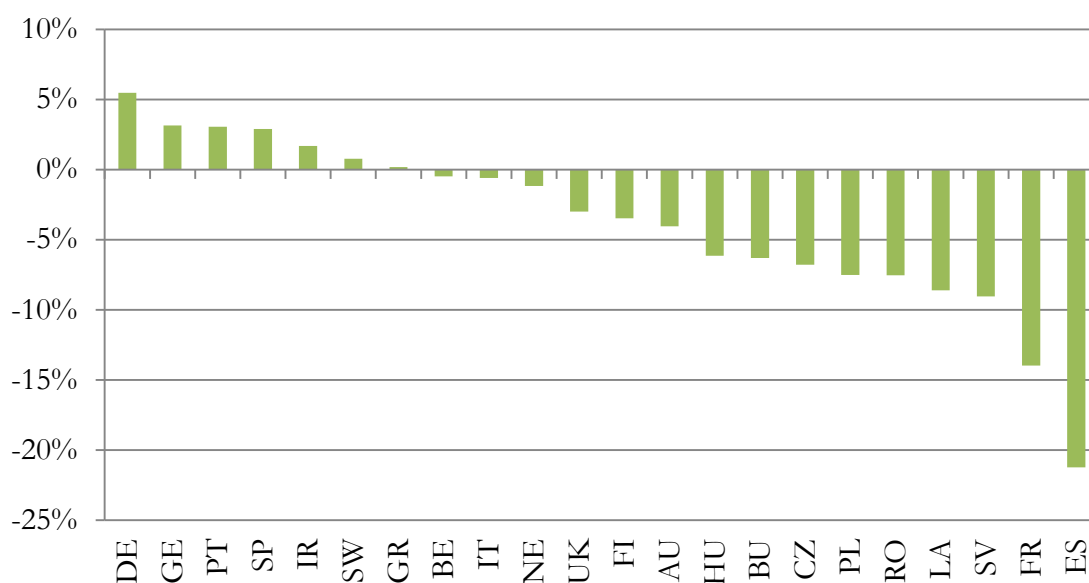
Deste modo, os países com maior divergência foram fortemente caracterizados pela energia fóssil, com a exceção de Portugal. Relativamente à energia nuclear, o seu peso foi bastante reduzido, sendo que apenas a Alemanha utilizou esta fonte energética. Por outro lado, a energia renovável teve uma participação considerável, apenas com a exceção da Estónia. No que diz respeito à energia hídrica, apenas Portugal e a Grécia produziram quantidades significativas desta fonte energética. Concluindo, este grupo foi fortemente caracterizado pela energia fóssil, com uma participação significativa da energia renovável e hídrica.

Quando comparados os extremos da variação da eficiência, o que os parece diferenciar é a importância dada à energia nuclear, que caracterizou os países com maior convergência, e à energia renovável, que caracterizou os países com maior divergência. A associação da energia renovável com divergência pode ser explicada pelo facto de, tal como foi observado no subcapítulo anterior, a energia renovável ter conduzido a uma maior eficiência. Desta forma, ganhos adicionais de eficiência têm um impacto menos na sua

variação. Por outro lado, no subcapítulo anterior verificou-se que a energia nuclear leva a uma menor eficiência, quando comparada com a energia renovável. Desta forma, ganhos adicionais de eficiência têm um impacto maior na sua variação.

No gráfico 5 estão apresentadas as médias geométricas da tecnológica, para cada país da amostra, ao longo do período 1995-2016. Desta forma, uma variação positiva representa progresso técnico, enquanto que uma variação negativa representa retrocesso técnico.

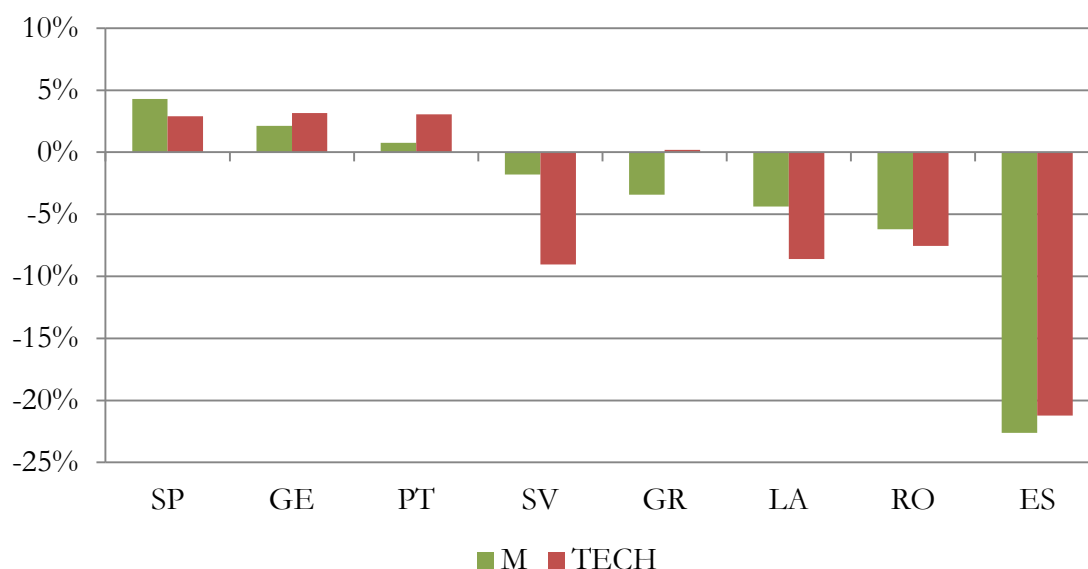
Gráfico 5. Média geométrica da variação tecnológica (1995-2016).



Quando comparado este gráfico com o gráfico 3, onde estão apresentadas as médias geométricas do índice de Malmquist, é possível observar que ambos são quase idênticos, apenas com algumas alterações nos valores e no *ranking* dos países. Visto que este índice resulta da multiplicação da variação da eficiência técnica pela variação tecnológica, é possível concluir que o índice de Malmquist foi influenciado principalmente pelo progresso técnico (ou retrocesso, neste caso), sendo que os fenómenos de convergência e de divergência tiveram um peso mais reduzido.

Devido às similaridades entre os gráficos 3 e 5, a análise do último é redundante. Dos 22 países analisados, apenas oito apresentaram diferenças consideráveis entre a variação da produtividade e a variação tecnológica. Desta forma, serão analisados em seguida, no gráfico 6, apenas os casos ondem os gráficos 3 e 5 mais divergiram.

Gráfico 6. Média geométrica da variação da produtividade total dos fatores (M) e da variação tecnológica (TECH) durante o período 1995-2016.

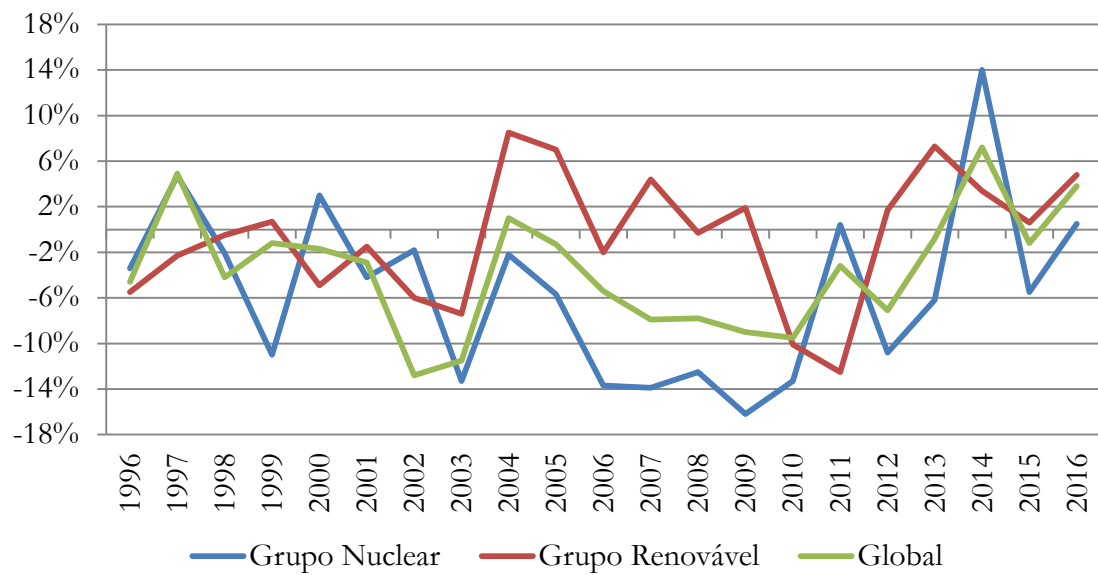


Em primeiro lugar, as discrepâncias entre os dois valores foram todas causadas pela variação da eficiência, ou por outras palavras, por fenómenos de convergência ou divergência. Todos estes países correspondem aos extremos da variação da eficiência. Nos casos em que a tecnológica foi inferior à variação da produtividade, foi necessário obrigatoriamente um fenómeno de convergência que permitiu compensar essa diferença. Este fenómeno verificou-se na Eslovénia, na Letónia, na Roménia e na Espanha. Por outro lado, nos casos em que a tecnológica foi superior à variação da produtividade, foi necessário obrigatoriamente um fenómeno de divergência que permitiu compensar essa diferença. Este fenómeno verificou-se na Alemanha, na Espanha, na Grécia e em Portugal. Em suma, enquanto que os restantes países foram fortemente marcados por retrocesso técnico, estes oito apresentaram fenómenos de convergência ou divergência significativos.

Em seguida, a amostra será, tal como no subcapítulo anterior, dividida nos grupos nuclear e renovável. A composição de cada grupo será a mesma que a descrita na tabela 4, apenas com a exclusão da Eslováquia do grupo nuclear e da Croácia do grupo renovável devido, tal como foi referido anteriormente, à obtenção de resultados inválidos para estes países.

No gráfico 7 estão apresentadas as médias geométricas do índice de Malmquist para o grupo nuclear, o grupo renovável e a amostra global, ao longo do período 1995-2016.

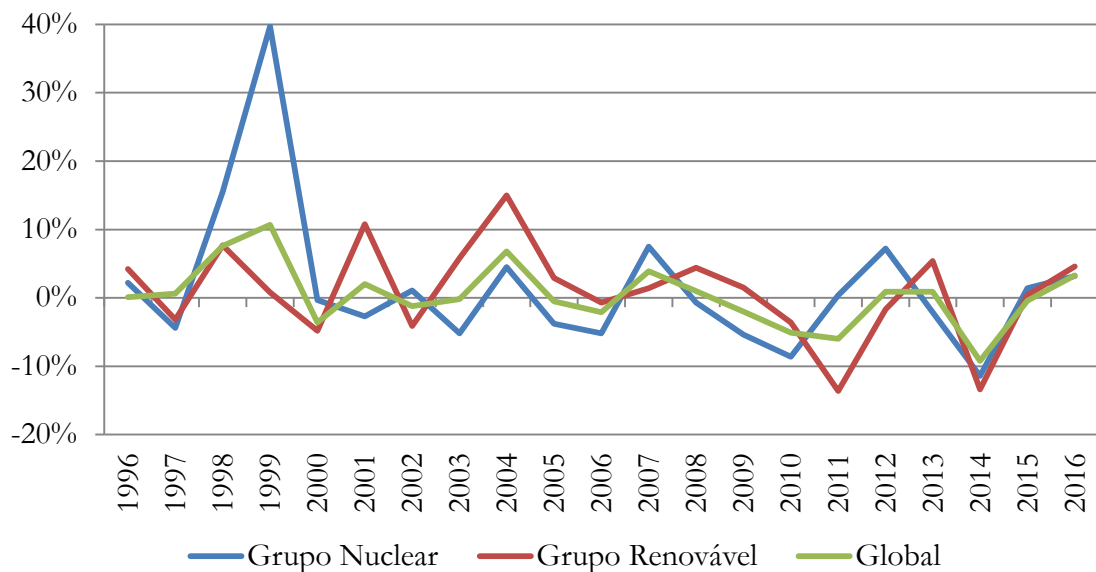
Gráfico 7. Média geométrica anual do índice de Malmquist (1995-2016).



Tal como tinha sido apurado anteriormente, é possível verificar que o período analisado foi marcado profundamente por uma redução da produtividade total dos fatores. Dos 22 anos analisados, a amostra global apresentou variações positivas da produtividade em apenas quatro, sendo que, em média, a sua produtividade diminuiu 3.7% por ano. De forma semelhante, o grupo nuclear obteve variações positivas da produtividade em apenas cinco anos, sendo que, em média, a sua produtividade diminuiu 5.7% por ano. O grupo melhor posicionado foi sem dúvida o renovável, com variações positivas da produtividade em quase metade dos anos analisados, sendo que, em média, a sua produtividade diminuiu 0.7% por ano.

No gráfico 8 estão apresentadas as médias geométricas da variação de eficiência técnica para o grupo nuclear, o grupo renovável e a amostra global, ao longo do período 1995-2016.

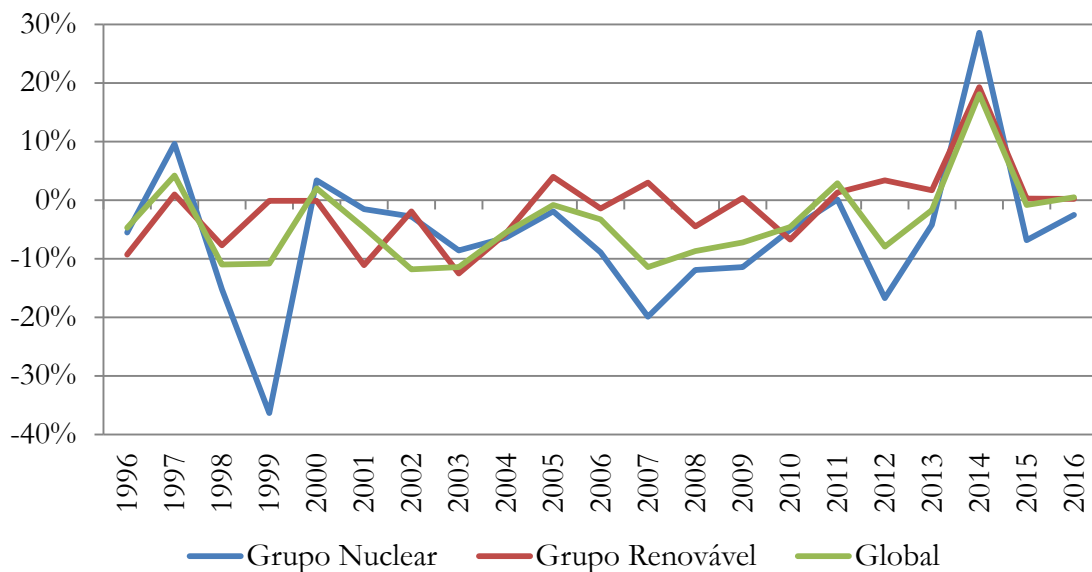
Gráfico 8. Média geométrica anual da variação da eficiência técnica (1995-2016).



Assim sendo, a performance de todos os grupos foi muito superior no que diz respeito à variação da eficiência. Desta forma, apesar da generalidade dos países ter exibido reduções na produtividade, obtiveram ganhos na eficiência. Dos 22 anos analisados, a amostra global apresentou variações positivas da eficiência em onze, sendo que, em média, a sua eficiência aumentou 0.3% por ano. De forma semelhante, o grupo nuclear obteve variações positivas da eficiência em dez anos, sendo que, em média, a sua eficiência aumentou 1.1% por ano. Novamente, o grupo que apresentou variações positivas da eficiência em mais anos foi o renovável, com treze anos positivos, apesar de ter uma média de eficiência menor que o grupo nuclear, sendo que a sua eficiência aumentou, em média, 0.7% por ano. Porém, o grupo nuclear apenas fica à frente em termos da média da eficiência devido ao ano de 1999, no qual obteve um aumento de eficiência inigualável de cerca de 40%. Este facto já tinha sido explicado anteriormente pelos ganhos de eficiência da Eslovénia e da Bulgária. Porém, é de notar que se este ano for excluído da análise, a média da eficiência do grupo nuclear desce para -0.5%, tornando desta forma no único grupo com uma performance negativa ao longo do período analisado.

No gráfico 9 estão apresentadas as médias geométricas da variação tecnológica, para o grupo nuclear, o grupo renovável e a amostra global, ao longo do período 1995-2016.

Gráfico 9. Média geométrica anual da variação tecnológica (1995-2016).



Tal como tinha sido referido anteriormente, é possível observar que a variação tecnológica teve uma evolução bastante semelhante à variação da produtividade. Dos 22 anos analisados, a amostra global apresentou variações tecnológicas positivas em apenas cinco, sendo que, em média, verificou retrocesso técnico de 4% por ano. De forma semelhante, o grupo nuclear obteve variações tecnológicas positivas em apenas quatro anos, sendo que, em média, verificou retrocesso técnico de 6.7% por ano. Tal como anteriormente, o grupo melhor posicionado foi o renovável, com variações tecnológicas positivas em dez anos, sendo que, em média, verificou retrocesso técnico de 1.5% por ano. Por outro lado, também é possível chegar a uma melhor conclusão relativamente ao grande aumento da eficiência do grupo nuclear no ano de 1999. Apesar da Eslovénia e da Bulgária terem verificado ganhos de eficiência nesse ano, o grupo nuclear também verificou um retrocesso técnico quase na mesma proporção. Desta forma, com o recuo da fronteira de possibilidade de produção, ocorreu uma aproximação à mesma dos países menos eficientes do grupo, o que acabou por enviesar os resultados.

Concluindo, através do cálculo do índice de Malmquist e da sua posterior decomposição em variação de eficiência técnica e variação tecnológica, foi possível observar que, dos 22 países analisados, apenas seis (Dinamarca, Espanha, Alemanha, Irlanda, Suécia e Portugal) verificaram variações positivas da produtividade, enquanto que a Estónia, a França, a Polónia, a Bulgária, a República Checa e a Roménia foram os países onde a produtividade mais diminuiu. Quando comparados os extremos do espectro, o que os parece diferenciar

foi a importância dada à energia renovável, que caracterizou os países onde a produtividade mais aumentou, e à energia nuclear, que caracterizou, até certo ponto, os países onde a produtividade mais diminuiu. No que diz respeito à variação da eficiência técnica, ou efeito *catching up*, é possível observar que os países que mais convergiram foram a Eslovénia, a Letónia, a Roménia e a Espanha, enquanto que os que mais divergiram foram a Grécia, Portugal, Estónia e a Alemanha. O que aparenta diferenciar ambos os extremos foi a importância dada à energia nuclear, que caracterizou os países com maior convergência, e à energia renovável, que caracterizou os países com maior divergência. Relativamente à variação tecnológica, esta é bastante semelhante à variação da produtividade, sendo possível concluir que esta foi mais influenciada pelo progresso técnico (ou retrocesso, neste caso) do que por fenómenos de convergência ou divergência. Por fim, com a divisão da amostra nos grupos nuclear e renovável, foi possível observar que o grupo dominante foi o renovável, visto que apresentou melhores retornos em termos de produtividade, eficiência e progresso tecnológico. Por outro lado, o grupo nuclear foi o pior posicionado em todas as medidas. Desta forma, tendo em atenção a composição de cada grupo e o facto de nenhum país utilizar apenas um tipo de fonte energética, é possível afirmar que a energia renovável permite alcançar maior produtividade e maior eficiência do que a energia nuclear. Esta afirmação já era esperada, visto que as energias renováveis foram as que mais evoluíram ao longo do período analisado, tal como é possível observar na medida de variação tecnológica. Porém, apesar de a energia renovável ser a mais produtiva e eficiente, é importante realçar que energia nuclear poderia ter obtido resultados semelhantes se tivesse beneficiado do mesmo progresso tecnológico.

6. Conclusão

Esta dissertação de mestrado teve com propósito a quantificação dos níveis de eficiência na produção de eletricidade na União Europeia, de forma apurar quais os países mais eficientes e qual a estratégica utilizada por estes relativamente ao seu *mix* energético. Deste modo, um dos principais objetivos deste estudo foi apurar qual a melhor fonte energética para investir de forma a atingir as metas ambientais e a manter um nível de crescimento da economia sustentável a longo prazo. Com o intuito de cumprir os objetivos estabelecidos, foi analisada a eficiência técnica e calculado o índice de Malmquist, para 24 países da UE, ao longo do período 1995-2016. Para tal, foi utilizado o método *data envelopment analysis*, que permite a estimação de uma fronteira de produção linear, não paramétrica e com múltiplos inputs e outputs. Esta análise foi realizada na ótica do output, procurando maximizar os mesmos, mantendo constantes os inputs. Como variáveis explicativas e explicadas foram consideradas as produções de energia nuclear, hídrica, restantes renováveis e fóssil, o produto interno bruto e os gases com efeito de estufa.

Através do cálculo da eficiência técnica, foi possível observar que dos 24 países estudados, apenas nove obtiveram eficiência máxima durante todo o período analisado, ou seja, dado os seus inputs, conseguiram produzir o máximo de outputs. Na generalidade dos países posicionados nos extremos do espectro, as energias dominantes foram a nuclear e a fóssil. Desta forma, não foi possível determinar o impacto de cada fonte energética na eficiência apenas com os resultados de países individuais. De forma a resolver este problema, foi importante a divisão da amostra em dois grupos distintos: o grupo nuclear, com mais de 30% de produção de eletricidade a partir de energia nuclear e o grupo renovável, com mais de 30% de produção de eletricidade a partir de energia renovável (incluindo a hídrica). Tendo em conta esta divisão e analisando a evolução anual das médias geométricas da eficiência técnica, foi possível apurar que o grupo renovável apresentou durante quase todo o período uma maior eficiência do que o grupo nuclear. Desta forma, tendo em atenção a composição de cada grupo e o facto de nenhum país utilizar apenas um tipo de fonte energética, é possível afirmar que as energias renovável e hídrica conduziram a ganhos de eficiência superiores aos da energia nuclear.

De forma complementar, através do cálculo do índice de Malmquist, foi possível observar que os países melhor posicionados foram caracterizados pela energia renovável, enquanto que os piores foram caracterizados pela energia fóssil. No que diz respeito à

variação da eficiência técnica, ou efeito *catching up*, é possível observar que os países que mais convergiram foram caracterizados pela energia nuclear, enquanto que a energia renovável caracterizou os que mais divergiram. Relativamente à variação tecnológica, esta é bastante semelhante à variação da produtividade, sendo possível concluir que a anterior foi mais influenciada pelo progresso técnico (ou retrocesso, neste caso) do que por fenómenos de convergência ou divergência. Por fim, com a divisão da amostra nos grupos nuclear e renovável, foi possível observar que o grupo dominante foi o renovável, visto que apresentou melhores retornos em termos de produtividade, eficiência e progresso tecnológico. Por outro lado, o grupo nuclear foi o pior posicionado em todas as medidas. Desta forma, tendo em atenção a composição de cada grupo e o facto de nenhum país utilizar apenas um tipo de fonte energética, é possível afirmar que a energia renovável permite alcançar maior produtividade e maior eficiência do que a energia nuclear. Esta afirmação já era esperada, visto que as energias renováveis foram as que mais evoluíram ao longo do período analisado, tal como é possível observar na variação tecnológica. Porém, apesar de a energia renovável ser a mais produtiva e eficiente, é importante realçar que energia nuclear poderia ter obtido resultados semelhantes se tivesse beneficiado do mesmo progresso tecnológico.

A conjugação dos objetivos europeus e nacionais de liberalização e descarbonização motivaram a realização desta análise que teve como objetivo conciliar a eficiência económica com a eficiência ambiental. Entendo que este estudo traz algo de novo à literatura existente pelo facto de apenas se focar no mercado elétrico e utilizar uma metodologia válida, com reputação, mas ainda encarada com algum cinismo pelos autores desta área. Espero que as conclusões deste trabalho contribuam, não só para o aumento do conhecimento científico neste domínio, mas que também auxiliem os legisladores a estabelecer metas ambientais que promovam a descarbonização e o aumento da eficiência. Em estudos futuros lanço o desafio de quantificar a eficiência tendo em atenção os impactos negativos das restantes fontes energéticas para além da energia fóssil.

Referências Bibliográficas

- Aguirre, M. e Ibikunle, G. (2014). Determinants of renewable energy growth: A global sample analysis. *Energy Policy*, 69, 374-384.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.02.036>
- Ang, B. W., Choong, W. L. e Ng, T. S. (2015). Energy security: Definitions, dimensions and indexes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1077-1093.
doi:10.1016/j.rser.2014.10.064
- Beltrán-Esteve, M. e Picazo-Tadeo, A. J. (2017). Assessing environmental performance in the European Union: Eco-innovation versus catching-up. *Energy Policy*, 104, 240-252. doi:10.1016/j.enpol.2017.01.054
- Bolkesjø, T. F., Eltvig, P. T. e Nygaard, E. (2014). *An Econometric Analysis of Support Scheme Effects on Renewable Energy Investments in Europe*. Apresentado em Energy Procedia
- Burgos-Payán, M., Roldán-Fernández, J. M., Trigo-García, T. L., Bermúdez-Ríos, J. M. e Riquelme-Santos, J. M. (2013). Costs and benefits of the renewable production of electricity in Spain. *Energy Policy*, 56, 259-270. doi:10.1016/j.enpol.2012.12.047
- Burke, P. J. e Csereklyei, Z. (2016). Understanding the energy-GDP elasticity: A sectoral approach. *Energy Economics*, 58, 199-210.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.07.004>
- Camarero, M., Castillo, J., Picazo-Tadeo, A. J. e Tamarit, C. (2013). Eco-Efficiency and Convergence in OECD Countries. *Environmental and Resource Economics*, 55(1), 87-106. doi:10.1007/s10640-012-9616-9
- Camarero, M., Forte, A., Garcia-Donato, G., Mendoza, Y. e Ordoñez, J. (2015). Variable selection in the analysis of energy consumption–growth nexus. *Energy Economics*, 52, 207-216. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.10.012>
- Charnes, A., Cooper, W. W. e Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429-444.
doi:10.1016/0377-2217(78)90138-8
- Ciarreta, A., Espinosa, M. P. e Pizarro-Irizar, C. (2014). Is green energy expensive? Empirical evidence from the Spanish electricity market. *Energy Policy*, 69, 205-215.
doi:10.1016/j.enpol.2014.02.025

- Ciarreta, A., Espinosa, M. P. e Pizarro-Irizar, C. (2017). Has renewable energy induced competitive behavior in the Spanish electricity market? *Energy Policy*, 104, 171-182. doi:10.1016/j.enpol.2017.01.044
- Coelli, T. J. (1996). A guide to DEAP Version 2.1: a data envelopment analysis (computer) program. *CEPA Working Papers*, No. 8/96, Departamento de Econometria, Universidade de Nova Inglaterra, Amidale, Austrália
- Comissão das Comunidades Europeias. (2008). Duas vezes 20 até 2020 - As alterações climáticas, uma oportunidade para a Europa. Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52008DC0030&from=PT>
- Comissão Europeia. (2014). Um quadro político para o clima e a energia no período de 2020 a 2030. Disponível em <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014DC0015&from=PT>
- Cooper, W. W., Seiford, L. M. e Tone, K. (2007). *Data envelopment analysis: A comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software: Second edition*
- Damette, O. e Marques, A. C. (2019). Renewable energy drivers: a panel cointegration approach. *Applied Economics*, 51(26), 2793-2806. doi:10.1080/00036846.2018.1558359
- European Environment Agency. (2017). *Trends and projections in Europe 2017*. Luxemburgo, Serviço das Publicações da União Europeia
- Färe, R., Grosskopf, S., Norris, M. e Zhongyang, Z. (1994). Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries. *American Economic Review*, 84(1), 66-83
- Färe, R., Grosskopf, S. e Pasurka, C. A. (2001). Accounting for air pollution emissions in measures of state manufacturing productivity growth. *Journal of Regional Science*, 41(3), 381-409. doi:10.1111/0022-4146.00223
- Gelabert, L., Labandeira, X. e Linares, P. (2011). An ex-post analysis of the effect of renewables and cogeneration on Spanish electricity prices. *Energy Economics*, 33, S59-S65. doi:10.1016/j.eneco.2011.07.027

- Gutiérrez-Pedrero, M. J., Tarancón, M. Á., Del Río, P. e Alcántara, V. (2018). Analysing the drivers of the intensity of electricity consumption of non-residential sectors in Europe. *Applied Energy*, 211, 743-754.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.115>
- Kais, S. e Sami, H. (2016). An econometric study of the impact of economic growth and energy use on carbon emissions: Panel data evidence from fifty eight countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1101-1110.
doi:10.1016/j.rser.2016.01.054
- Kilinc-Ata, N. (2016). The evaluation of renewable energy policies across EU countries and US states: An econometric approach. *Energy for Sustainable Development*, 31, 83-90.
doi:10.1016/j.esd.2015.12.006
- Kwoka, J. e Pollitt, M. (2010). Do mergers improve efficiency? Evidence from restructuring the US electric power sector. *International Journal of Industrial Organization*, 28(6), 645-656. doi:10.1016/j.ijindorg.2010.03.001
- Marques, A. C. e Fuinhas, J. A. (2012). Are public policies towards renewables successful? Evidence from European countries. *Renewable Energy*, 44, 109-118.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.007>
- Monastyrenko, E. (2017). Eco-efficiency outcomes of mergers and acquisitions in the European electricity industry. *Energy Policy*, 107, 258-277.
doi:10.1016/j.enpol.2017.04.030
- Obadi, S. M. e Korček, M. (2017). EU energy security - Multidimensional analysis of 2005-2014 development. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 7(2), 113-120.
- OCDE. (2008a). *Eco-Efficiency*. Paris: Publicação OCDE
- OCDE. (2008b). *OECD Glossary of Statistical Terms*. Paris: Publicação OCDE
- Omri, A. (2014). An international literature survey on energy-economic growth nexus: Evidence from country-specific studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 951-959. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.084>
- Polzin, F., Migendt, M., Täube, F. A. e Von Flotow, P. (2015). Public policy influence on renewable energy investments—A panel data study across OECD countries. *Energy Policy*, 80, 98-111. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.01.026>

- Robaina-Alves, M., Moutinho, V. e MacEdo, P. (2015). A new frontier approach to model the eco-efficiency in European countries. *Journal of Cleaner Production*, 103, 562-573. doi:10.1016/j.jclepro.2015.01.038
- Roldan-Fernandez, J. M., Burgos-Payan, M., Riquelme-Santos, J. M. e Trigo-Garcia, A. L. (2016a). The Merit-Order Effect of Energy Efficiency. *Energy Procedia, Lisboa, Portugal*, 106, 175-184. doi:10.1016/j.egypro.2016.12.114
- Roldan-Fernandez, J. M., Burgos-Payan, M., Riquelme-Santos, J. M. e Trigo-Garcia, A. L. (2016b). Renewables Versus Efficiency. A Comparison for Spain. *Energy Procedia, Lisboa, Portugal*, 106, 14-23. doi:10.1016/j.egypro.2016.12.101
- Sensfuß, F., Ragwitz, M. e Genoese, M. (2008). The merit-order effect: A detailed analysis of the price effect of renewable electricity generation on spot market prices in Germany. *Energy Policy*, 36(8), 3086-3094. doi:10.1016/j.enpol.2008.03.035
- Tiba, S. e Omri, A. (2017). Literature survey on the relationships between energy, environment and economic growth. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 1129-1146. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.113

Anexos

I. Eficiência Técnica

Tabela 1. Eficiência técnica (TE) durante o período 1995-2005.

País	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
BE	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
BU	0,122	0,111	0,090	0,122	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
CZ	0,259	0,273	0,271	0,339	0,476	0,485	0,531	1,000	1,000	1,000	1,000
DE	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
GE	0,503	0,498	0,505	0,596	0,539	0,403	0,364	0,369	0,391	0,377	0,408
ES	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
IR	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
GR	0,695	0,660	0,792	0,857	0,670	0,552	0,645	0,603	0,479	0,509	0,447
SP	0,479	0,595	0,502	0,581	0,497	0,482	0,494	0,511	0,585	0,561	0,598
FR	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
CR	0,725	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
IT	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
LA	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,376	1,000	0,440	0,603	1,000	1,000
HU	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
NE	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
AU	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
PL	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
PT	0,870	0,833	0,884	0,835	0,951	0,833	0,784	0,878	0,758	0,809	0,824
RO	0,317	0,382	0,306	0,370	0,491	0,436	0,489	0,544	1,000	1,000	1,000
SV	0,202	0,257	0,231	0,279	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
SK	0,261	0,316	0,309	0,387	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
FI	0,251	0,243	0,246	0,319	0,303	0,328	0,258	0,270	0,267	0,289	0,427
SW	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
UK	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabela 2. Eficiência técnica (TE) durante o período 2006-2016.

País	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
BE	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
BU	0,312	0,400	0,330	0,270	0,134	0,123	0,110	0,122	0,086	0,093	0,109
CZ	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,207	0,271	0,304	0,337	1,000	0,470
DE	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
GE	0,392	0,417	0,410	0,429	0,440	0,433	0,419	0,419	0,370	0,391	0,429
ES	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
IR	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
GR	0,469	0,556	0,544	0,480	0,397	0,413	0,392	0,329	0,327	0,313	0,335
SP	0,618	0,589	0,687	0,839	0,958	0,721	0,680	0,892	0,536	0,509	0,646
FR	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
CR	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,954	0,851	0,675	1,000	0,612	0,568
IT	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,942	1,000	1,000
LA	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
HU	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
NE	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
AU	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
PL	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,890
PT	0,766	0,830	0,953	0,887	1,000	0,956	0,992	1,000	0,773	0,623	0,555
RO	1,000	1,000	1,000	1,000	0,662	0,338	0,338	0,397	0,311	0,354	0,411
SV	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
SK	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
FI	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,611	1,000	0,313
SW	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
UK	1,000	1,000	0,991	0,970	0,924	0,642	0,627	0,718	0,698	0,821	1,000

Tabela 3. Média geométrica anual da eficiência técnica durante o período 1995-2016.

Ano	Global	Grupo Nuclear	Grupo Renovável
1995	0,628	0,378	0,746
1996	0,654	0,395	0,812
1997	0,641	0,379	0,779
1998	0,689	0,441	0,807
1999	0,832	0,785	0,833
2000	0,777	0,795	0,712
2001	0,809	0,780	0,812
2002	0,810	0,849	0,756
2003	0,835	0,848	0,848
2004	0,858	0,856	0,906
2005	0,873	0,899	0,915
2006	0,861	0,865	0,911
2007	0,879	0,892	0,914
2008	0,881	0,871	0,949
2009	0,875	0,849	0,964
2010	0,836	0,778	0,945
2011	0,736	0,632	0,829
2012	0,734	0,645	0,815
2013	0,746	0,662	0,836
2014	0,698	0,604	0,768
2015	0,736	0,743	0,716
2016	0,697	0,597	0,734

II. Índice de Malmquist

Tabela 4. Índice de Malmquist (M) durante o período 1996-2006.

País	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
BE	1,090	1,079	0,858	1,101	0,887	1,004	0,994	0,981	0,902	0,998	1,035
BU	0,890	0,915	1,119	1,057	1,108	0,976	1,154	0,860	1,058	0,799	0,749
CZ	0,990	1,111	1,084	1,048	0,997	1,014	1,090	0,796	0,903	0,762	0,893
DE	1,082	1,041	0,932	1,070	1,011	1,013	0,951	1,158	1,077	1,124	0,897
GE	0,972	1,179	1,011	0,992	0,759	0,957	1,007	1,002	1,020	1,043	1,031
ES	1,019	0,799	0,708	1,068	0,948	0,917	0,129	0,432	0,775	0,534	1,154
IR	1,077	0,940	0,842	1,125	1,058	1,030	1,002	1,128	1,006	0,920	1,018
GR	0,965	1,040	0,978	0,853	0,882	1,116	0,985	0,831	1,030	0,953	1,016
SP	1,157	0,930	1,002	0,954	0,972	1,063	0,986	1,078	1,007	1,063	1,075
FR	0,914	1,269	0,622	0,293	1,015	0,919	0,667	0,812	0,920	0,781	0,844
IT	1,004	1,071	0,909	1,009	0,859	0,976	1,016	1,041	0,987	1,075	0,998
LA	0,738	1,137	1,148	0,795	0,871	1,263	0,543	0,884	1,501	1,163	0,872
HU	0,896	0,928	1,166	0,988	1,123	1,008	1,081	0,721	0,876	1,079	0,709
NE	0,996	1,181	0,867	1,189	0,822	1,097	1,002	1,071	0,901	1,055	0,991
AU	0,835	0,818	0,962	1,004	1,026	0,766	0,966	0,598	0,950	0,949	1,057
PL	1,029	1,094	1,074	1,075	1,078	0,882	0,838	0,844	0,983	1,082	0,888
PT	0,918	1,064	0,953	1,127	0,917	0,876	1,146	0,824	1,020	1,046	0,971
RO	0,945	0,828	1,080	1,130	1,017	1,007	1,136	1,030	1,139	1,080	1,005
SV	1,107	0,982	1,003	1,176	0,998	0,940	1,000	1,049	1,111	0,975	1,067
FI	0,901	1,090	1,140	1,066	1,106	0,858	0,980	0,890	1,110	1,331	0,808
SW	0,565	1,909	0,915	1,243	1,329	0,804	0,784	0,803	1,176	1,236	0,934
UK	1,140	1,066	0,932	1,017	1,009	1,011	1,015	1,072	0,957	1,035	0,952

Tabela 5. Índice de Malmquist (M) durante o período 2007-2016.

País	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
BE	1,026	0,961	0,874	0,962	1,097	0,877	1,048	1,074	0,951	1,181
BU	0,806	0,692	0,742	0,746	0,904	1,007	1,135	0,941	1,016	1,130
CZ	0,791	0,799	0,728	0,677	0,979	1,007	0,955	1,164	1,006	1,032
DE	1,024	1,069	1,033	0,989	1,161	1,154	1,080	1,214	1,267	0,894
GE	1,111	1,032	1,024	1,016	1,168	0,986	1,002	1,080	1,070	1,056
ES	0,874	0,748	0,712	0,985	0,874	0,838	1,019	0,921	0,929	1,099
IR	1,068	0,893	0,990	1,170	1,006	0,880	1,048	1,047	1,105	1,075
GR	1,334	0,869	0,814	0,827	1,031	0,823	0,825	1,139	1,011	1,137
SP	1,023	1,222	1,180	1,144	0,875	0,941	1,260	0,916	0,946	1,225
FR	0,790	0,884	0,844	0,907	1,285	0,829	0,974	1,814	0,847	0,771
IT	1,023	0,952	0,966	1,000	0,955	0,915	1,005	1,020	1,038	1,068
LA	1,100	1,004	1,045	0,847	0,802	0,847	0,950	0,932	1,001	1,080
HU	0,671	0,803	0,847	0,898	0,955	0,903	1,157	0,991	1,112	1,038
NE	0,901	0,959	0,980	1,065	1,273	0,737	1,034	0,857	0,917	1,031
AU	1,166	1,032	1,083	0,854	1,042	1,231	1,037	1,212	0,795	1,031
PL	0,792	0,856	0,909	0,804	0,843	0,867	0,845	0,923	0,820	0,916
PT	1,223	1,188	0,930	1,165	0,955	1,086	0,981	0,983	0,974	0,926
RO	0,805	0,640	0,920	0,497	0,507	0,999	1,236	1,000	1,083	1,153
SV	1,005	0,980	1,048	1,007	0,892	0,599	0,658	1,394	0,849	1,083
FI	1,007	1,062	0,821	0,922	0,968	1,130	0,759	0,846	0,867	0,870
SW	0,988	0,963	0,803	0,773	1,260	1,165	0,937	1,350	1,110	0,887
UK	0,354	0,920	0,896	1,006	0,841	0,884	1,107	1,154	1,185	1,327

Tabela 6. Efeito *catching up* (EFFCH) durante o período 1996-2006.

País	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
BE	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
BU	0,896	0,813	1,369	2,975	1,072	0,987	1,065	0,795	1,042	0,782	0,822
CZ	1,054	0,984	1,273	1,194	1,018	1,057	1,022	0,802	0,972	0,834	1,102
DE	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
GE	0,972	1,048	1,170	0,916	0,733	0,900	1,034	1,046	0,969	1,078	0,946
ES	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
IR	1,000	1,000	0,915	1,092	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
GR	0,951	1,145	0,976	0,828	0,916	1,120	0,962	0,782	1,041	0,902	1,006
SP	1,244	0,849	1,150	0,860	0,963	1,029	1,031	1,119	0,972	1,067	1,023
FR	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
IT	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
LA	0,925	1,062	1,317	0,825	0,892	1,901	0,581	1,452	1,456	1,161	0,980
HU	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
NE	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
AU	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
PL	1,121	1,029	1,044	1,028	0,967	0,907	0,961	1,152	1,168	1,000	1,000
PT	0,952	1,069	0,910	1,109	0,925	0,937	1,112	0,881	1,055	0,984	0,949
RO	1,216	0,824	1,222	1,340	0,889	1,115	1,119	1,035	1,785	1,000	1,000
SV	1,272	0,903	1,209	3,070	0,836	0,996	0,955	1,092	1,226	0,839	0,966
FI	0,967	1,008	1,298	0,952	1,073	0,793	1,038	0,991	1,093	1,391	0,784
SW	0,639	1,609	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
UK	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabela 7. Efeito *catching up* (EFFCH) durante o período 2007-2016.

País	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
BE	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
BU	1,088	0,765	0,870	0,790	0,795	1,082	1,121	0,712	1,076	1,180
CZ	1,424	0,980	0,865	0,723	0,739	1,151	1,036	0,920	1,024	1,158
DE	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
GE	1,080	0,992	1,043	1,023	0,958	0,994	1,007	0,862	1,026	1,085
ES	1,000	1,000	1,000	0,985	0,913	0,964	1,025	0,904	0,854	1,003
IR	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
GR	1,270	0,971	0,860	0,786	1,087	0,916	0,827	0,998	0,975	1,078
SP	0,978	1,167	1,202	1,140	0,738	0,907	1,271	0,661	0,928	1,283
FR	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
IT	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,942	1,060	0,984
LA	1,020	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
HU	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
NE	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
AU	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
PL	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,994	0,798	0,810
PT	1,104	1,157	0,921	1,140	0,901	0,952	0,950	0,756	0,940	0,929
RO	1,000	1,000	1,000	0,595	0,541	1,031	1,198	0,779	1,110	1,169
SV	0,872	1,056	0,957	0,942	1,640	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
FI	1,230	1,201	0,940	0,988	1,064	1,305	0,745	0,656	1,002	0,910
SW	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
UK	0,927	1,010	0,952	0,963	0,735	0,954	1,135	0,980	1,183	1,262

Tabela 8. Variação tecnológica (TECH) durante o período 1996-2006.

País	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
BE	1,090	1,079	0,858	1,101	0,887	1,004	0,994	0,981	0,902	0,998	1,035
BU	0,993	1,125	0,817	0,355	1,034	0,989	1,084	1,082	1,015	1,022	0,912
CZ	0,939	1,129	0,852	0,878	0,979	0,960	1,066	0,994	0,929	0,914	0,811
DE	1,082	1,041	0,932	1,070	1,011	1,013	0,951	1,158	1,077	1,124	0,897
GE	1,000	1,125	0,864	1,083	1,036	1,063	0,973	0,959	1,053	0,968	1,090
ES	1,019	0,799	0,708	1,068	0,948	0,917	0,129	0,432	0,775	0,534	1,154
IR	1,077	0,940	0,920	1,030	1,058	1,030	1,002	1,128	1,006	0,920	1,018
GR	1,015	0,908	1,003	1,030	0,962	0,997	1,024	1,062	0,990	1,056	1,010
SP	0,930	1,096	0,871	1,109	1,009	1,034	0,956	0,963	1,036	0,996	1,050
FR	0,914	1,269	0,622	0,293	1,015	0,919	0,667	0,812	0,920	0,781	0,844
IT	1,004	1,071	0,909	1,009	0,859	0,976	1,016	1,041	0,987	1,075	0,998
LA	0,797	1,070	0,871	0,964	0,977	0,664	0,934	0,609	1,031	1,002	0,890
HU	0,896	0,928	1,166	0,988	1,123	1,008	1,081	0,721	0,876	1,079	0,709
NE	0,996	1,181	0,867	1,189	0,822	1,097	1,002	1,071	0,901	1,055	0,991
AU	0,835	0,818	0,962	1,004	1,026	0,766	0,966	0,598	0,950	0,949	1,057
PL	0,918	1,063	1,028	1,046	1,115	0,973	0,872	0,732	0,842	1,082	0,888
PT	0,965	0,995	1,048	1,015	0,991	0,935	1,030	0,935	0,967	1,063	1,022
RO	0,777	1,005	0,884	0,844	1,143	0,902	1,016	0,995	0,638	1,080	1,005
SV	0,870	1,087	0,830	0,383	1,195	0,944	1,047	0,960	0,906	1,163	1,105
FI	0,932	1,081	0,878	1,120	1,031	1,082	0,945	0,898	1,016	0,957	1,030
SW	0,884	1,186	0,915	1,243	1,329	0,804	0,784	0,803	1,176	1,236	0,934
UK	1,140	1,066	0,932	1,017	1,009	1,011	1,015	1,072	0,957	1,035	0,952

Tabela 9. Variação tecnológica (TECH) durante o período 2007-2016.

País	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
BE	1,026	0,961	0,874	0,962	1,097	0,877	1,048	1,074	0,951	1,181
BU	0,740	0,905	0,854	0,944	1,138	0,931	1,013	1,323	0,944	0,958
CZ	0,555	0,815	0,842	0,937	1,324	0,875	0,922	1,266	0,982	0,891
DE	1,024	1,069	1,033	0,989	1,161	1,154	1,080	1,214	1,267	0,894
GE	1,029	1,040	0,981	0,993	1,219	0,992	0,995	1,253	1,043	0,974
ES	0,874	0,748	0,712	1,000	0,957	0,869	0,994	1,019	1,088	1,096
IR	1,068	0,893	0,990	1,170	1,006	0,880	1,048	1,047	1,105	1,075
GR	1,050	0,895	0,947	1,052	0,948	0,898	0,998	1,141	1,037	1,055
SP	1,047	1,047	0,982	1,004	1,187	1,037	0,991	1,385	1,019	0,954
FR	0,790	0,884	0,844	0,907	1,285	0,829	0,974	1,814	0,847	0,771
IT	1,023	0,952	0,966	1,000	0,955	0,915	1,005	1,083	0,980	1,085
LA	1,078	1,004	1,045	0,847	0,802	0,847	0,950	0,932	1,001	1,080
HU	0,671	0,803	0,847	0,898	0,955	0,903	1,157	0,991	1,112	1,038
NE	0,901	0,959	0,980	1,065	1,273	0,737	1,034	0,857	0,917	1,031
AU	1,166	1,032	1,083	0,854	1,042	1,231	1,037	1,212	0,795	1,031
PL	0,792	0,856	0,909	0,804	0,843	0,867	0,845	0,929	1,027	1,130
PT	1,108	1,027	1,009	1,022	1,060	1,140	1,032	1,300	1,036	0,997
RO	0,805	0,640	0,920	0,836	0,937	0,968	1,032	1,284	0,976	0,987
SV	1,153	0,928	1,095	1,069	0,544	0,599	0,658	1,394	0,849	1,083
FI	0,819	0,884	0,874	0,933	0,910	0,866	1,020	1,289	0,865	0,956
SW	0,988	0,963	0,803	0,773	1,260	1,165	0,937	1,350	1,110	0,887
UK	0,382	0,911	0,942	1,045	1,145	0,927	0,975	1,177	1,002	1,052

Tabela 10. Média geométrica anual da variação tecnológica (TECH), do efeito catching up (EFFCH) e do Índice de Malmquist (M) durante o período 1995-2016.

Ano	EFFCH	TECH	M
1996	1,001	0,953	0,954
1997	1,006	1,042	1,049
1998	1,076	0,890	0,958
1999	1,107	0,892	0,988
2000	0,964	1,020	0,983
2001	1,020	0,953	0,971
2002	0,988	0,883	0,872
2003	0,998	0,886	0,885
2004	1,068	0,946	1,010
2005	0,995	0,992	0,988
2006	0,979	0,967	0,946
2007	1,039	0,886	0,921
2008	1,010	0,913	0,922
2009	0,980	0,929	0,910
2010	0,949	0,955	0,905
2011	0,940	1,029	0,968
2012	1,009	0,921	0,929
2013	1,009	0,983	0,992
2014	0,908	1,181	1,072
2015	0,996	0,992	0,988
2016	1,033	1,005	1,038