

---

# EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: UMA ANÁLISE DAS MAIORES ECONOMIAS MUNDIAIS

*Energy efficiency and sustainable development: an analysis of the world's largest economies*

**Loredany Consule Crespo Rodrigues**

Economista. Doutoranda em Economia Aplicada pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Avenida Purdue, s/nº, Campus Universitário. Viçosa, Minas Gerais. CEP 36.570-900. loredanyufv@hotmail.com

**Adriano Provezano Gomes**

Agrônomo. Doutor em Economia Aplicada (UFV). Professor Titular do Departamento de Economia da UFV. apgomes@ufv.br

**Gabriel Teixeira Ervilha**

Economista. Doutor em Economia Aplicada (UFV). Técnico do Departamento de Economia da UFV. gabriel.ervilha@ufv.br

---

**Resumo:** A energia é fundamental para o setor produtivo dos países, porém seu consumo elevado tem causado impactos ambientais. Considerando que muito se tem discutido sobre como manter o crescimento econômico sem danificar ainda mais o meio ambiente, este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência energética das maiores economias mundiais, utilizando dados do Banco Mundial. Para tal, criou-se um índice de eficiência energética que considera, simultaneamente, as eficiências produtiva e ambiental dos países. Utilizando a análise envoltória de dados (DEA), foram elaborados dois modelos para avaliar essas eficiências. Os resultados revelam que é possível obter ganhos significativos, apenas fazendo uma gestão eficiente dos recursos utilizados. Nesse sentido, conclui-se que a adoção das melhores práticas observadas pode gerar impactos relevantes na busca pelo desenvolvimento sustentável.

**Palavras-chave:** Eficiência Produtiva; Eficiência Ambiental; Análise Envoltória de Dados.

**Abstract:** Energy is fundamental for the productive sector of the countries, but its high consumption has caused environmental impacts. Considering that much has been discussed about how to maintain economic growth without damaging the environment even further, this paper aimed to assess the energy efficiency of the largest world economies using data of the World Bank. To this end, an energy efficiency index that considers, simultaneously, the productive and environmental efficiencies of the countries was created. With the Data Envelopment Analysis (DEA), two models were developed to evaluate these efficiencies. The results show that it is possible to achieve significant gains, only by efficiently managing the resources used. In this sense, it is concluded that the adoption of the best practices observed can generate relevant impacts in the search for sustainable development.

**Keywords:** Productive Efficiency; Environmental Efficiency; Data Envelopment Analysis.

## 1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas ocorridas em todo o mundo têm alertado a população mundial com relação ao desenvolvimento sustentável. Governantes do mundo inteiro estão em busca de minimizar os danos ambientais causados pelo processo produtivo. Conforme Oh (2010), a cooperação global em regulamentos ambientais aumentou significativamente, e o Protocolo de Quioto e o Roteiro de Bali são exemplos de que os países estão na busca pela eficiência energética, visando ao aumento do uso de energias renováveis e à redução da emissão de gases poluentes e causadores do efeito estufa.

Considerando que os recursos naturais são finitos e estão cada vez mais escassos, a necessidade de utilizá-los de forma eficiente é fundamental para a sobrevivência de gerações futuras. A extração incontrolada desses recursos fez com que a Organização das Nações Unidas (ONU) criasse, na década de 1980, a Comissão *Brundtland* (Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento – UNCED), que aponta como são incompatíveis os padrões de produção e consumo vigentes com o desenvolvimento sustentável (BRAGA, 2007).

Ressalta-se que o consumo de energia, embora seja essencial para o setor produtivo, é responsável por grande parte das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), um dos principais causadores do aquecimento global (IPCC, 2007). Além disso, o consumo de energia afeta o bem-estar social das famílias, que demandam esse bem para atender às suas necessidades (COHEN; LENZEN; SCHAEFFER, 2015). Ferguson, Wilkinson e Hill (2000) demonstram que o consumo de energia afeta a qualidade de vida e renda da população. Portanto, a energia é fundamental para o processo produtivo e para o bem-estar das famílias. Neste sentido, consumir energia de forma eficiente é fundamental.

Segundo *US National Policy Development Group* (2001), eficiência energética é a capacidade de utilizar menos energia para produzir a mesma quantidade de iluminação, aquecimento, transporte e outros serviços baseados na energia. Portanto, um país eficiente energeticamente consegue minimizar os impactos do crescimento econômico (consumo de energia) no meio ambiente.

Nesse sentido, as grandes economias mundiais estão sendo pressionadas para melhorar a eficiência energética e, dessa forma, devem buscar meios de reduzir o consumo de energia para evitar o desperdício energético e a poluição, contribuindo para o desenvolvimento sustentável (NARAYAN; SMYTH; PRASAD, 2007). Porém, conforme Honma e Hu (2014), não é aceitável que a redução do consumo de energia reduza o crescimento econômico, sendo primordial que a eficiência energética dos países melhore sem prejudicar o crescimento econômico. O objetivo não é impedir o crescimento, mas criar meios para que isso ocorra de forma sustentável.

Portanto, em vista das mudanças climáticas, inclusive com diversas catástrofes ambientais, os governantes têm se conscientizado da necessidade de buscar formas de atingir o desenvolvimento sustentável, colocando essas questões em suas agendas políticas. A eficiência energética é uma das formas de alcançar esse desenvolvimento.

Sendo assim, criar um indicador de eficiência energética para os países a fim de compará-los e propiciar informações sobre os *benchmarks* torna-se relevante. Mensurar a eficiência energética dos países permite que um caminho para o desenvolvimento sustentável seja traçado, fornecendo informações úteis para políticas energéticas e ambientais.

É válido dizer que o efeito escala pode compensar os benefícios alcançados pela eficiência energética, conhecido na literatura como *rebound effect*. Ainda assim, criar o indicador é válido para incentivar a adoção de processos produtivos mais sustentáveis em países onde a tecnologia utilizada é obsoleta.

Alguns estudos buscaram mensurar a eficiência energética de determinados países, levando em consideração os aspectos econômicos e ambientais. Iram *et al.* (2020) identificaram a eficiência do uso de energia, das emissões de CO<sub>2</sub> e a eficiência econômico-ambiental das economias da Orga-

nização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), entre 2013 e 2017. Iqbal *et al.* (2019) utilizaram o trilema de eficiência energética, eficiência ambiental e eficiência na emissão de CO<sub>2</sub> para mensurar o consumo de energia, a emissão de carbono e a eficiência econômico-ambiental de 20 países industrializados. Um ano mais tarde, Xia *et al.* (2020) criaram índices de eficiência energética, intensidade energética e meio ambiente para os países da OCDE, revelando que esses países apresentam melhor desempenho em sustentabilidade ambiental. Já Zhang *et al.* (2021) empregaram a técnica de análise envoltória de dados (DEA) para mensurar as eficiências energética e ambiental de alguns países da Europa Central e Ocidental entre 2010 e 2014 e sugeriram reformas no setor de energia da maioria dos países analisados.

Ressalta-se que os trabalhos mencionados ficam restritos aos fatores de produção tradicionais (capital e trabalho), acrescentando a energia na função de produção. Esta pesquisa vai além ao incluir um fator essencial para o processo produtivo: os recursos naturais. A inclusão desse insumo na função de produção faz com que os resultados obtidos sejam mais aderentes com a realidade. Adicionalmente, este estudo leva em consideração a possível existência do *rebound effect*, além de analisar as 50 maiores economias mundiais.

Diante disso, o objetivo desta pesquisa é avaliar a eficiência energética de 50 países, considerando duas condições fundamentais para o desenvolvimento contínuo e sustentável: a eficiência produtiva e a eficiência ambiental. Para calcular essas eficiências, utilizou-se a análise envoltória de dados (DEA), que tem sido amplamente aplicada em trabalhos que avaliam as eficiências energética e ambiental (BOYD; PANG, 2000; ZHOU; ANG; POH, 2008). Enquanto a eficiência produtiva busca maximizar a produção para dada quantidade de fatores produtivos, a ambiental visa a reduzir o impacto da utilização desses fatores no meio ambiente, minimizando a emissão de CO<sub>2</sub>.

Os principais resultados encontrados revelam que, na média, a eficiência produtiva é maior que a eficiência ambiental. Ainda assim, é possível melhorar a eficiência do processo produtivo em ambos os aspectos. Adicionalmente, constatou-se que a maior parte dos países com maiores medidas de eficiência energética são classificados como desenvolvidos.

Este estudo contribui com a literatura, pois, ao analisar as 50 maiores economias mundiais e utilizar uma função de produção mais coerente com o processo de produção real, disponibiliza informações úteis para pesquisadores e *policy makers*, auxiliando no direcionamento de políticas que visem ao desenvolvimento sustentável.

Além desta introdução, o artigo está estruturado em quatro seções. Na Seção 2 é apresentada uma revisão da literatura relacionada ao tema; na Seção 3 encontram-se o método, os dados e variáveis utilizados. Na Seção 4, os resultados são apresentados e discutidos e, finalmente, na Seção 5, o trabalho é concluído.

## 2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A energia é insumo essencial para o processo produtivo. No entanto, juntamente com resultados desejáveis (Produto Interno Bruto – PIB, por exemplo), alguns efeitos indesejáveis ocorrem (como a emissão de gases poluentes – CO<sub>2</sub>). Dessa forma, utilizar tais insumos de forma eficiente é importante para que os impactos indesejáveis do processo produtivo sejam minimizados. Conforme Bian e Yang (2010), haverá maior emissão de poluentes e maior desperdício de energia caso haja um declínio no desempenho do uso desse insumo.

Segundo Selvakkumaran e Limmeechokchai (2013), quanto maior o nível de atividade econômica, maior o consumo de energia e, conseqüentemente, maiores os impactos causados ao meio ambiente. Ainda conforme os autores, a eficiência energética permite a mitigação da emissão de CO<sub>2</sub> e a redução da importação de energia. Adicionalmente, com o consumo eficiente de energia, o esgotamento de energias de fontes não renováveis baratas é postergado (CAMIOTO, 2013).

É importante dizer que a direção da relação entre crescimento econômico e consumo de energia não é unânime na literatura. Enquanto alguns estudos revelam relação unidirecional (ALTINAY; KARAGOL, 2005; LEE, 2005; AL-IRIANI, 2006; APERGIS; PAYNE, 2009), outros demonstram que essa relação é bidirecional (ANG, 2008; AKINLO, 2008; MAHADEVAN; ASAFU-AGJAYE, 2007) e alguns ainda apontam que a relação entre essas variáveis é neutra (JOBERT; KARANFIL, 2007).

Ainda assim, é de suma importância encontrar fontes energéticas renováveis para reduzir os danos ambientais causados pelo consumo de energia e minimizar os riscos de abastecimento, como a crise do petróleo que ocorreu em 1973-1974 e afetou a economia de potências mundiais. Vale ressaltar que o petróleo não é tão simples de ser substituído, tendo em vista que pode ser transportado sem dificuldades e produz vários tipos de combustíveis para múltiplas aplicações, além de possuir elevado conteúdo energético (COSTA; PRATES, 2005).

Dessa forma, torna-se ainda mais importante o consumo eficiente desse recurso. Conforme Garcia (2013), a sustentabilidade ambiental busca a manutenção dos sistemas que mantêm a vida no planeta de maneira contínua, assegurando as capacidades de abastecimento do ecossistema global em prover os insumos mais básicos à vida (alimentos, água, ar e energia), mitigando desperdícios e reduzindo o impacto no meio ambiente.

Nesse contexto, cabe destacar a importância de uma matriz energética sustentável para reduzir os danos ambientais associados ao consumo de energia, haja vista seu efeito sobre a relação entre eficiência ambiental e energética. Isso porque países cuja fonte primária de energia é baseada, predominantemente, em fósseis, causam mais danos ambientais quando comparados com países com uma matriz energética mais sustentável, para um mesmo nível de consumo de energia.

Segundo Omer (2009), reduzir a dependência em combustíveis fósseis, por meio de inovações tecnológicas e incentivo ao mercado de energia renovável, contribui para a redução das emissões e, conseqüentemente, para a preservação do ecossistema. Desse modo, o uso racional de energia e de fontes renováveis é, de maneira geral, fundamental para políticas energéticas responsáveis (OMER, 2009)<sup>1</sup>.

Portanto, a eficiência energética é um meio de otimizar a utilização do consumo de energia sem afetar negativamente o crescimento econômico. Ou seja, é uma maneira de o desenvolvimento dos países ocorrer de forma sustentável. Dada a importância da energia no setor produtivo e o impacto que seu consumo vem causando ao meio ambiente, vários estudos relacionados à energia vêm sendo realizados.

Segundo Loken (2007) e Zhou, Ang e Poh (2008), o incentivo de pesquisadores na formulação e aplicação de técnicas analíticas de modelagem em estudos de energia aumentou significativamente desde a crise mundial de petróleo. Pode-se citar Pollitt (1996) e Chitkara (1999), que avaliaram a eficiência produtiva e o desempenho operacional das usinas nucleares nos EUA, Reino Unido e Índia. Os pesquisadores Raczka (2001), Sueyoshi e Goto (2001) e Korhonen e Luptacik (2004) mediram a eficiência energética das usinas elétricas na Polônia, EUA, Japão e Noruega.

Em 2011, Niu *et al.* (2011) avaliaram a causalidade entre consumo de energia, crescimento do PIB e emissões de carbono para oito países da Ásia-Pacífico, entre 1971 e 2005. Os resultados revelam que, embora a participação relativa dos países em desenvolvimento no consumo de energia mundial tenha registrado aumento acumulado superior a 100% nas últimas três décadas, as emissões de carbono, o consumo *per capita* de energia e a eficiência no uso de energia desses países são bem inferiores aos dos países desenvolvidos.

Pao e Tsai (2010) analisaram os países do BRIC (Brasil, Rússia, Índia e China) e concluíram que é necessário que esses países aumentem o investimento em fornecimento de energia e em efi-

<sup>1</sup> Nesse contexto, destaca-se o Brasil, com 83% de sua matriz energética baseada em fontes renováveis, sendo 63,8% hidrelétricas, 9,3% eólicas, biomassa e biogás (8,9%) e solar centralizada (1,4%) (BRASIL, 2020). A utilização de fontes renováveis contribui para a redução na emissão de gases do efeito estufa.

ciência energética e intensifiquem políticas de conservação de energia para reduzir o desperdício energético e as emissões de CO<sub>2</sub> sem prejudicar o crescimento econômico.

O estudo realizado por Belke, Dobnik e Dreger (2011) analisou a relação de longo prazo entre consumo de energia e PIB real de 25 países da OCDE. Segundo os autores, há relação direta entre consumo de energia e crescimento econômico, sendo importante considerar tal relação no planejamento de políticas eficientes de conservação energética. De acordo com Menkes (2004), o investimento em eficiência energética permite um retorno no curto prazo de cerca de 20% a 25% dos recursos, sendo que no longo prazo esse retorno pode ultrapassar 100%, sem contabilizar os ganhos ambientais.

Incluindo a eficiência ambiental no contexto de eficiência energética, pode-se citar o estudo de Iqbal *et al.* (2019) que, ao mensurar o consumo de energia, a emissão de carbono e a eficiência econômico-ambiental dos 20 principais países industrializados do mundo por meio da DEA, revelam que a maioria dos países analisados é economicamente mais eficiente quando comparada com a eficiência ambiental. Os autores ainda demonstraram que o índice de abertura econômica e o PIB *per capita* têm efeito positivo sobre a eficiência econômico-ambiental. Já as intensidades energética e de emissão de CO<sub>2</sub> afetam negativamente essa medida.

Por sua vez, Iram *et al.* (2020) mensuraram a qualidade ambiental de alguns países da OCDE utilizando a DEA no período de 2013 a 2017. Os resultados revelaram que a eficiência energética está fortemente relacionada com a emissão de carbono, destacando a importância de elevar a eficiência energética para melhorar a eficiência ambiental desses países.

Xia *et al.* (2020), utilizando dados em painel e a DEA, mensuraram a eficiência energética, intensidade energética e meio ambiente conjuntamente de países da OCDE. Os resultados apontaram que, ainda que a maioria dos países esteja promovendo a eficiência energética, por meio da formulação de políticas ambientais, há necessidade de melhorar a intensidade energética que ainda é muito alta nesses países. Os autores ainda ressaltaram a complexidade da relação entre energia (eficiência e intensidade) e meio ambiente, sendo necessário o desenvolvimento de políticas que abordem esses temas coletivamente.

Zhang *et al.* (2021) analisaram as eficiências energética e ambiental de alguns países da Europa Central e Ocidental entre 2010 e 2014. Ao utilizarem como insumos o consumo de energia e a força de trabalho, como produto desejável o PIB e produto indesejável a emissão de CO<sub>2</sub>, os autores ressaltaram a importância de políticas e programas de incentivo ao crescimento econômico sustentável, destacando a eficácia das políticas adotadas pelo Reino Unido, que obteve as maiores medidas de eficiências energética e ambiental.

Ressalta-se que, tradicionalmente, os modelos de avaliação de eficiência energética envolvem apenas o consumo de energia e os resultados econômicos, não considerando o impacto ambiental (WANG; WANG; WANG, 2009). Sendo assim, este estudo contribui para a literatura pois adota uma abordagem integrada entre eficiências produtiva e ambiental, incluindo os recursos naturais como insumo, visto que é um fator essencial para o processo produtivo.

Além disso, ao analisar a eficiência energética dos países, é possível identificar as políticas adotadas pelos mais eficientes, assim como auxiliar no planejamento de políticas públicas. Ressalta-se que o trabalho, além de avaliar as eficiências produtiva e ambiental separadamente e em conjunto (eficiência energética), analisa as 50 maiores economias mundiais, uma análise mais ampla que as já realizadas.

### 3. METODOLOGIA

Para mensurar as eficiências produtiva, ambiental e energética, adota-se o modelo de análise envoltória de dados (DEA). Esse método torna-se apropriado por se tratar de uma abordagem não

paramétrica, em que não há necessidade de estimar uma forma funcional para a função de produção, como seria necessário no caso da fronteira de produção estocástica (SFA), proposta por Aigner, Lovell e Schmidt (1977). Além disso, o método permite a identificação da eficiência de cada unidade produtiva, por meio dos escores de eficiência gerados pelo modelo (FERREIRA, 2005). Cabe ainda destacar que esse método tem sido amplamente utilizado em pesquisas relacionadas à energia, como apresentado na seção anterior.

### 3.1 Análise envoltória de dados (DEA)

A análise envoltória de dados (*data envelopment analysis – DEA*), resultante dos estudos de Charnes, Cooper e Rhodes (1978) e Banker, Charnes e Cooper (1984), é uma abordagem não paramétrica para a análise de eficiência relativa de firmas que possuem múltiplos insumos e produtos.

O princípio básico dessa metodologia é a obtenção de uma fronteira eficiente a partir de uma amostra de dados observados para diferentes unidades produtoras, denominadas DMUs (*decision making units*). A partir dessa fronteira, é possível verificar o desempenho de todos os demais países do ponto de vista da eficiência técnica.

Considere que existam  $k$  insumos e  $m$  produtos para cada  $n$  DMUs. São construídas duas matrizes: a matriz  $X$  de insumos, de dimensões ( $k \times n$ ) e a matriz  $Y$  de produtos, de dimensões ( $m \times n$ ), representando os dados de todas as  $n$  DMUs. Nas matrizes  $X$  e  $Y$ , cada linha representa, respectivamente, um insumo e um produto, e cada coluna representa uma DMU. Para a matriz  $X$ , é necessário que os coeficientes sejam não negativos e que cada linha e cada coluna contenha, pelo menos, um coeficiente positivo, isto é, cada DMU consome ao menos um insumo, e uma DMU, pelo menos, consome o insumo que está em cada linha. O mesmo raciocínio se aplica para a matriz  $Y$ .

Assim, para a  $i$ -ésima DMU, são representados os vetores  $x_i$  e  $y_i$ , para insumos e produtos, respectivamente. Para cada unidade produtiva, pode-se obter uma medida de eficiência, que é a razão entre todos os produtos e insumos, conforme apresentado a seguir:

$$Eficiência\ da\ DMU_i = \frac{u'y_i}{v'x_i} = \frac{u_1y_{1i} + u_2y_{2i} + \dots + u_my_{mi}}{v_1x_{1i} + v_2x_{2i} + \dots + v_kx_{ki}} \quad (1)$$

Em que  $u$  é um vetor ( $m \times 1$ ) de pesos nos produtos e  $v$  é um vetor ( $k \times 1$ ) de pesos nos insumos. A pressuposição inicial é que essa medida de eficiência requer um conjunto comum de pesos que será aplicado em todas as unidades produtivas. Entretanto, existe certa dificuldade em obter esse conjunto de pesos. Isso porque as DMUs podem estabelecer valores para os insumos e produtos de modos diferentes, e então adotarem diferentes pesos. A técnica DEA soluciona essa questão por meio de um problema de programação matemática em que se selecionam os pesos ótimos para cada unidade produtiva.

Assumindo retornos constantes à escala, o problema a ser solucionado para obter a eficiência da  $i$ -ésima DMU é dado por (COELLI; RAO; BATTESE, 1998):

$$\begin{aligned} &Max_{\varphi, \lambda} \varphi, \\ &sujeito\ a: \\ &-\varphi y_i + Y\lambda \geq 0, \\ &x_i - X\lambda \geq 0, \\ &\lambda \geq 0, \end{aligned} \quad (2)$$

Em que  $1 \leq \varphi < \infty$  e  $\varphi - 1$  é o aumento proporcional nos produtos que poderiam ser obtidos pela  $i$ -ésima DMU, mantendo-se constante a utilização de insumos. A medida de eficiência técnica é dada por  $1/\varphi$ , que varia de zero a um. Caso o valor de  $1/\varphi$  seja igual a um, o país será eficiente; caso contrário, será ineficiente. O parâmetro  $\lambda$  é um vetor ( $n \times 1$ ), cujos valores são calculados de forma a obter a solução ótima. Para um país eficiente, todos os valores de  $\lambda$  serão zero; para o ine-

ficiente, os valores de  $\lambda$  serão os pesos utilizados na combinação linear de outros países eficientes (*benchmarks*), que influenciam a projeção do ineficiente sobre a fronteira calculada.

Ainda conforme Coelli, Rao e Battese (1998), o problema de programação linear com retornos constantes pode ser modificado para atender à pressuposição de retornos variáveis adicionando-se uma restrição de convexidade,  $N_1\lambda = 1$ , em que  $N_1$  é um vetor ( $n \times 1$ ) de algarismos unitários.

O modelo apresentado busca identificar a ineficiência técnica dos países mediante aumento proporcional dos produtos, isto é, são modelos com orientação produto. Entretanto, podem-se também obter medidas de eficiência técnica como redução proporcional na utilização de insumos, também conhecido como modelo de orientação insumo. Nesse caso, a eficiência da  $i$ -ésima DMU, considerando-se a pressuposição de retornos constantes à escala, é dada por:

$$\begin{aligned} & \text{Min}_{\theta, \lambda} \theta, \\ & \text{sujeito a:} \\ & -y_i + Y\lambda \geq 0, \\ & \theta x_i - X\lambda \geq 0, \\ & \lambda \geq 0, \end{aligned} \quad (3)$$

Em que  $\theta$  é um escalar que representa a medida de eficiência do  $i$ -ésimo país. Caso o valor de  $\theta$  seja igual a um, o país será eficiente; caso contrário, será ineficiente.

### 3.2 Base de dados e procedimento proposto

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos na base do Banco Mundial e são referentes ao ano de 2013. Foram analisados os 50 países com maiores valores de PIB. Em conjunto, a produção desses países corresponde a aproximadamente 95% da produção mundial.

Para a obtenção da fronteira eficiente no modelo produtivo, foram utilizadas as seguintes variáveis, em que  $X_i$  representa os insumos e  $Y_i$  os produtos:

$X_1$ : Força de trabalho, composta pelo fornecimento de mão de obra, de 15 anos de idade ou mais, para a produção de bens e serviços de uma economia, em milhões de trabalhadores;

$X_2$ : Formação bruta de capital fixo (FBKFixo), que consiste no desembolso de adições ao imobilizado mais as mudanças líquidas no nível de estoques de uma economia, em bilhões de dólares correntes;

$X_3$ : Consumo de energia, referente ao uso de energia primária antes da transformação para outros combustíveis de uso final como insumos, em bilhões de quilogramas de óleo equivalente;

$X_4$ : Esgotamento de recursos naturais, que consiste na soma do esgotamento líquido da floresta e dos esgotamentos de energia e mineral, em bilhões de dólares correntes;

$Y_1$ : Produto Interno Bruto (PIB), composto pela soma do valor agregado bruto de todos os residentes, em bilhões de dólares correntes.

Com essas variáveis, foi possível elaborar uma função de produção para calcular a eficiência produtiva de cada país, em que a combinação de energia, capital, trabalho e recursos naturais geram um produto (PIB), e o país eficiente é aquele que maximiza seu PIB com os recursos disponíveis (orientação produto).

No modelo ambiental, os insumos utilizados no modelo produtivo se tornaram produto, e o insumo passou a ser a emissão de  $\text{CO}_2$ , decorrente da queima de combustíveis fósseis e da fabricação de cimento, em mil quilotoneladas. A emissão de  $\text{CO}_2$  foi escolhida por ser um dos produtos indesejáveis mais significativos gerados pelo processo produtivo. É importante salientar que, justamente por ser um produto indesejável, a emissão de  $\text{CO}_2$  foi considerada um insumo no modelo

ambiental, em que o país ambientalmente eficiente é aquele que minimiza a emissão de CO<sub>2</sub> no seu processo produtivo (orientação insumo). O Quadro 1 sintetiza os dois modelos utilizados.

Quadro 1 – Variáveis utilizadas nos modelos de eficiências produtiva e ambiental

Modelo de eficiência	Insumos		Produtos
Produtiva (EP) (orientação produto)	Força de trabalho, formação bruta de capital fixo, consumo de energia, esgotamento de recursos naturais	↑	Produto Interno Bruto (PIB)
Ambiental (EA) (orientação insumo)	↓	Emissão de CO <sub>2</sub>	Força de trabalho, formação bruta de capital fixo, consumo de energia, esgotamento de recursos naturais

Fonte: Elaboração própria.

De posse das eficiências produtiva e ambiental, calcula-se a média geométrica das duas medidas para se obter a eficiência energética de cada país. Optou-se pela média geométrica porque essa, diferentemente da média simples, não permite que haja substitutibilidade perfeita entre as medidas de eficiência produtiva e ambiental<sup>2</sup>. Em outras palavras, ao multiplicar ambas as medidas de eficiência, assume-se que elas estão relacionadas e cooperam para a eficiência energética. Segundo Ouyang e Yang (2020), quando as variáveis precisam cooperar para gerar algum produto, modelos multiplicativos são preferíveis.

Logo, o índice de eficiência energética é obtido da seguinte forma:

$$EE = \sqrt[2]{EP \times EA} \quad (4)$$

Em que *EE* é o índice de eficiência energética; *EP* é a eficiência produtiva; e *EA* é a eficiência ambiental.

Considerando que um país energeticamente eficiente é aquele que consegue produzir determinada quantidade consumindo proporcionalmente menos energia e, conseqüentemente, causando menos danos ambientais, é essencial que o indicador de eficiência energética considere ambas as eficiências: produtiva e ambiental. Para um país ser considerado eficiente energeticamente, não basta produzir o máximo com dada quantidade de recursos, mas produzir o máximo minimizando o impacto ambiental. Dessa forma, se um país tem eficiência ambiental igual a zero, sua eficiência energética também será zero. Isso porque as eficiências produtiva e ambiental não são partes independentes da eficiência energética, ratificando o procedimento adotado para o cálculo desse índice.

Em suma, o procedimento deste estudo foi realizado em três etapas. Inicialmente, elaborou-se o modelo produtivo, em que se avalia a eficiência técnica dos países com relação à sua produção. Nessa etapa, foi utilizado o modelo com retornos variáveis à escala e orientação produto. Na segunda etapa, elaborou-se um modelo de eficiência ambiental, em que se utilizou o modelo com retornos variáveis e orientação insumo. Na última etapa, foi calculado o índice de eficiência energética que é composto pelas eficiências produtiva e ambiental simultaneamente (equação 4).

2 A média geométrica impede que um país que seja eficiente no modelo produtivo (EP=1) e totalmente ineficiente no modelo ambiental (EA=0) obtenha um índice de eficiência energética de 0,5, por exemplo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Descrição da amostra

A relação do grupo dos países que apresentam os maiores e os menores valores de PIB e emissão de CO<sub>2</sub> é apresentada no Quadro 2. Observa-se que a relação entre essas variáveis não é a mesma ao comparar os dois grupos. Note que 70% dos países que pertencem ao grupo de maiores produtores também estão no grupo dos maiores emissores de CO<sub>2</sub>. Apenas França, Reino Unido e Itália estão entre os dez países com maiores PIB e não estão na relação dos dez que mais emitem CO<sub>2</sub>. Já Irã, Coreia do Sul e Arábia Saudita encontram-se entre os maiores emissores, porém não estão no grupo dos maiores produtores.

Ao analisar o grupo dos países com menores valores, observa-se o inverso, em que 70% dos países pertencentes ao grupo com menores PIB não estão entre os dez que menos emitem CO<sub>2</sub>. Apenas Portugal, Irlanda e Finlândia encontram-se nos dois grupos. A partir dessa análise, pode-se dizer que dificilmente os países que possuem os menores PIB e não estão entre os que menos emitem CO<sub>2</sub> serão energeticamente eficientes, pois há outros países que produzem mais emitindo menos CO<sub>2</sub>.

Quadro 2 – Países com maiores e menores valores do PIB e emissão de CO<sub>2</sub>

Maiores valores		Menores valores	
PIB	Emissão CO <sub>2</sub>	PIB	Emissão CO <sub>2</sub>
Estados Unidos	China	República Tcheca	Irlanda
China	Estados Unidos	Argélia	Dinamarca
Japão	Índia	Portugal	Suíça
Alemanha	Rússia	Paquistão	Suécia
França	Japão	Iraque	Hong Kong
Reino Unido	Alemanha	Cazaquistão	Portugal
Brasil	Irã	Irlanda	Finlândia
Rússia	Coreia do Sul	Grécia	Singapura
Itália	Arábia Saudita	Finlândia	Noruega
Índia	Brasil	Filipinas	Áustria

Fonte: Elaboração própria, conforme dados do Banco Mundial (s.d.).

Na Tabela 1, observam-se os valores máximos e mínimos, a média e o coeficiente de variação de cada variável. China foi o país que obteve os valores máximos em todas as variáveis, exceto do PIB, cujo maior valor foi obtido pelos Estados Unidos. Irlanda obteve os menores valores de emissão de CO<sub>2</sub>, força de trabalho e consumo de energia. Os valores mínimos de PIB, FBKFixo e recursos naturais foram obtidos por Peru, Grécia e Singapura, respectivamente.

Ao considerar a média das variáveis, observa-se que 24% dos países têm PIB superior à média. Com relação a FBKFixo, força de trabalho, consumo de energia e recursos naturais, esses valores são 26%, 20%, 20% e 30%, respectivamente. Apenas seis países apresentam emissão de CO<sub>2</sub> superior à média. Observa-se ainda que a menor dispersão entre os países é com relação aos recursos naturais, e a maior é com relação à emissão de CO<sub>2</sub>.

Tabela 1 – Medidas das variáveis com valores absolutos

Variáveis	Máximo	Mínimo	Média	Coefficiente de Variação (%)
PIB	16.748,85	201,18	1.431,79	190,63
Emissão de CO <sub>2</sub>	10.258,01	34,85	624,20	256,31
FBKFixo	4.372,71	29,16	354,28	215,41
Força de trabalho	781,45	2,26	51,22	247,41
Consumo de energia	3.004,91	13,02	236,97	218,47
Recursos naturais	18.211,04	0,00	2.313,79	165,27

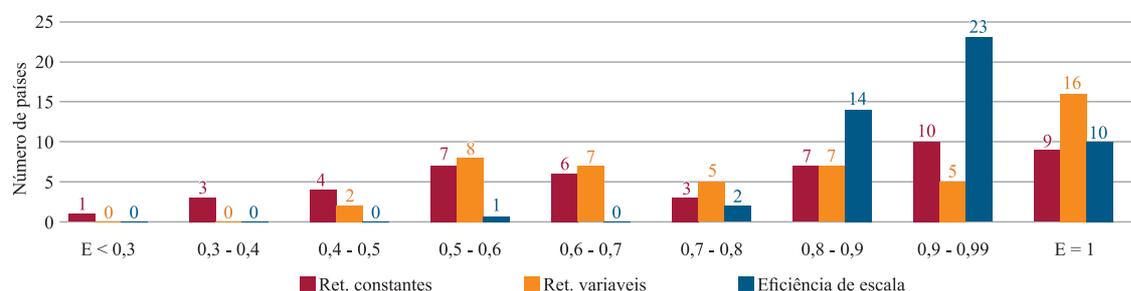
Fonte: Elaboração própria, conforme dados do Banco Mundial.

Nota: PIB, FBKFixo e recursos naturais estão em bilhões de dólares correntes; emissão de CO<sub>2</sub> em mil quilotoneladas; força de trabalho em milhões de trabalhadores; consumo de energia em bilhões de quilogramas de óleo equivalente.

## 4.2 Eficiência produtiva

No modelo de eficiência produtiva, foram identificados quais países maximizam sua produção, utilizando relativamente menos fatores produtivos. Na Figura 1, verifica-se que, no modelo com retornos variáveis à escala, 16 países são eficientes. Já no modelo com retornos constantes, esse número é reduzido para nove. Isso ocorre porque esse modelo inclui a pura eficiência e a eficiência de escala. Dessa forma, para que um país seja considerado eficiente no modelo com retornos constantes à escala, é necessário que também seja eficiente no modelo de retornos variáveis. Logo, se um país é eficiente nesse modelo e naquele é ineficiente, então há algum problema na escala de produção.

Figura 1 – Distribuição dos países segundo os intervalos de medidas de eficiências técnica e de escala (modelo produtivo)



Fonte: Resultados da pesquisa.

Com relação à eficiência de escala, nota-se que a maior parte dos países obteve medidas elevadas. Aproximadamente 66% dos países têm eficiência de escala superior a 0,9. Se considerar um intervalo um pouco mais amplo, superior a 0,8, esse valor sobe para 94%. Apenas três países obtiveram medidas inferiores a 0,8: China (0,502), Índia (0,729) e Rússia (0,789). Tal fato pode ser devido à dimensão populacional desses países, visto que a força de trabalho, diretamente relacionada com a população, é um dos insumos do modelo produtivo. Ainda assim, nenhum país apresentou eficiência de escala inferior a 0,5.

A eficiência média, considerando rendimentos variáveis à escala, foi de 0,810. Nesse sentido, há possibilidade de elevar, em média, 19% da produção mantendo fixa a quantidade de recursos. Esse resultado é relevante, pois conclui que, de maneira geral, é possível elevar o PIB dos países apenas fazendo uma gestão eficiente dos recursos. É importante dizer que esse aumento não é possível nos países eficientes, pois estes já maximizam sua produção com os recursos disponíveis.

Na Tabela 2, observa-se que a maioria dos países opera com rendimentos decrescentes à escala (aproximadamente 70%). Já considerando apenas os países eficientes, a maior parte opera com

rendimentos constantes e nenhum país apresenta retorno crescente. Com relação aos países ineficientes, somente Arábia Saudita está operando em escala ótima. Portanto, são 16 países eficientes tecnicamente<sup>3</sup>, considerando retornos variáveis à escala, sendo que sete trabalham com rendimentos decrescentes e nove com rendimentos constantes à escala.

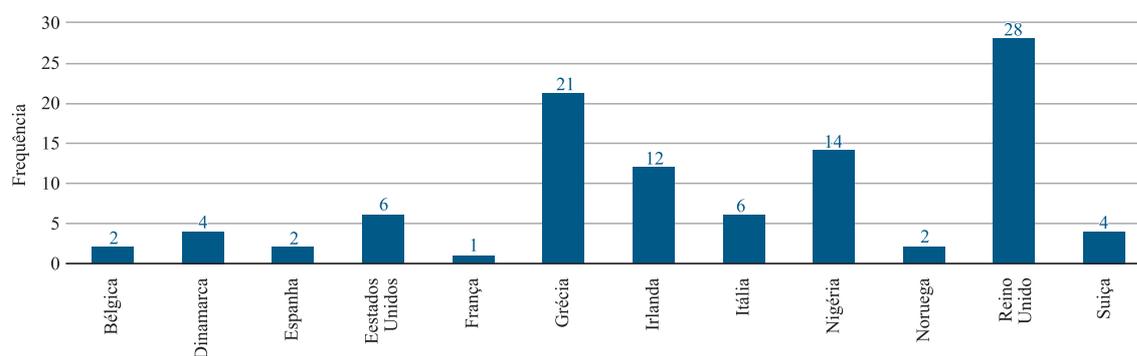
Tabela 2 – Distribuição dos países segundo tipo de retorno e grau de pura eficiência técnica (modelo produtivo)

Tipo de retorno	Eficientes	Ineficientes	Total
Crescente	-	5	5
Constante	9	1	10
Decrescente	7	28	35
Total	16	34	50

Fonte: Resultados da pesquisa.

Na Figura 2, é possível observar o número de vezes que cada país eficiente no modelo produtivo foi referência para os demais países. Vale lembrar que, caso os países ineficientes observem as práticas adotadas pelos seus respectivos *benchmarks* e as adotem, é possível que melhorem sua posição e, inclusive, tornem-se eficientes. Contudo, ressalta-se que questões culturais e geográficas devem ser consideradas em uma análise mais pormenorizada e individualizada dessas práticas adotadas.

Figura 2 – Frequência com que países eficientes foram *benchmarks*



Fonte: Resultados da pesquisa.

Ao observar algumas das características dos quatro principais *benchmarks* (Tabela 3), observa-se que somente Nigéria não conta com eficiência de escala (0,858). Note que os países *benchmarks* não são homogêneos. Com relação ao PIB, há diferença significativa entre Reino Unido (maior PIB) e Irlanda (menor PIB). O mesmo pode ser observado com a maioria das variáveis consideradas como insumos no modelo produtivo, em que a quantidade utilizada pelo Reino Unido é muito superior à quantidade utilizada pelos demais países e, ainda assim, encontra-se na fronteira eficiente. Isso ocorre porque utilizar maior quantidade de insumos não significa ser ineficiente, desde que gere proporcionalmente mais produto. E, como observado, Reino Unido tem maiores quantidades de insumos, mas sua produção também é superior. Ou seja, foi considerado eficiente, porque produz mais utilizando proporcionalmente menos recursos.

3 Países eficientes: Alemanha, Austrália, Bélgica, Dinamarca, Espanha, Estados Unidos, França, Grécia, Irlanda, Itália, Japão, Nigéria, Noruega, Reino Unido, Singapura e Suíça.

O mesmo pode ser observado pela Nigéria que, entre os quatro países apresentados na Tabela 3, apresenta os maiores valores de força de trabalho e recursos naturais e, nos demais insumos e no PIB, é o segundo país, entre os quatro principais *benchmarks*, com maiores valores.

Tabela 3 – Características dos principais *benchmarks* do modelo produtivo

Especificação	Reino Unido	Grécia	Nigéria	Irlanda
Eficiência Técnica	1,00	1,00	1,00	1,00
Eficiência de Escala	1,00	1,00	0,858	1,00
PIB	2.786,02	239,86	514,97	238,54
Consumo de Energia	191,60	23,33	134,00	13,02
FBKFixo	437,05	29,16	72,96	44,27
Força de trabalho	32,85	4,98	52,79	2,26
Recursos Naturais	1.842,25	18,70	3.191,45	10,79

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: PIB, FBKFixo e recursos naturais estão em bilhões de dólares correntes; emissão de CO<sub>2</sub> em mil quilotoneladas; força de trabalho em milhões de trabalhadores; consumo de energia em bilhões de quilogramas de óleo equivalente.

Ao considerar a proporção de insumos em relação ao produto de cada *benchmark*, verifica-se que três dos quatro países utilizam proporcionalmente mais a formação bruta de capital fixo, seguida pelo consumo de energia e força de trabalho. A exceção é a Nigéria, onde a proporção de energia em relação ao PIB é superior à formação bruta de capital fixo.

As proporções entre os países são diferentes. Enquanto Irlanda utiliza proporcionalmente menos energia e força de trabalho, sua proporção da formação bruta de capital fixo é a maior. Nigéria é o país com as maiores proporções de força de trabalho, consumo de energia e utilização de recursos naturais. Este último se destaca pelo valor significativamente maior desse país em relação aos demais.

Nesse contexto, conclui-se que é possível ser eficiente utilizando diferentes proporções de insumos. Ressalta-se a importância de considerar as particularidades de cada país e examinar cada um não apenas na dimensão econômica, mas também nas dimensões social, política e ambiental<sup>4</sup>.

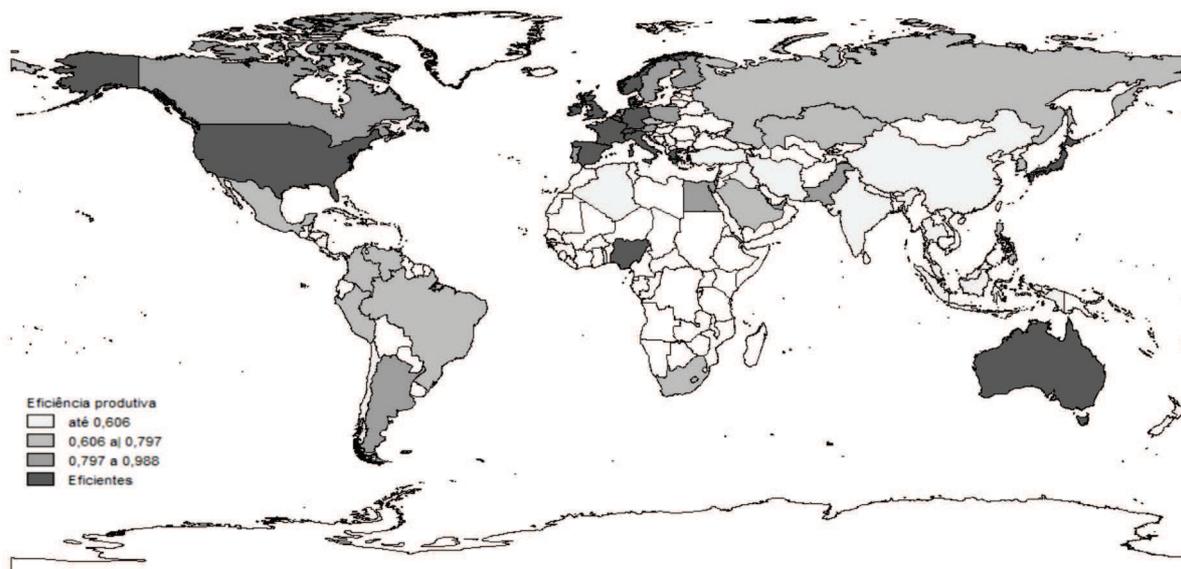
A partir da Figura 3, é possível identificar, geograficamente, a distribuição dos países segundo suas medidas de eficiência produtiva<sup>5</sup>. Note que todos os países eficientes e a maior parte dos países com medidas de eficiência mais elevadas são classificados como desenvolvidos.

Logo, pode-se dizer que existe relação direta entre eficiência produtiva e grau de desenvolvimento econômico. Isso porque os países desenvolvidos fazem investimentos significativos em tecnologias inovadoras e, conseqüentemente, seu processo produtivo torna-se mais eficiente, pois há otimização da utilização dos recursos.

4 A análise considerando a dimensão ambiental é realizada na Seção 4.3.

5 Os países ineficientes foram distribuídos em três intervalos iguais, cuja seqüência vai dos menos para os mais eficientes, representados pelos tons mais claros até os tons mais escuros, respectivamente. Os eficientes estão representados pelo cinza mais escuro, e os que não foram analisados estão em branco.

Figura 3 – Distribuição geográfica dos países de acordo com intervalos de medidas de eficiência produtiva



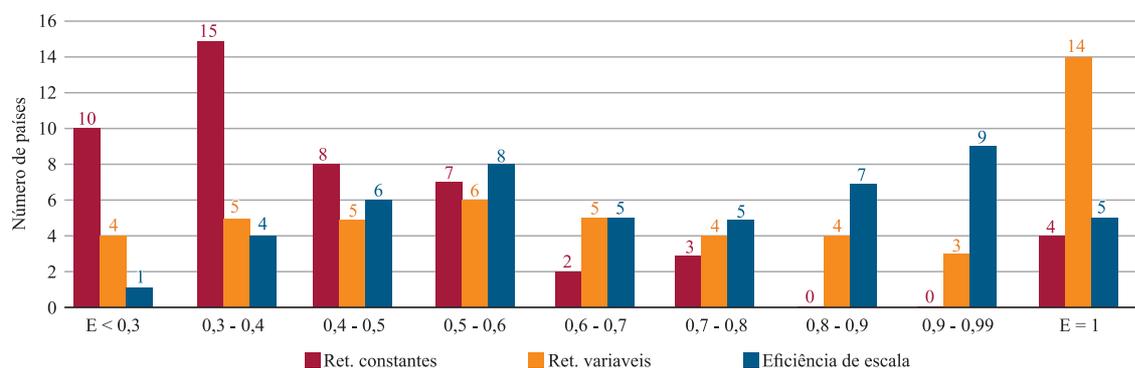
Fonte: Resultados da pesquisa.

### 4.3 Eficiência ambiental

Com relação ao modelo ambiental, é importante lembrar que a emissão de CO<sub>2</sub> é um produto “não desejável”. Sendo assim, o país ambientalmente eficiente é aquele que emite proporcionalmente menos CO<sub>2</sub> em sua produção.

Assim como ocorreu no modelo produtivo, os resultados encontrados no modelo ambiental variaram de acordo com o tipo de rendimento à escala. Note que, no modelo com retornos variáveis, 14 países foram eficientes. Ao considerar retornos constantes, esse número foi reduzido para quatro. Dessa forma, dos 14 países que obtiveram eficiência máxima, dez apresentam problemas na escala de produção. Esses dados podem ser confirmados na Figura 4. Outra observação refere-se à distribuição desses países, em que 52% obtiveram medidas inferiores a 0,4 no modelo com retornos constantes à escala. Esse valor é reduzido para 18% ao considerar retornos variáveis.

Figura 4 – Distribuição dos países segundo os intervalos de medidas de eficiência ambiental



Fonte: Resultados da pesquisa.

As medidas obtidas no modelo ambiental, com relação à eficiência de escala, não foram tão elevadas quanto as do modelo produtivo. Ainda assim, a maior parte dos países (52%) alcançou eficiência de escala superior à média (0,706).

As medidas de eficiência ambiental considerando retornos variáveis à escala tiveram média de 0,697, e metade dos países obteve medidas inferiores a essa. Com esse resultado, pode-se dizer que, em média, há possibilidade de reduzir 30% a emissão de CO<sub>2</sub>, mantendo fixos os fatores de produção. Isto é, caso os países ineficientes adotem as melhores medidas observadas em seus processos produtivos, fazendo uma gestão eficiente de seus recursos, é possível minimizar os danos ambientais sem impactar negativamente a produção e, dessa forma, ter um processo produtivo mais sustentável.

Cabe destacar que esse valor está considerando a eficiência puramente técnica, sem considerar a escala de produção. Desse modo, revela os benefícios provenientes de medidas como a adoção de tecnologias avançadas e ecotecnologias no processo produtivo sem levar em consideração o efeito escala, isto é, sem considerar a possibilidade do aumento na escala de produção, o que poderia atenuar os benefícios alcançados pela eficiência técnica (*rebound effect*).

Conforme Tabela 4, verifica-se que apenas cinco países operam com rendimentos constantes à escala no modelo ambiental, sendo que somente um não é eficiente: a Polônia. Dos 14 países ambientalmente eficientes<sup>6</sup>, apenas Irlanda opera com retornos crescentes, e Nigéria, Noruega, Suécia e Suíça são ambientalmente eficientes também quanto à escala.

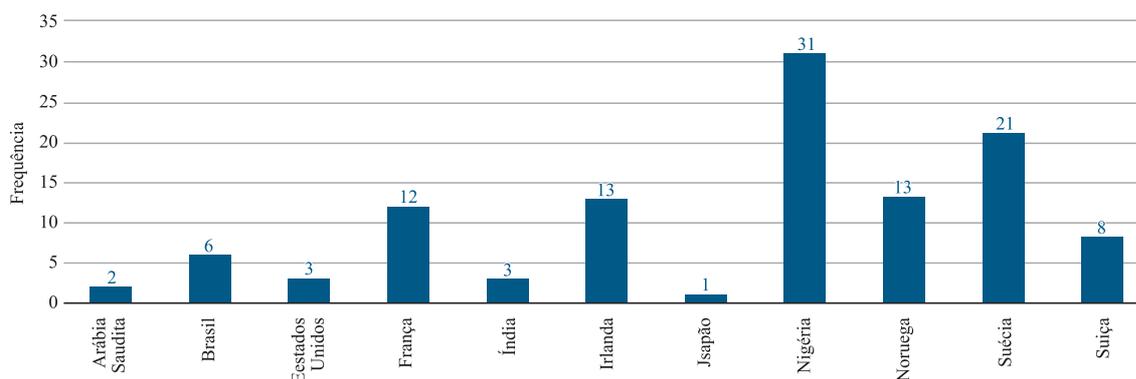
Tabela 4 – Distribuição dos países segundo o tipo de retorno e o grau de pura eficiência técnica

Tipo de retorno	Eficientes	Ineficientes	Total
Crescente	1	20	21
Constante	4	1	5
Decrescente	9	15	24
Total	14	36	50

Fonte: Resultados da pesquisa.

A frequência com que os países ambientalmente eficientes foram *benchmarks* é verificada na Figura 5. Apesar de Austrália, China e Rússia serem países ambientalmente eficientes, não foram referência para nenhum país. Já Nigéria foi referência para 31 países, o que equivale a 62% dos países analisados e, aproximadamente, 86% dos ineficientes. Suécia também foi *benchmark* para um número significativo de países (21).

Figura 5 – Frequência com que países eficientes foram *benchmarks*



Fonte: Resultados da pesquisa.

<sup>6</sup> São considerados eficientes: Arábia Saudita, Austrália, Brasil, China, Estados Unidos, França, Índia, Irlanda, Japão, Nigéria, Noruega, Rússia, Suécia e Suíça.

De acordo com a Tabela 5, verifica-se que, dos principais *benchmarks* listados, apenas Irlanda e França não têm eficiência de escala. Embora haja diferenças expressivas entre os países relacionados, todos são ambientalmente eficientes. Ou seja, apesar de possuírem quantidades diferentes de insumos e produtos, a utilização desses recursos é feita de tal forma que os danos causados ao meio ambiente pelo setor produtivo desses países, por meio da emissão de CO<sub>2</sub>, são relativamente menores.

Considerando a proporção do consumo de energia, FBKFixo e força de trabalho em relação à emissão de CO<sub>2</sub>, observa-se que Nigéria apresenta as maiores proporções de consumo de energia e força de trabalho e a menor proporção de FBKFixo, em que a Suécia apresenta maior proporção. Irlanda é o país que consome proporcionalmente menos energia seguido pela Noruega, que é o país com a menor proporção de força de trabalho dentre os cinco países apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Características dos principais *benchmarks* do modelo ambiental

Especificação	Nigéria	Suécia	Irlanda	Noruega	França
Eficiência Técnica	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Eficiência de Escala	1,00	1,00	0,399	1,00	0,673
Emissão de CO <sub>2</sub>	98,14	44,85	34,85	58,16	334,10
Consumo de Energia	134,00	49,41	13,02	32,59	253,01
FBKFixo	72,96	132,58	44,27	123,26	619,61
Força de trabalho	52,79	5,10	2,26	2,70	30,19
Recursos Naturais	3.191,45	87,76	10,79	3.569,14	27,89

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: PIB, FBKFixo e recursos naturais estão em bilhões de dólares correntes; emissão de CO<sub>2</sub> em mil quilotoneladas; força de trabalho em milhões de trabalhadores; consumo de energia em bilhões de quilogramas de óleo equivalente.

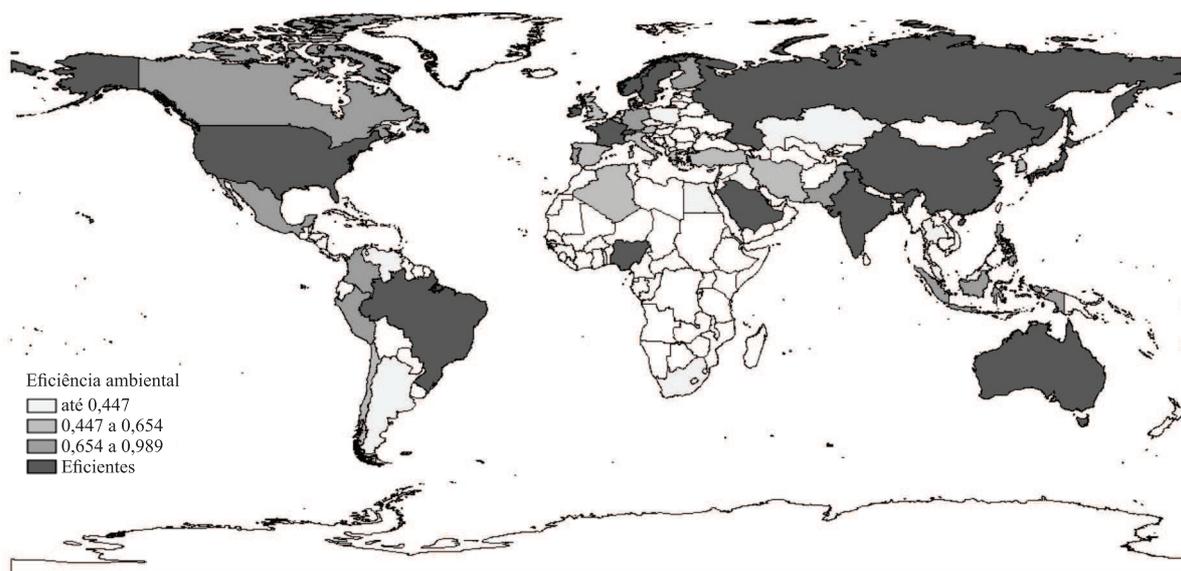
A distribuição geográfica dos países segundo as medidas de eficiência ambiental é apresentada na Figura 6<sup>7</sup>. Diferentemente do que ocorreu no modelo produtivo, há um número maior de países que não são classificados como desenvolvidos e apresentaram medidas elevadas de eficiência ambiental. Ressalta-se que alguns desses países, embora não sejam desenvolvidos, fazem parte do BRICS<sup>8</sup>, ou seja, são considerados países com grande potencial para se tornarem desenvolvidos.

Observa-se então que, embora todas as medidas do modelo ambiental tenham sido inferiores às do modelo produtivo, a distribuição geográfica mostra que há menor concentração dos países com relação às maiores medidas de eficiência ambiental.

7 Da mesma forma que foi feito no modelo produtivo, os países ineficientes foram distribuídos em três intervalos iguais, em que os tons mais claros representam os menos eficientes, e os mais escuros, os que obtiveram melhores medidas.

8 Grupo formado por Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul.

Figura 6 - Distribuição geográfica dos países de acordo com intervalos de medidas de eficiência ambiental



Fonte: Resultados da pesquisa.

#### 4.4 Eficiência energética

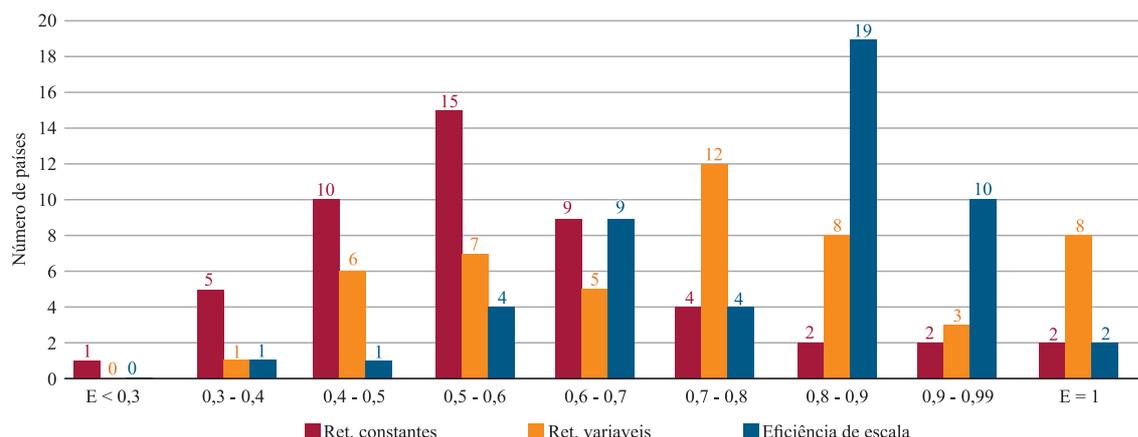
A partir das eficiências produtiva e ambiental, calculou-se o índice eficiência energética. A análise é feita para diferentes tipos de retornos de escala, o que permite verificar como a escala de produção interfere na eficiência energética dos países.

Ao considerar a eficiência puramente técnica (retornos variáveis), os países energeticamente eficientes são: Austrália, Estados Unidos, França, Irlanda, Japão, Nigéria, Noruega e Suíça. Quando a eficiência de escala é incluída, apenas Noruega e Suíça são energeticamente eficientes, ratificando a importância do efeito escala no contexto de eficiência energética.

Os resultados sugerem a presença do *rebound effect*, em que os benefícios obtidos com o avanço tecnológico podem ser compensados parcial ou totalmente pelo efeito escala. Um dos exemplos que podem ser citados é o dos EUA, que têm eficiência de escala de 0,573, valor inferior à média dos países analisados (0,797). Ressalta-se que a eficiência de escala no modelo ambiental é ainda menor (0,344), já no modelo produtivo o país apresenta eficiência de escala relativamente alta (0,955). Ou seja, embora o país apresente eficiência técnica, ao considerar a escala de produção, o país deixa de ser energeticamente eficiente, revelando que, ainda que utilize tecnologia de ponta em sua estrutura produtiva, a medida não tem sido suficiente para que os danos ambientais causados por sua produção sejam minimizados. Segundo Iqbal *et al.* (2019), para reduzir as emissões, os países devem modificar seus sistemas de energia, adotando matrizes energéticas mais sustentáveis como a energia eólica, solar, hidrelétrica e de biomassa. Desse modo, novas medidas devem ser adotadas pelo país para alcançar o desenvolvimento sustentável.

Além do número de países eficientes em cada tipo de retorno, as médias obtidas são significativamente diferentes. Enquanto no modelo com retornos constantes a média é de 0,578, no modelo com retornos variáveis é de 0,736. Adicionalmente, menos da metade dos países (48%) obteve índices superiores à média considerando retornos constantes à escala (Figura 7). Já no modelo de retornos variáveis, a maioria dos países (54%) obteve medidas de eficiência energética superiores à média. Nesse contexto, ratifica-se a importância da escala de produção para que, efetivamente, a sustentabilidade seja alcançada. Conforme Iqbal *et al.* (2019), a qualidade de vida de alguns países (como os EUA) já atingiu o ponto de saturação, sendo necessária a redução do consumo e da produção para manter um mundo sustentável.

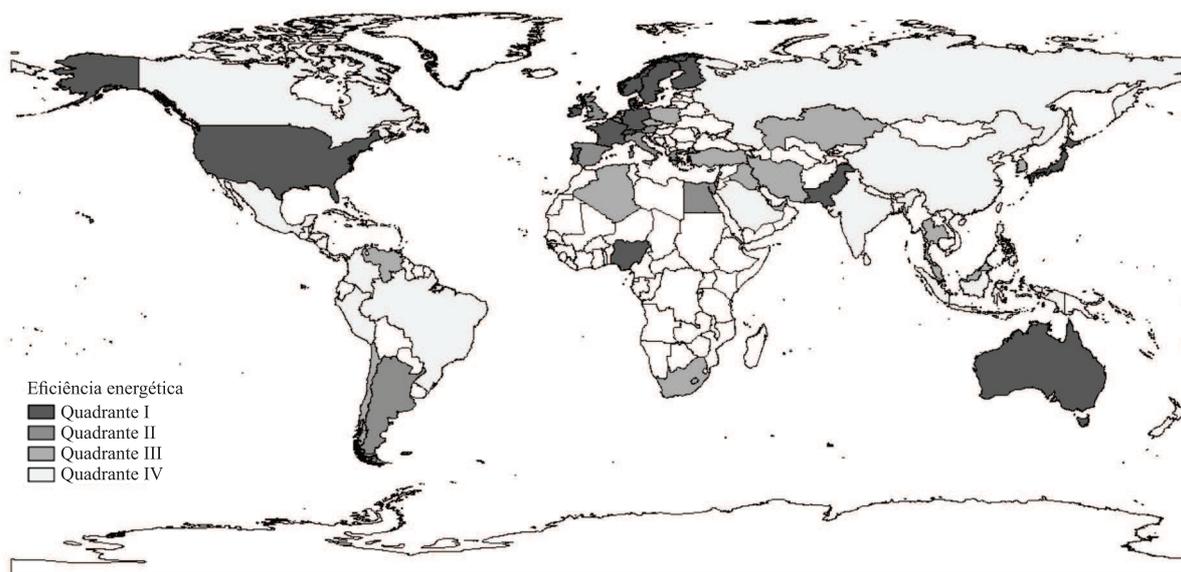
Figura 7 – Distribuição dos países de acordo com intervalos das medidas de eficiência energética



Fonte: Resultados da pesquisa.

Ainda assim, diversos países adotam tecnologias obsoletas e, desta forma, podem reduzir o impacto causado ao meio ambiente adotando tecnologias mais eficientes, que permitem a redução da emissão de CO<sub>2</sub> em seu processo produtivo. Nesse sentido, na Figura 8, pode-se observar a distribuição dos países de acordo com as medidas de eficiências produtiva e ambiental obtidas no modelo com retornos variáveis à escala. Ao considerar a mediana dessas medidas, é possível identificar quais os países mais eficientes energeticamente e onde os menos eficientes devem focar seus investimentos para se tornarem energeticamente eficientes, se é no aspecto produtivo ou ambiental. Ressalta-se que, de maneira geral, o desempenho produtivo é superior ao desempenho ambiental. Resultados similares foram encontrados por Iqbal *et al.* (2019) e Iram *et al.* (2020).

Figura 8 – Distribuição geográfica dos países de acordo com as medidas de eficiência obtidas nos modelos produtivo e ambiental, simultaneamente



Fonte: Resultados da pesquisa

Legenda: O quadrante I refere-se aos países que obtiveram medidas de eficiências produtiva e ambiental superiores às medianas (0,849 e 0,709, respectivamente). O quadrante II refere-se àqueles com eficiências produtiva superiores e ambiental inferiores à mediana. O quadrante III é composto pelos países que obtiveram as piores medidas de eficiência nos modelos produtivo e ambiental. Já o quadrante IV é composto por aqueles que tiveram medidas ambientais superiores e produtivas inferiores à mediana.

Note que 28% dos países se encontram no quadrante I, em que as eficiências produtiva e ambiental são superiores à mediana. Embora apenas oito desses países sejam energeticamente eficientes, os demais países alcançaram medidas relativamente “melhores” que os outros avaliados nos dois modelos. A mesma proporção de países está no quadrante III, em que as medidas de eficiências tanto produtiva quanto ambiental foram as piores.

Onze países obtiveram “boas” medidas de eficiência produtiva, porém baixas medidas de eficiência ambiental (quadrante II), isto é, sua produção é eficiente tecnicamente, mas ambientalmente ineficiente. Vale ressaltar a importância de esses países buscarem formas de produzir impactando menos o meio ambiente, haja vista a priorização do desenvolvimento sustentável nas agendas políticas mundiais.

O inverso ocorreu com 22% dos países, que obtiveram índices relativamente melhores de eficiência ambiental e piores de eficiência produtiva (quadrante IV). Esses países precisam adotar melhores práticas para melhor alocação de seus recursos, obtendo, por consequência, maior produtividade.

Como já mencionado, é importante que cada caso seja analisado de forma detalhada, considerando as especificidades de cada país, para que as medidas sejam adotadas de acordo com suas características.

Observa-se ainda que os países que obtiveram as melhores medidas de eficiência energética (quadrante I) são praticamente todos classificados como desenvolvidos, enquanto os que obtiveram as piores medidas (quadrante III) fazem parte do grupo de países em desenvolvimento.

Esses resultados revelam que os países desenvolvidos, ao investirem em tecnologias mais eficientes, reduzem as externalidades negativas que seus processos produtivos causam ao meio ambiente. Esses resultados vão ao encontro do apontado por Xia *et al.* (2020), que revelam que os países da OCDE possuem as melhores tecnologias para redução da intensidade e melhoria da eficiência energética. Segundo Iram *et al.* (2020), esses países selecionam uma mistura de combustíveis mais sustentáveis, priorizando os de baixo carbono.

Nesse contexto, é importante dizer que as tecnologias desenvolvidas atualmente levam em conta não só a produtividade, mas também formas mais “limpas” de produzir, causando menos danos ambientais. Isso ocorre porque a questão ambiental tem se tornado alvo de atenção do mercado consumidor mundial.

Ainda assim, há muito o que ser feito. É necessário o comprometimento de todos, inclusive o desenvolvimento de políticas públicas que incentivem o investimento em tecnologias limpas, a fim de minimizar o impacto ambiental sem prejudicar a produção das nações. Esses investimentos devem ser priorizados, ainda mais, nos países em desenvolvimento, visto que esse grupo de países apresenta as menores medidas de eficiência. Segundo Xia *et al.* (2020), as inovações tecnológicas e investimentos em pesquisa e desenvolvimento em energias renováveis são determinantes para o aumento da eficiência energética.

Nesse contexto, o compartilhamento de tecnologias utilizadas em países desenvolvidos poderia ser uma das formas de reduzir o impacto causado pelo processo produtivo de países menos desenvolvidos onde, muitas vezes, a tecnologia utilizada é obsoleta e significativamente danosa ao meio ambiente. Como apontado por Xia *et al.* (2020), a adoção de medidas utilizadas pelos países desenvolvidos e ambientalmente mais sustentáveis pode ser um caminho para a melhoria da eficiência energética dos menos desenvolvidos.

Por fim, o Quadro 3 apresenta um resumo dos resultados da pesquisa. Observa-se que apenas 16% dos países analisados são energeticamente eficientes. Quando se considera as eficiências ambiental e produtiva, esses valores são 28% e 32%, respectivamente. A maior parte dos países (56%) não foi eficiente em nenhum dos modelos. Ou seja, por meio da alocação eficiente dos recursos, é possível aumentar a produção e/ou reduzir a emissão de CO<sub>2</sub>.

Quadro 3 – Comparação dos modelos de eficiência ambiental e produtiva

		Ambiental	
		Eficientes	Ineficientes
Produtiva	Eficientes	Austrália, EUA, França, Irlanda, Japão, Nigéria, Noruega, Suíça (8)	Alemanha, Bélgica, Dinamarca, Espanha, Grécia, Itália, Reino Unido, Singapura (8)
	Ineficientes	Arábia Saudita, Brasil, China, Índia, Rússia, Suécia (6)	Finlândia, Paquistão, Portugal, Argentina, Áustria, Egito, Israel, Países Baixos, África do Sul, Argélia, Cazaquistão, Chile, Coreia do Sul, Emirados Árabes, Irã, Iraque, Malásia, Polónia, República Tcheca, Tailândia, Turquia, Venezuela, Canadá, Colômbia, Filipinas, Indonésia, México, Peru (28)

Fonte: Resultados da pesquisa.

Portanto, verifica-se que é possível, de maneira geral, reduzir os impactos causados pelos processos produtivos dos países. A análise realizada sobre a eficiência técnica revela que alguns países produzem de forma mais sustentável. Ressalta-se, ainda, que tais países possuem uma produção significativa, permanecem em crescimento e, ainda assim, poluem relativamente menos o meio ambiente.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aumento do consumo de energia, fator essencial para o processo produtivo e consequente desenvolvimento de uma nação, tem chamado a atenção mundial devido aos impactos que tem causado ao meio ambiente por meio da emissão de gases poluentes.

Dada a escassez dos recursos naturais, sua utilização eficiente é essencial para o desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, este estudo buscou avaliar o processo produtivo dos países, identificando quais conseguem produzir mais emitindo proporcionalmente menos CO<sub>2</sub>. Para tal, foi calculado o índice de eficiência energética, que considera as eficiências produtiva e ambiental simultaneamente.

Inicialmente, foi elaborado o modelo produtivo, em que os países que produzem mais utilizando relativamente menos insumos foram considerados eficientes. Nesse modelo, 16 países se encontram na fronteira eficiente, e há possibilidade de aumentar em torno de 19% no PIB, mantendo a quantidade de fatores de produção.

Posteriormente, foi elaborado o modelo ambiental, em que a emissão de CO<sub>2</sub> tornou-se um produto indesejável. Nesse modelo, 14 países foram considerados ambientalmente eficientes. A média da eficiência foi de aproximadamente 0,697, indicando que há possibilidade de reduzir, em média, 30% das emissões de CO<sub>2</sub> apenas com a gestão eficiente dos recursos.

Com relação à eficiência energética, que analisa conjuntamente os dois modelos, a média foi de 0,701. Malásia foi o país com menor índice de eficiência energética (0,4), e Austrália, Estados Unidos, França, Irlanda, Japão, Nigéria, Noruega e Suíça foram eficientes.

Cabe destacar que esse resultado se refere ao modelo com retornos variáveis à escala (eficiência puramente técnica). Ao considerar o modelo com retornos constantes, apenas Noruega e Suíça são energeticamente eficientes. Isso demonstra que os demais países, embora tenham um processo produtivo eficiente, apresentam problemas na escala, fazendo com que os benefícios advindos dessas tecnologias sejam superados pelo efeito escala (*rebound effect*). Nesse sentido, esses países devem elaborar e participar ativamente de políticas e acordos que visem à redução dos danos ambientais provenientes do crescimento econômico.

Em suma, observa-se que, para alcançar o desenvolvimento sustentável, há um longo caminho a ser percorrido. É fundamental que todos tenham consciência da importância de produzir im-

pactando menos o meio ambiente. Ressalta-se que os ganhos possíveis ao eliminar a ineficiência técnica de alguns países são significativos e, portanto, políticas que visem a incentivar o investimento e compartilhamento de tecnologias eficientes e limpas são fundamentais para atingir o desenvolvimento sustentável.

Ressalta-se que, pelos resultados terem indicado possível existência do *rebound effect*, os mesmos devem ser analisados com cautela. Nesse sentido, sugere-se, para estudos futuros, a inclusão da análise da eficiência de escala, identificando qual seria a escala ótima de consumo de energia para o desenvolvimento sustentável.

## REFERÊNCIAS

- AIGNER, D.; LOVELL, K. C. A.; SCHIMIDT, P. Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. **Journal of Econometrics**, v. 6, n. 1, p. 21-37, 1977. DOI: 10.1016/0304-4076(77)90052-5.
- AKINLO, A. E. Energy consumption and economic growth: evidence from 11 Sub-Sahara African countries. **Energy Economics**, v. 30, n. 5, p. 2391-2400, 2008. DOI: 10.1016/j.eneco.2008.01.008.
- ALTINAY, G.; KARAGOL, E. Electricity consumption and economic growth: evidence for Turkey. **Energy Economics**, v. 27, n. 6, p. 849-856, 2005. DOI: 10.1016/j.eneco.2005.07.002.
- AL-IRIANI, M. A. Energy-GDP relationship revisited: an example from GCC countries using panel causality. **Energy Policy**, v. 34, n. 17, p. 3342-3350, 2006. DOI: 10.1016/j.enpol.2005.07.005.
- ANG, J. B. Economic development, pollutant emissions and energy consumption in Malaysia. **Journal of Policy Modeling**, v. 30, n. 2, p. 271-278, 2008. DOI: 10.1016/j.jpolmod.2007.04.010.
- APERGIS, N.; PAYNE, J. E. Energy consumption and economic growth in Central America: evidence from a panel cointegration and error correction model. **Energy Economics**, v. 31, n. 2, p. 211-216, 2009. DOI: 10.1016/j.eneco.2008.09.002.
- BANCO MUNDIAL. **Apresenta diversas informações relativas aos países**. [S.l.]:[s.d]. Disponível em: <http://www.worldbank.org/>. Acesso em: 24 jul. 2017.
- BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. **Management Science**, v. 30, n. 9, p. 1078-1092, 1984. DOI: 10.1287/mnsc.30.9.1078.
- BELKE, A.; DOBNIK, F.; DREGER, C. Energy consumption and economic growth: New insights into the cointegration relationship. **Energy Economics**, v. 33, n. 5, p. 782-789, 2011. DOI: 10.1016/j.eneco.2011.02.005.
- BIAN, Y.; YANG, F. Resource and environment efficiency analysis of provinces in China: A DEA approach based on Shannon's entropy. **Energy Policy**, v. 38, n. 4, p. 1909-1917, 2010. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.11.071.
- BOYD, G. A.; PANG, J. X. Estimating the linkage between energy efficiency and productivity. **Energy Policy**, v. 28, n. 5, p. 289-296, 2000. DOI: 10.1016/S0301-4215(00)00016-1.
- BRAGA, C. **Contabilidade ambiental: ferramenta para a gestão da sustentabilidade**. São Paulo: Atlas, 2007. 169 p.

- BRASIL. **Fontes de energia renováveis representam 83% da matriz elétrica brasileira**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletrica-brasileira>. Acesso em: 18 jul. 2021.
- CAMIOTO, F. C. **Análise da eficiência energética nos BRICS e G7 considerando estrutura de fator-total: uma aplicação da Análise Envoltória de Dados**. São Carlos: UFSCar, 2013.
- CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision making units. **European Journal of Operational Research**, v. 2, n. 6, p. 429-444, 1978. DOI: 10.1016/0377-2217(78)90138-8.
- CHITKARA, P. A data envelopment analysis approach to evaluation of operational inefficiencies in power generating units: a case study of Indian power plants. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 14, n. 2, p. 419-425, 1999. DOI: 10.1109/59.761859.
- COELLI, T.; RAO, D. S. P.; BATTESE, G. E. **An introduction to efficiency and productivity analysis**. Norwell: Kluwer Academic, 1998.
- COHEN, C.; LENZEN, M.; SCHAEFFER, R. Energy requirements of households in Brazil. **Energy Policy**, v. 33, n. 4, p. 555-562, 2005. DOI: 10.1016/j.enpol.2003.08.021.
- COSTA, R.; PRATES, C. **O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado**, 2005. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2436>. Acesso em: 18 jul. 2017.
- FERGUSON, R.; WILKINSON, W.; HILL, R. Electricity use and economic development. **Energy Policy**, v. 28, n. 13, p. 923-934, 2000. DOI: 10.1016/S0301-4215(00)00081-1.
- FERREIRA, M. A. M. **Eficiência técnica e de escala de cooperativas e sociedade de capital na indústria de laticínios do Brasil**. 158 f. Tese (Doutorado em Economia Aplicada), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa: UFV, 2005.
- GARCÍA, J. L. **El Trilema Energético del WEC para la sostenibilidad energética**, 2013. Disponível em: <https://goo.gl/jvw6NG>. Acesso em: 25 jul. 2017.
- HONMA, S.; HU, J. L. Industry-level total-factor energy efficiency in developed countries: A Japan-centered analysis. **Applied Energy**, v. 119, p. 67-78, 2014. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.12.049.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2007: Mitigation**. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (Eds). Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- IQBAL, W.; ALTALBE, A.; FATIMA, A.; ALI, A.; HOU, Y. A DEA Approach for Assessing the Energy, Environmental and Economic Performance of Top 20 Industrial Countries. **Processes**, v. 7, n. 12, p. 1-19, 2019. DOI: 10.3390/pr7120902.
- IRAM, R.; ZHANG, J.; ERDOGAN, S.; ABBAS, Q.; MOHSIN, M. Economics of energy and environmental efficiency: evidence from OECD countries. **Environmental Science Pollution Research**, v. 27, p. 3858-3870, 2020. DOI: 10.1007/s11356-019-07020-x.
- JOBERT, T.; KARANFIL, F. Sectoral energy consumption by source and economic growth in Turkey. **Energy Policy**, v. 35, n. 11, p. 5447-5456, 2007. DOI: 10.1016/j.enpol.2007.05.008.

- KORHONEN, P. J.; LUPTACIK, M. Eco-efficiency analysis of power plants: An extension of data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 154, n. 2, p. 437-446, 2004. DOI: 10.1016/S0377-2217(03)00180-2.
- LEE, C. C. Energy consumption and GDP in developing countries: a cointegrated panel analysis. **Energy Economics**, v. 27, n. 3, p. 415-427, 2005. DOI: 10.1016/j.eneco.2005.03.003.
- LOKEN, E. Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n. 7, p. 1584-1595, 2007. DOI: 10.1016/j.rser.2005.11.005.
- MAHADEVAN, R.; ASAFU-ADJAYE, J. Energy consumption, economic growth and prices: a reassessment using panel VECM for developed and developing countries. **Energy policy**, v. 35, n. 4, p. 2481-2490, 2007. DOI: 10.1016/j.enpol.2006.08.019.
- MENKES, M. **Eficiência energética, políticas públicas e sustentabilidade**. 293f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável), Universidade de Brasília. Brasília: UnB, 2004.
- NARAYAN, P. K.; SMYTH, R.; PRASAD, A. Electricity consumption in G7 countries: A panel cointegration analysis of residential demand elasticities. **Energy Policy**, v. 35, n. 9, p. 4485-4494, 2007. DOI: 10.1016/j.enpol.2007.03.018.
- NIU, S.; DING, Y.; NIU, Y.; LI, Y.; LUO, G. Economic growth, energy conservation and emissions reduction: A comparative analysis based on panel data for 8 Asian- Pacific countries. **Energy Policy**, v. 39, n. 4, p. 2121-2131, 2011. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.02.003.
- OH, D. H. A metafrontier approach for measuring an environmentally sensitive productivity growth index. **Energy Economics**, v. 32, n. 1, p. 146-157, 2010. DOI: 10.1016/j.eneco.2009.07.006.
- OMER, A. M. Energy use and environmental impacts: a general review. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 1, n. 5, 053101, 2009. DOI: 10.1063/1.3220701.
- OUYANG, W.; YANG, J. B. The network energy and environment efficiency analysis of 27 OECD countries: a multiplicative network DEA model. **Energy**, v. 197, 117161, 2020. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117161.
- PAO, H. T.; TSAI, C. M. CO<sub>2</sub> emissions, energy consumption and economic growth in BRIC countries. **Energy Policy**, v. 38, n. 12, p. 7850-7860, 2010. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.08.045.
- POLLITT, M. G. Ownership and Efficiency in Nuclear Power Production. **Oxford Economic Papers**, v. 48, n. 2, p. 342-360, 1996.
- RACZKA, J. Explaining the performance of heat plants in Poland. **Energy Economics**, v. 23, n. 4, p. 355-370, 2001. DOI: 10.1016/S0140-9883(00)00076-1.
- SELVAKKUMARAN, S.; LIMMEECHOKCHAI, B. Energy security and co-benefits of energy efficiency improvement in three Asian countries. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 491-503, 2013. DOI: 10.1016/j.rser.2012.12.004.
- SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Slack-adjusted DEA for time series analysis: Performance measurement of Japanese electric power generation industry in 1984-1993. **European Journal of Operational Research**, v. 133, n. 2, p. 232-259, 2001. DOI: 10.1016/S0377-2217(00)00295-2.

US REPORT OF THE NATIONAL POLICY DEVELOPMENT GROUP. Using energy wisely. Increasing Energy Conservation and Efficiency. In: **Reliable, affordable, and environmentally sound energy for the American Future: Report of the National Energy Policy Development Group**. Ann Arbor: University of Michigan Library, 2001.

WANG, Q.; WANG, S.; WANG, X. Research on Total Factor Energy Efficiency in China based on super Efficiency Grey DEA Model. **Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Grey Systems**, IEEE, Nanjing, p. 1542-1547, 2009. DOI: DOI:10.1109/GSIS.2009.5408159.

XIA, Z.; ABBAS, Q.; MOHSIN, M. SONG. G. Trilemma among energy, economic and environmental efficiency: Can dilemma of EEE address simultaneously in era of COP 21? **Journal of Environmental Management**, v. 276, n. 15, 276, 111322, 2020. DOI: DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111322.

ZHANG, J.; PATWARY, A. K.; SUN, H.; RAZA, M.; TAGHIZADEH-HESARY F.; IRAM, R. Measuring energy and environmental efficiency interactions towards CO<sub>2</sub> emissions reduction without slowing economic growth in central and western Europe. **Journal of Environmental Management**, v. 279, n. 1, 111704, 2021. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111704.

ZHOU; ANG; POH, L. A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies. **European Journal of Operational Research**, v. 189, n. 1, p. 1-18, 2008. DOI: 10.1016/j.ejor.2007.04.042.