

CO<sub>2</sub> EMISSIONS AND THE EXPANSION POTENTIAL OF FOSSIL FUELS IN BRICS

Tiago Ribeiro Espíndola Soares<sup>1</sup>, [tiagoribeiroespindola@gmail.com](mailto:tiagoribeiroespindola@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-5422-4574>  
João José de Assis Rangel<sup>1</sup>, [joao@iff.edu.br](mailto:joao@iff.edu.br), <https://orcid.org/0000-0002-4718-6696>

<sup>1</sup> Instituto Federal Fluminense (IFF), 28030-131, Campos dos Goitacazes - RJ, Brasil

Submitted: 29/08/2022. Accepted: 25/11/2022

Published: 27/11/2022

## ABSTRACT

**Purpose:** This work aims to analyze CO<sub>2</sub> emissions and a possible increase in the consumption of fossil fuels, in a context that studies the Energy Trilemma and development of BRICS countries.

**Methodology/Approach:** Based on empirical knowledge and data available on the International Energy Agency (IEA) portal and on the Energy Trilemma Report, the research analyzes the energy and electricity matrix, population, emissions, Gross domestic product (GDP) and Human Development Index (HDI).

**Findings:** A pattern was not observed between development and participation of renewable energy. But, countries with high HDI have a better evaluated energy system. There was a worsening in Brazil in per capita emissions, energy and carbon intensity. However, this change is not related to the growth in natural gas consumption.

**Research Limitation/implication:** The databases limited the study, due to the difference in the timeline of the World Energy Council (WEC) and International Energy Agency (IEA) and the lack of detail in the calculation of the Energy Trilemma evaluation.

**Originality/Value of paper:** A comparative analysis that relates Brazil with similar countries, such as those in the BRICS group, contributing to energy equity, which reduces the cost of electricity without ecological damage.

**KEYWORD:** natural gas, CO<sub>2</sub> emissions, energy trilemma, kaya decomposition.

EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> E O POTENCIAL DE EXPANSÃO DOS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS NOS BRICS

## RESUMO

**Objetivo:** Este trabalho tem o objetivo de analisar as emissões de CO<sub>2</sub> e um possível aumento de consumo de combustíveis fósseis, num contexto que estuda o Trilema de Energia e desenvolvimento dos países dos BRICS.

**Metodologia/Abordagem:** A partir de conhecimento empírico e dados disponíveis no portal da Agência Internacional de Energia (IEA) e Relatório de Trilema de Energia, a pesquisa analisa matriz energética, elétrica, população, emissões, produto interno bruto (PIB) e índice de desenvolvimento humano (IDH).

**Conclusões:** Não foi observado um padrão entre desenvolvimento e participação de energia renovável. Porém, países com alto IDH apresentam um sistema energético mais bem avaliado. Houve piora do Brasil nas emissões per capita, intensidade energética e carbônica. Entretanto, essa mudança não está relacionada com o crescimento no consumo de gás natural.

**Limitações da Pesquisa:** As bases de dados limitaram o estudo, pela diferença de linha temporal do Conselho de Energia Mundial (WEC) e a Agência Internacional de Energia (IEA) e pela falta do detalhe do cálculo da nota do Trilema de Energia.

**Originalidade/Valor do artigo:** Uma análise comparativa que relaciona o Brasil com países semelhantes, como por exemplo os do grupo dos BRICS, contribuindo para a equidade energética o que diminui o custo da eletricidade sem prejuízo ecológico.

**PALAVRAS-CHAVE:** gás natural, emissões de CO<sub>2</sub>, trilema de energia, decomposição de kaya.

## 1. INTRODUÇÃO

A ação antrópica moderna tem causado mudanças permanentes nos ecossistemas do planeta (Ripple et al., 2019). Isso se deve, principalmente, pelo lançamento na atmosfera de gases do efeito estufa (GEE), processo que está relacionado com a forma na qual a sociedade moderna consome energia (Andrade, 2016). Além disso, o crescimento da atividade econômica quando não pautado sob uso de energias limpas, o uso de combustíveis fósseis e o desmatamento são alguns dos fatores que tem causado aumento da concentração de poluentes (Ipcc, 2015), sendo o setor de energia é um dos principais responsáveis pelas emissões de GEE (Iea, 2015)

Com intuito de gerar indicadores e alternativas ao problema, diversos estudos têm sido conduzidos para avaliar essa questão. Neste contexto, anualmente o Conselho Mundial de Energia divulga um relatório chamado *Trilema de Energia Index* (ETI), o qual avalia a capacidade do país de fornecer energia ecologicamente correta, acessível e atendendo à demanda interna. O ETI apresenta um ranque onde é possível comparar a situação de cada nação e é construído a partir das notas calculadas para cada um dos três pilares: equidade energética, seguridade energética e sustentabilidade ambiental, além de considerar o contexto de cada país (Wec, 2018).

Diante da necessidade de diminuir as emissões de gases do efeito estufa, o gás natural tem se mostrado uma alternativa energética para o problema da mudança climática (Masson-Delmotte et al., 2018), juntamente com os desafios do trilema de energia (Heffron & McCauley, 2017). Dentre as fontes fósseis, o gás natural é considerado mais limpo quando comparado ao carvão e petróleo, pois para uma mesma quantidade de energia menos CO<sub>2</sub> é lançado à atmosfera (Vieira et al., 2005). Além disso, para geração de energia elétrica, o gás é vantajoso pela confiabilidade, tempo de resposta e previsibilidade de geração. Seria usado como complemento das hidroelétricas e para mitigar intermitências relacionadas às fontes eólicas e solar (Campos et al., 2017), o que de uma certa maneira já vem acontecendo.

No Brasil, país que usa majoritariamente hidroenergia para geração de eletricidade, o gás natural não teve grande relevância até 1990. Esse recurso adquiriu maior importância pelo aumento da demanda energética e descoberta da camada do pré-sal, onde se encontram grandes reservas desse energético (Bronzatti & Neto, 2008; Fioreze et al., 2013). Depois do setor industrial, a geração termoelétrica é o segmento que mais utiliza este recurso, sendo responsável, em 2019, por 29% do seu consumo. Diferentemente da indústria, o setor térmico apresenta variabilidade de demanda mensal e anual. Entre os anos de 2013 e 2015, concomitantemente a uma crise hídrica no país, houve uma acentuada procura por gás natural (Epe, 2020). Novamente no ano de 2021, o Brasil passou por um período de reduzido volume nos reservatórios, gerando preocupação de apagões, como em 2001, inflação e baixo crescimento econômico. Entretanto, o acionamento das termelétricas não é novidade e vem ocorrendo nos últimos anos, sendo um problema recorrente (de Castro & Brandão, 2021). Ainda, alterações na legislação que regula o mercado de gás prometem baratear os custos e aumentar ainda mais o consumo (Lei nº 14.134, de 8 de abril de 2021, 2021).

Todavia, um acréscimo no uso do gás natural é uma preocupação ambiental por ser um combustível fóssil. O país tem aumentado as emissões de CO<sub>2</sub> totais, bem como a intensidade de CO<sub>2</sub>, podendo perder sua posição de matriz energética sustentável. Em contrapartida, outros países como China e Estados Unidos têm conseguido diminuir esse indicador. Por outro lado, quando comparado a outros países e à média mundial, o Brasil tem baixas emissões de poluentes tanto em números absolutos quanto a termos relativo à população. (Feijó & Rangel, 2018).

Por último, para se obter uma análise comparativa, é importante buscar relacionar o Brasil com países semelhantes, como por exemplo os do grupo dos BRICS, do qual o Brasil faz parte. Os BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul) são nações em desenvolvimento que apresentam bons indicadores macroeconômicos, tendo destaque mundial pela participação no PIB e na população (Bijos & Guilhon, 2014). Assim, o Brasil é comparável aos países do grupo, sendo tratado dessa maneira na literatura anteriormente.

Diante do que foi exposto, este trabalho tem o objetivo de analisar as emissões de CO<sub>2</sub> e o potencial de expansão do consumo de combustíveis fósseis dos BRICS, e em especial do Brasil, no contexto do Trilema de Energia e desenvolvimento dos países. Além desta introdução, o artigo contém uma revisão de literatura, material e método, resultados, conclusões e referências.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Trilema de Energia

O Trilema de Energia é um conceito criado pelo Conselho de Energia Mundial (da sigla em Inglês: WEC - *World Energy Council*), que considera a sustentabilidade energética definida sob três aspectos: seguridade energética, equidade energética e sustentabilidade ambiental (WEC, 2018). Os países podem escolher diferentes caminhos de transição energética em função do mercado, política ou sociedade. Entretanto, o conceito implica que o crescimento em qualquer direção deve compensar qualquer efeito nos outros dois aspectos. Num primeiro momento pode-se pensar que energias renováveis são as melhores fontes. Mas, se não se pode garantir equidade e seguridade energética, não é possível falar em sustentabilidade. Sendo assim, um sistema de energia ideal não deve apenas ser ecologicamente correto, como também garantir o suprimento de energia e estar disponível economicamente para toda população. Uma rápida descarbonização, por exemplo, não deve afetar o suprimento ou os custos aos usuários. Ou seja, não é sustentável crescer em uma dimensão deixando o triângulo de energia desequilibrado (Asbahi et al., 2019; Cervantes Bravo et al., 2020).

Para o cálculo da nota do Trilema de energia de cada país, são usados 13 indicadores agrupados em quatro dimensões. Cada uma das três dimensões já citadas tem 30% de peso na nota final, com os 10% restantes inseridos no contexto de cada país. Os principais indicadores são: dependência de importação, diversidade da geração de energia elétrica e armazenamento de energia para seguridade energética; preço e acesso à eletricidade e preço de gasolina e diesel para equidade energética; intensidade energética, geração de eletricidade por fontes de baixo carbono e emissões de CO<sub>2</sub> per capita para sustentabilidade ambiental; e estabilidade macroeconômica, eficácia do governo e capacidade de inovação para o contexto do país. (Wec, 2018).

A equidade diz respeito à acessibilidade de energia para toda população e está relacionado à parte econômica da nação. Muitas pessoas não têm acesso a energia moderna, confiável e sustentável, o que interfere na sua qualidade de vida, e configure assim uma população com pobreza energética (Setyowati, 2020). O mundo tem forte dependência de combustíveis fósseis, porém, uma mudança para uma matriz energética de baixo carbono, com o uso de energia solar e eólica, por exemplo, se torna um desafio pela necessidade de maiores investimentos, podendo condenar parte da população mundial à pobreza energética (Harjanne & Korhonen, 2019). Para que os três pilares do trilema de energia sejam atendidos, se faz necessário pesquisa e desenvolvimento em energias renováveis (Ebhota & Jen, 2020).

De uma maneira geral, a seguridade energética diz respeito ao gerenciamento do suprimento de energia primária, se ela de fontes internas ou externas, garantindo oferta para suprir a demanda atual e futura (Šprajc et al., 2019). A segurança energética também é associada à capacidade de aumentar a produção, ou de pagar pelo seu fornecimento (Almeida Prado et al., 2016). A vulnerabilidade do suprimento de energia dos países está associada à instabilidade política, como por exemplo no Oriente Médio e Leste Europeu, desastres naturais como furacões, terremotos e tsunamis, como o acidente de Fukushima, em 2011 (Brown et al., 2014).

A segurança energética pode ser definida como "fornecer de forma equitativa serviços de energia disponíveis, acessíveis, confiáveis, eficientes, ambientalmente benignos, governados de forma proativa e socialmente aceitáveis para os usuários finais" (Brown et al., 2014). Nesse sentido, entende-se que a seguridade energética deve vir acompanhada de sustentabilidade ambiental e igualdade social (Lima et al., 2015).

A sustentabilidade ambiental está relacionada à redução da intensidade energética, intensidade de CO<sub>2</sub> e transição para fontes renováveis de baixo carbono. A mudança climática é um dos principais problemas enfrentados pela sociedade. O aumento da emissão de gases do efeito estufa (GEE), principalmente o CO<sub>2</sub>, tem causado o aquecimento global. A região da América Latina e Caribe tem uma das maiores emissões de dióxido de carbono, como resultado de ações de mudança de uso da terra, principalmente o desmatamento (Tarko et al., 2019). No Brasil, em 2018, 44% das emissões de CO<sub>2</sub> equivalente foram por mudança de uso da terra (Angelo & Rittl, 2019).

## 2.1. Decomposição de Kaya

O desenvolvimento econômico depende do consumo de energia, que possivelmente leva ao aumento da poluição ambiental, especialmente nos países em desenvolvimento. Hoje, busca-se desenvolver a economia com menor dependência do gasto energético. Nesse contexto, a análise por decomposição tem se mostrado um método adequado para estudo (Dai et al., 2016).

A Decomposição de Kaya, ou identidade de Kaya, é um modo de quantificar as emissões de CO<sub>2</sub> e relacioná-las com a população, PIB e energia primária (Kaya, 1997). Esse método carrega o conceito de que as emissões de CO<sub>2</sub> são influenciadas, e assim, decompostas matematicamente, pelo crescimento econômico, populacional e de energia primária, além de relações com economia e política. A partir de gráficos é possível analisar qual o caminho percorrido pelo país e sua tendência em relação à emissão de CO<sub>2</sub>, e qual variável tem maior influência no dióxido de carbono (Yang et al., 2020). A decomposição de Kaya é representada pela equação (1):

$$C = P \cdot \frac{PIB}{P} \cdot \frac{E}{PIB} \cdot \frac{C}{E} \quad (1)$$

Onde:

C: emissões de CO<sub>2</sub> (Mt)

PIB: produto interno bruto (US\$)

E: energia primária (ktep - onde tep: tonelada equivalente de petróleo)

P: população

PIB/P: PIB per capita (US\$/cap)

E/PIB: intensidade energética (ktep/US\$)

C/E: intensidade carbônica (Mt CO<sub>2</sub>/ktep)

Baseado na Identidade de Kaya, o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> se devem, principalmente, a quatro fatores: crescimento econômico, ineficiência energética, alto uso de energia baseada em carbono e grande participação de atividades de alto uso energético na economia. A literatura recente indica que o aumento da eficiência energética e escolhas mais ecológicas são determinantes para o controle das emissões de CO<sub>2</sub>. Entretanto, a atividade econômica e intensidade energética continuam sendo os fatores mais importantes (Pui & Othman, 2019).

## 3. MATERIAL E MÉTODO

Este trabalho foi feito com informações disponíveis no portal da *International Energy Agency (IEA)*, com os dados de suprimento de energia primária por fonte e emissão de CO<sub>2</sub>. Também, a partir do Relatório de Trilema de Energia de 2018, elaborado pelo WEC, bem como seu sítio eletrônico, para consultar a posição dos países no ranque e a nota de cada. Os países selecionados são os do grupo dos BRICS.

Primeiramente, este trabalho contém uma abordagem empírica de modo a contextualizar o estudo. Foi feita a análise da emissão de CO<sub>2</sub> em função da população, e também da emissão per

capita em função do CO<sub>2</sub>/PIB, comparando os anos de 1990 e 2019, estudando o avanço de cada nação em relação a esses indicadores. A partir delas foi possível comparar a posição relativa de cada país e seu impacto no mundo no que se refere às emissões de dióxido de carbono. Além disso, uma análise da participação dos fósseis e renováveis na matriz energética, também para os anos de 1990 e 2019. O histórico da participação dos fósseis nas matrizes dos BRICS, com estudo ano a ano, de 1990 a 2019, assim como a relação CO<sub>2</sub>/energia primária. E por último, uma análise da matriz elétrica nos anos de 1990 e 2019.

Posteriormente, foi realizada uma avaliação da posição do país no ranque do Trilema de Energia, a fração do uso de energia renovável e energia fóssil na matriz energética, e seu Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), para o ano de 2019. Essa análise contém os cinco países dos BRICS e os dez primeiros países do ranque do Trilema de Energia de 2019, totalizando 15 países (observações). De acordo com Siegel (1975), foi calculado o coeficiente de correlação de *Spearman*  $\rho$ , entre posição no ranque (variável independente) e o IDH (variável dependente), segundo a Equação (2).

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n} \quad (2)$$

Onde:

$\rho$  = coeficiente de correlação de *Spearman*

$n$  = número de observações

$d_i$  = postos de  $x_i$  dentre os valores de  $x$  - postos de  $y_i$  dentre os valores de  $y$

Para o cálculo do nível de significância do coeficiente  $\rho$ , foi utilizada a Equação (3).

$$t \text{ calc} = \frac{\rho \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\rho^2}} \quad (3)$$

Onde:

$t \text{ calc}$  =  $t$  de Student calculado.

Assumindo um nível de confiança de 1% e 13 graus de liberdade, encontra-se o  $t$  de Student tabelado ( $t \text{ tab}$ ). Se  $t \text{ calc}$  for maior que  $t \text{ tab}$  há significância do coeficiente  $\rho$ , caso contrário, não há significância. Foi realizada uma análise da nota dos países dos BRICS no Trilema de Energia para os anos de 2000 a 2021, de acordo com os números disponibilizados pelo WEC (2022b).

Por último, foi feita a decomposição de Kaya para análise da energia primária e as emissões de CO<sub>2</sub> com o crescimento populacional e econômico dos países, entre os anos de 1990 e 2019, de acordo com a equação (1). Os indicadores obtidos no método de Kaya foram PIB per capita (US\$/per capita), intensidade energética (tep/US\$), intensidade de CO<sub>2</sub> (Mt CO<sub>2</sub>/tep), energia primária (tep) população e emissões totais de CO<sub>2</sub> (Mt CO<sub>2</sub>). Os gráficos foram construídos calculando a variação dos indicadores em relação a um ano base, no caso o primeiro do período analisado. Dessa maneira, valores maiores que um representam aumento do indicador em relação ao ano base, e menores que um, queda.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Emissões de CO<sub>2</sub> x população

A Figura 1 apresenta os cinco países dos BRICS e OCDE considerando as suas populações e as respectivas emissões de CO<sub>2</sub> (em 1990 e 2019). A Tabela 1 apresenta as emissões per capita dessas nações, onde estão descritos os valores absolutos nos eixos e, também, a razão, em toneladas de CO<sub>2</sub> per capita. Dessa forma, quando se observa os valores absolutos no sistema de coordenadas, é possível comparar os países em termos dimensionais e seus respectivos impactos no âmbito global. Por outro lado, quando se observa, também, a razão entre as grandezas, de forma per capita,

o valor obtido proporciona uma informação de caráter mais comportamental dos habitantes desses países e como eles impactam nas respectivas emissões gasosas.

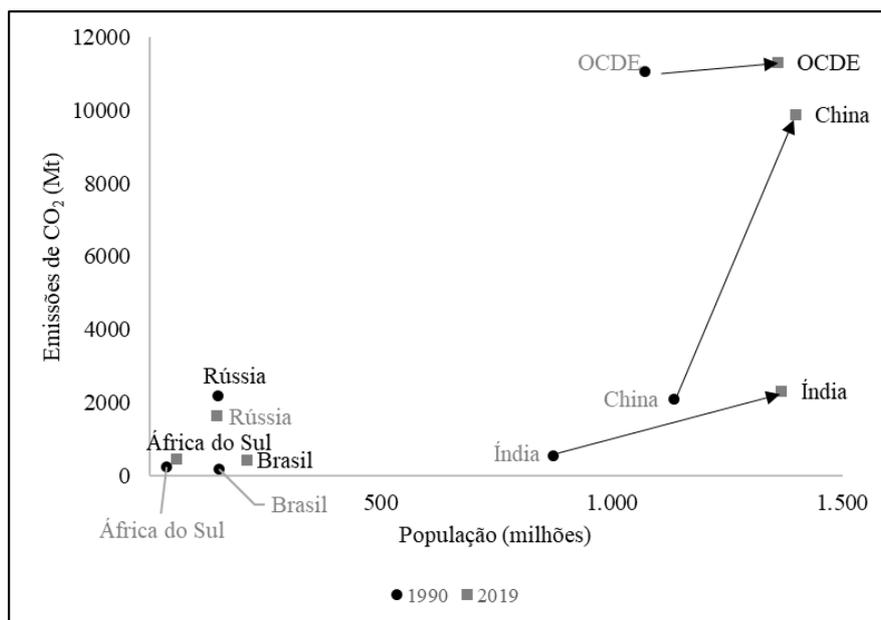


Figura 1 - Emissões de CO<sub>2</sub> por população

Observe que não há, de forma clara, uma relação de proporcionalidade entre os países do grupo, nem tão pouco uma correlação entre eles. Isso considerando tanto os valores absolutos como os relativos. Consequentemente, fica claro que existe uma grande distinção entre os países no que se refere às emissões de CO<sub>2</sub>.

No eixo demográfico, China e a Índia se destacam com as suas enormes populações superiores a 1,3 bilhão de habitantes, enquanto os outros três países têm populações que variam de 59 milhões (África do Sul) ao máximo de 211 milhões de habitantes (Brasil), ficando agrupados no canto inferior esquerdo do gráfico. Já no eixo das emissões de CO<sub>2</sub>, apenas a China possui um valor discrepante dos demais e bem superior aos outros países, com 9.876 Mt CO<sub>2</sub>. As emissões dos demais países do grupo variam de 433 Mt CO<sub>2</sub> (África do Sul) a 2.310 Mt CO<sub>2</sub> (Índia).

Observando agora o valor obtido da relação das emissões de CO<sub>2</sub> pela população, pode-se notar a grande variação entre os países com um fator de mais de seis vezes para os extremos: Índia (1,69 t CO<sub>2</sub>/cap) e Rússia (11,36 t CO<sub>2</sub>/cap), tabela 1. A China, por sua vez, destaca-se pelo grande aumento das emissões per capita, saindo de 1,84 t CO<sub>2</sub>/cap em 1990 para 7,07 t CO<sub>2</sub>/cap em 2019, aumento de 284%. Para efeito comparativo, foi incluído o grupo de países da OCDE na análise. Figura 1 permite notar que a população é semelhante à da China e da Índia, porém com emissões consideravelmente maiores.

Tabela 1: Emissões per capita dos BRICS e OCDE

Emissions per capita (t CO <sub>2</sub> /cap)	IND	BRA	CHN	ZAF	RUS	OCDE	BRICS	Mundo
1990	0,61	1,24	1,84	6,63	14,49	10,32	2,24	3,89
2019	1,69	1,95	7,07	7,39	11,36	8,32	4,61	4,38

Dessa maneira, o grupo de nações consideradas desenvolvidas apresentou uma emissão per capita de 8,32 t CO<sub>2</sub>/cap em 2019, entretanto, houve queda de 19% neste indicador se comparado com 1990. Fazendo uma comparação entre 1990 e 2019, observa-se também o crescimento demográfico de China (+263 milhões) e Índia (+493 milhões), evidenciado pelo tamanho das setas. A Rússia foi o único país com diminuição populacional (-3,9 milhões).

#### 4.2. Análise CO<sub>2</sub>/PIB x CO<sub>2</sub>/CAP

A Figura 2 descreve a relação das emissões de CO<sub>2</sub> por PIB em função das emissões per capita dos países dos BRICS, OCDE e mundo, para os anos de 1990 e 2019, de modo a complementar o estudo da seção anterior. A Figura apresenta ainda os valores percentuais do PIB e emissões de CO<sub>2</sub>. Além disso, foi colocada também uma seta em cada país com a origem no ano de 1990 em direção ao ano de 2019. No caso de a seta apontar para próximo da origem dos eixos (ponto 0,0), demonstra que a população e PIB têm valores com tendência de aumentar mais que os das emissões de CO<sub>2</sub>.

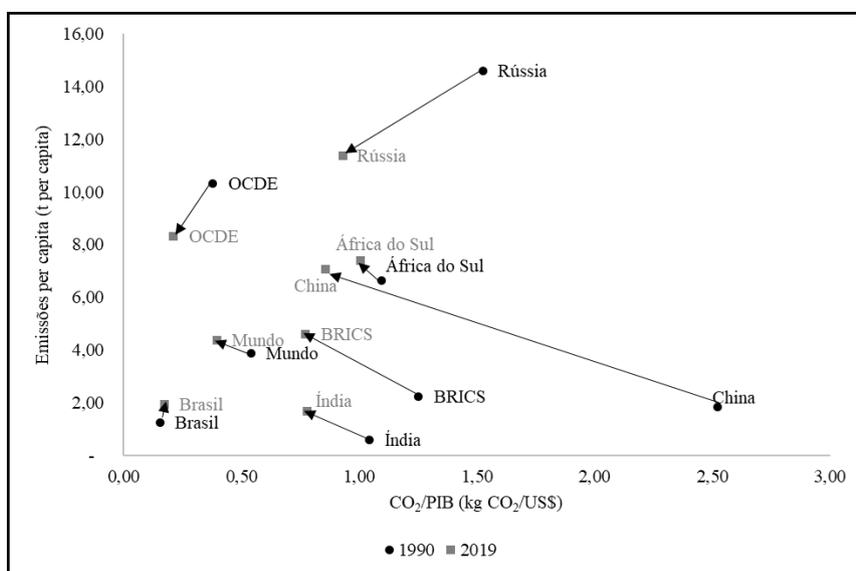


Figura 2 - Relação emissões per capita com CO<sub>2</sub>/PIB

É possível destacar a posição de Rússia e China em 1990 e a grande diferença para 2019, representada pela elevado tamanho das setas. O primeiro país apresentava, em 1990, um alto valor de emissões per capita, de 14,59 toneladas de CO<sub>2</sub> por pessoa, enquanto o segundo, um alto número de emissão por PIB, de 2,52 kg de CO<sub>2</sub> por dólar. A Rússia juntamente com a OCDE foram os únicos que conseguiram melhora nos dois indicadores. Os outros países dos BRICS, com exceção do Brasil, seguiram a tendência mundial de diminuição das emissões por PIB e aumento das emissões per capita. O Brasil foi o único país que apresentou piora nos dois sentidos, saindo de 0,15 kg CO<sub>2</sub>/US\$ para 0,18 kg CO<sub>2</sub>/US\$, e de 0,24 t CO<sub>2</sub> per capita para 1,95 t CO<sub>2</sub> per capita, se distanciando a origem. Entretanto, apesar da piora, no ano de 2018, Brasil e Índia, foram os países que, proporcionalmente, menos contribuíram para a emissão de CO<sub>2</sub>. Ambos permaneceram abaixo da média mundial, de 4,38 toneladas de dióxido de carbono por habitante.

A China é o país do grupo de maior PIB (13,6% do PIB mundial) e o mais poluidor (29,4% do dióxido de carbono emitido). Sendo assim, possui um alto valor de emissões por PIB, de 0,86 kg CO<sub>2</sub>/US\$, juntamente com o Rússia (0,93 kg CO<sub>2</sub>/US\$), África do Sul (1,01 kg CO<sub>2</sub>/US\$) e Índia (0,80 kg CO<sub>2</sub>/US\$). Nesse contexto, o Brasil é o único que tem maior fração de PIB (2,8%) do que de emissão de CO<sub>2</sub> (1,2%), resultando em um baixo valor para este indicador, de 0,18 kg CO<sub>2</sub>/US\$.

A Tabela 2 faz um comparativo da participação de cada país e grupo no PIB, emissões de CO<sub>2</sub> e população em relação ao mundo, para o ano de 2019. Primeiramente, é possível observar que o Brasil é o país mais equilibrado e ecológico dentre os analisados. O país tinha 2,8% da população mundial em 2018, mesmo percentual de participação no PIB. Também é o único que possui fração do CO<sub>2</sub> menor que a fração de PIB e população. Dessa maneira, as relações de CO<sub>2</sub>/PIB e CO<sub>2</sub>/Pop são menores que um.

Tabela 2 - Comparativo da participação do PIB, emissões de CO<sub>2</sub> e população

	Brasil	Rússia	Índia	China	África do Sul	BRICS	OCDE
% PIB	2,8%	2,1%	3,5%	13,6%	0,5%	22,4%	62,9%
% CO <sub>2</sub>	1,2%	4,9%	6,9%	29,4%	1,3%	43,6%	33,7%
% Pop	2,8%	1,9%	17,8%	18,2%	0,8%	41,4%	17,7%
CO <sub>2</sub> /PIB	0,442	2,351	1,969	2,163	2,543	1,946	0,535
CO <sub>2</sub> /Pop	0,444	2,593	0,386	1,613	1,688	1,053	1,899

O grupo dos BRICS teve participação da população (41,4%) semelhante à participação de CO<sub>2</sub> (43,6%). Entretanto, a fração do PIB foi de apenas 22,4%. Por outro lado, o grupo da OCDE concentra mais da metade do PIB mundial (62,9%), com apenas 17,7% da população, porém com 33,7% das emissões de dióxido de carbono.

### 4.3. Participação dos fósseis e renováveis na matriz energética

Esta seção busca caracterizar a matriz energética dos países dos BRICS separadamente, assim como o grupo como um todo, OCDE e mundo para efeitos comparativos. A Figura apresenta a participação das fontes fósseis, dividindo-as em gás natural, petróleo e carvão, além das fontes renováveis e energia nuclear, para os anos de 1990 e 2019.

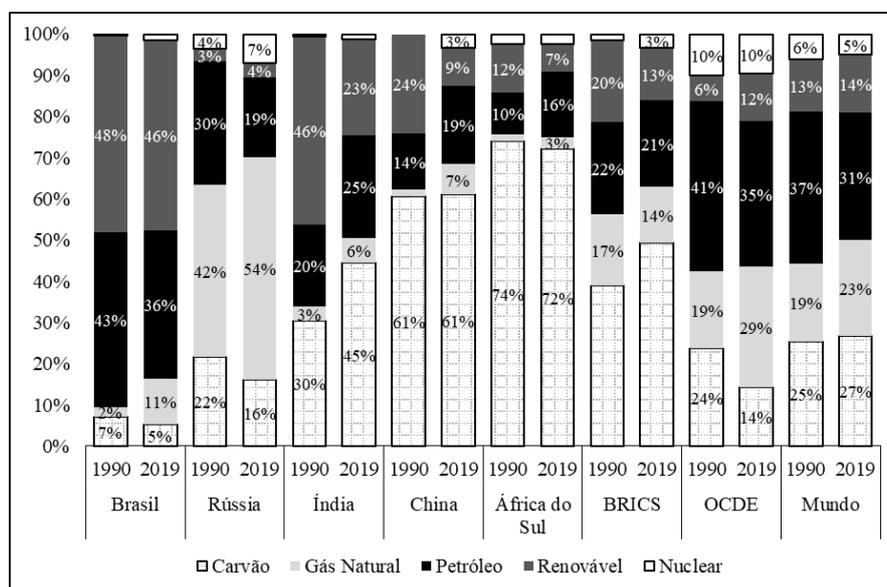


Figura 3 - Participação dos fósseis e renováveis na matriz energética

É possível observar, na Figura 3, a preponderância da fração de energia fóssil de todos os países. Os valores extremos registrados foram para Brasil, com 52%, e África do Sul, com 91% de participação para esta fonte, no ano de 2019. Consequentemente, o Brasil apresentou o valor extremo para o uso de energia renovável, com 46%, por outro lado, a Rússia teve apenas 3%. Nenhuma nação aumentou o uso de fontes renováveis no período descrito. Apenas o grupo da OCDE conseguiu passar de 6% para 12%, e o mundo de 13% para 14%. A energia nuclear continua sendo pouco utilizada, tendo aumentado apenas na Rússia, saindo de 4% para 7%, e tendo maior participação na OCDE, com 10% em ambos os anos descritos.

Mais especificamente sobre as fontes fósseis, o grupo dos BRICS apresenta um alto uso de carvão, saindo de 39% em 1990, chegando a 49% de participação na matriz energética em 2019. Esse valor foi puxado por China, Índia e África do Sul, este último alcançando o valor de 72% de

carvão para o último ano analisado. China e Índia sendo os mais países mais populosos do mundo e grande consumidores de energia, fizeram com que o uso de carvão no mundo também aumentasse, passando de 25% para 27%.

O gás natural merece destaque nesta análise. O seu uso foi maior valor na Rússia, com 54% de participação em 2019, país este que possui grandes reservas deste recurso e é fornecedor da Europa. No Brasil, este valor saiu de apenas 2% em 1990 para 11% em 2018. O grupo da OCDE, representando os países desenvolvidos, também apresentou crescimento, chegando a 29%, além do mundo, com 23%. Entretanto, nos BRICS o gás natural teve queda na participação, de 17% para 14%. Analisando agora os números absolutos, na Figura 4, percebe-se a grande diferença do consumo de energia da China, com valores da ordem de 3.000 Mtep, para os outros países.

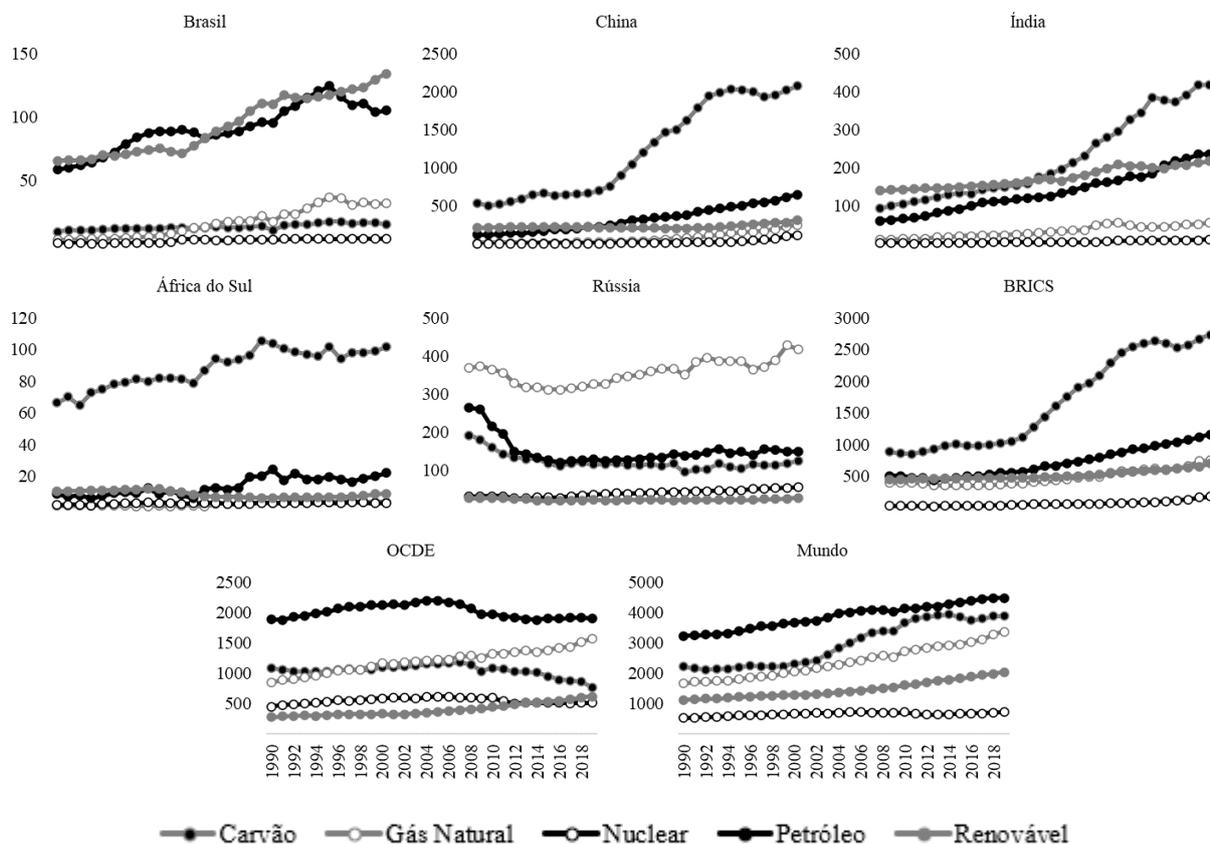


Figura 4 - Matriz energética

No Brasil, apesar da diminuição da fração de renováveis, esse tipo de energia ainda foi o mais usado em 2019, com crescimento em praticamente em todos os anos a partir de 2001. O consumo de gás natural cresceu 855%, saltando de 3,3 Mtep para 31,8 Mtep. China, Índia, África do Sul e o grupo dos BRICS tiveram grande crescimento de carvão a partir de 2002, o que inclusive impactou na curva do mundo. Por outro lado, depois de 2009, OCDE teve queda no consumo petróleo e principalmente de carvão, e aumento no uso de gás natural.

#### 4.4. Histórico da participação dos fósseis e renováveis nas matrizes dos BRICS

Essa seção analisa o histórico de uso de cada fonte fóssil em relação à utilização total desse tipo de recurso, de forma a complementar o estudo feito na seção anterior. A Figura 3 mostra a participação de petróleo, gás natural e carvão em relação ao total de energia proveniente de fontes fósseis para os países dos BRICS, entre os anos de 1990 e 2019.

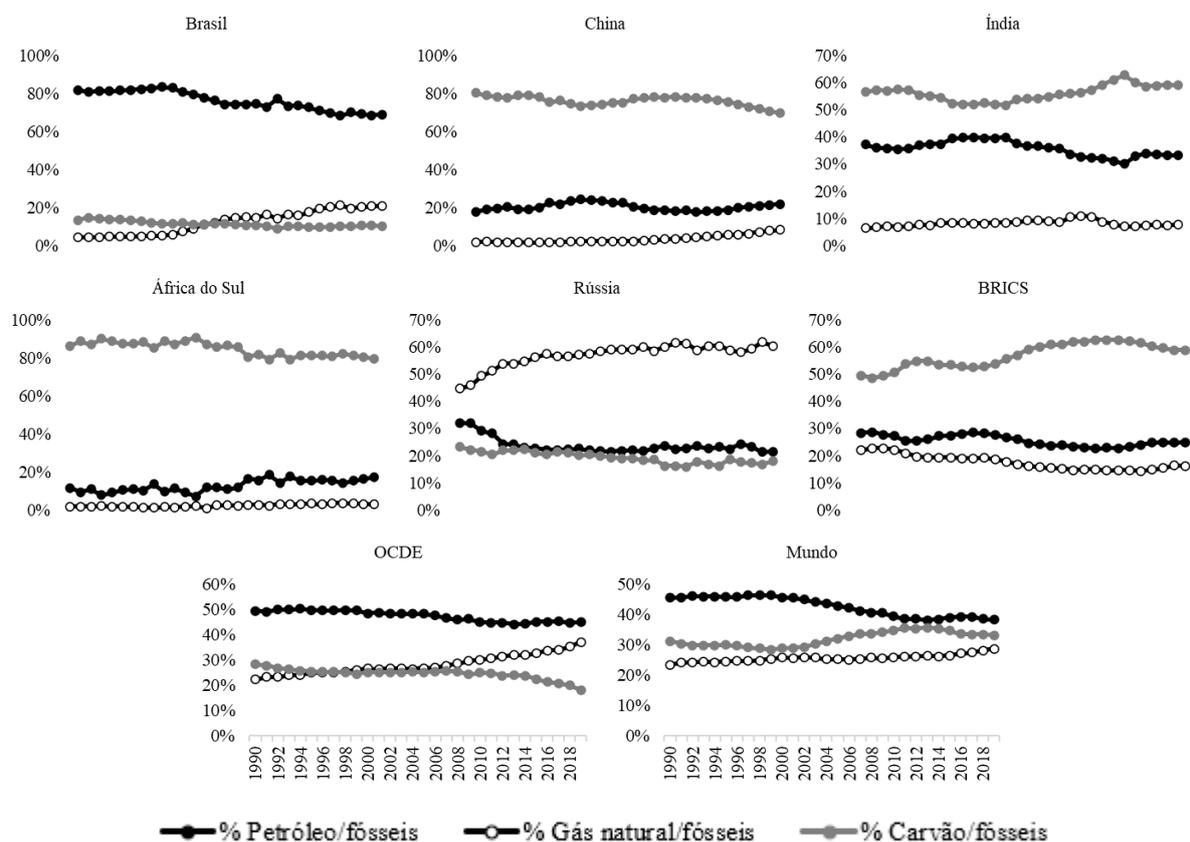


Figura 3 - Participação dos combustíveis fósseis em relação ao total dessa fonte

Inicialmente, pode-se observar que China, Índia e África do Sul têm como característica o forte uso de carvão, com valores na casa dos 70%, 60% e 80%, respectivamente. Enquanto o Brasil utiliza mais petróleo e a Rússia o gás natural. Os gráficos da OCDE e mundo mostram a predominância do petróleo no uso de combustíveis fósseis, em patamares de 45% e 40%, respectivamente, entretanto, ele vem perdendo espaço. No caso da OCDE, o gás natural teve forte aumento de participação, saindo de 22,3% em 1990 para 35,2% em 2019, em detrimento do petróleo e principalmente do carvão. Porém, no caso mundial, o gás natural tem uma curva mais estável, com leve aumento nos últimos anos. As maiores mudanças estão na diminuição do uso de petróleo e aumento de carvão.

Além disso, ao longo desses 29 anos não houve grandes alterações no que se refere às posições dos combustíveis fósseis, o consumo relativo entre eles. O Brasil apresentou uma mudança significativa, quando no ano de 2002, o país teve uma inversão de posição do carvão, que era a segunda fonte mais utilizada, com gás natural. Este último saiu de 4,7% para 20,9% de participação, enquanto o petróleo perdeu espaço, saindo de 81,8% em 1990 para 68,9% em 2019. Como já visto, o gás natural apresentou forte aumento no período estudado para este país. Observando a curva para a OCDE, é possível ver uma inversão, assim como no caso brasileiro, do carvão com o gás natural, porém, ocorrendo anteriormente, em 1998. A partir de 2007, a diferença foi aumentando.

Vale destacar também que o gás natural teve crescimento na Rússia entre 1990 e 1998, em detrimento do uso de petróleo, e na China, a partir de 2010, diminuindo a participação de carvão. Na África do Sul observa-se diversas variações no uso de carvão e petróleo, característica de uma nação que passou por crises econômicas e políticas.

#### 4.5. Relação CO<sub>2</sub>/energia primária

A Figura 4 faz uma comparação da quantidade de CO<sub>2</sub> emitido para energia liberada ao longo do tempo, para os países dos BRICS, OCDE e mundo. Os valores apresentados estão em toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de óleo equivalente. Essa é uma das maneiras de se medir a eficiência e ecologia dos recursos energéticos, já que é importante buscar meios de gerar mais energia emitindo menos dióxido de carbono. Assim, a relação CO<sub>2</sub>/TPES deve ser a menor possível. Esta parte do trabalho complementa a seção 4.4, permitindo observar o impacto na eficiência energética de cada país ao longo do tempo em função do uso de cada combustível fóssil.

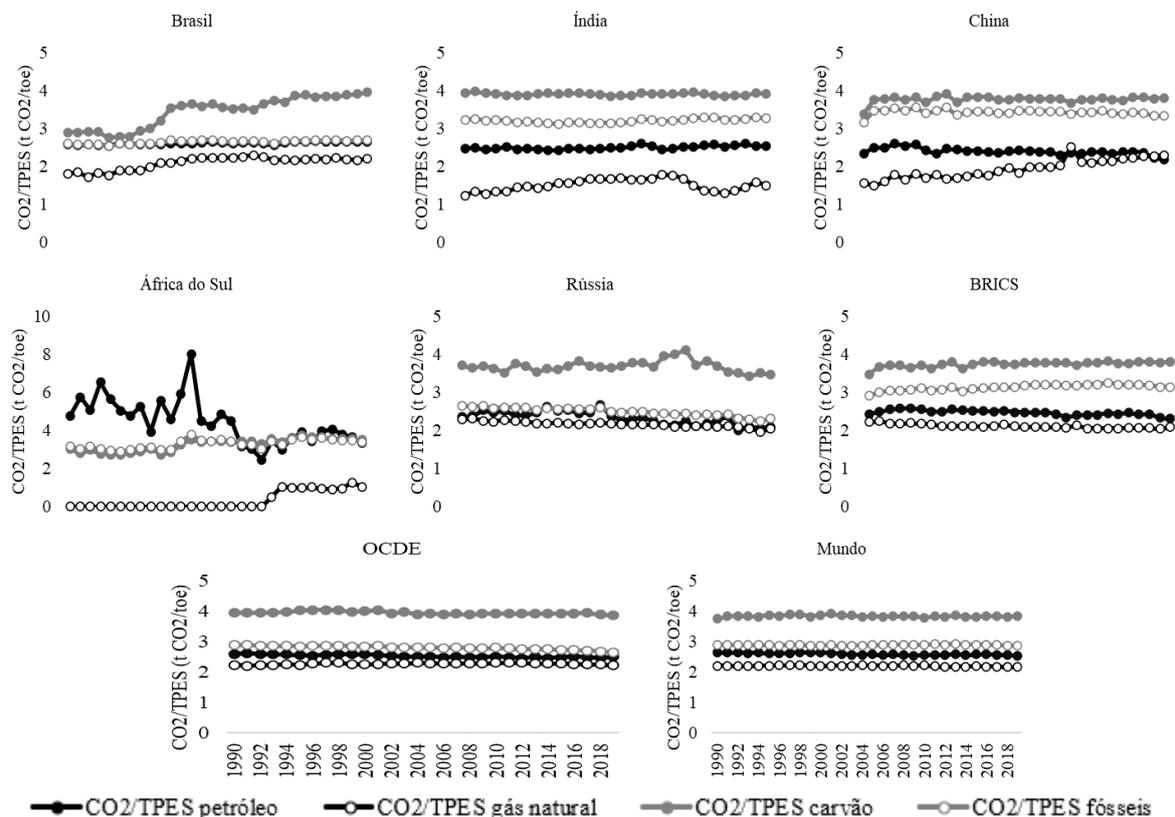


Figura 4 - CO<sub>2</sub>/TPES para os combustíveis fósseis

Como era de se esperar, o gás natural é o combustível mais limpo dentre os fósseis, com uma relação CO<sub>2</sub>/TPES mais baixa. Desse modo, ele libera menos dióxido de carbono para uma mesma energia consumida para todos os países e grupos estudados. Enquanto o carvão é a fonte menos eficiente, com uma relação CO<sub>2</sub>/TPES mais alta, ficando o petróleo com um valor intermediário. Isso ocorreu em todos os países e grupos analisados, praticamente em todos os anos. É interessante notar, ainda, que a curva CO<sub>2</sub>/TPES para os combustíveis fósseis acompanha a curva do carvão em China, Índia, África do Sul e BRICS, uma vez que este é o combustível predominante nestes países e nesse grupo, como já visto anteriormente.

No caso dos BRICS, houve queda na eficiência, com aumento de 2,90 t CO<sub>2</sub>/toe em 1990 para 3,14 t CO<sub>2</sub>/toe em 2019. Isso ocorreu pelo aumento de uso de carvão. Já no grupo da OCDE ocorreu o oposto. Em 1990 foram 2,89 t CO<sub>2</sub>/toe, valor bem próximo do número apresentado pelos BRICS no mesmo ano, porém ocorreu queda para 2,64 t CO<sub>2</sub>/toe em 2019, em função do aumento da participação do gás natural na matriz energética. O mundo apresentou linhas estáveis nessa análise, tendo, em 2019, 2,85 t CO<sub>2</sub>/toe. O valor foi de 2,16 t CO<sub>2</sub>/toe para o gás natural, 2,53 t CO<sub>2</sub>/toe para o petróleo e 3,82 t CO<sub>2</sub>/toe para o carvão. Nesse sentido, o gás natural emite 43% menos CO<sub>2</sub> se comparado ao carvão e 15% menos frente ao petróleo.

#### 4.6. Matriz elétrica

A Figura 5 traz a matriz elétrica dos países dos BRICS, OCDE e mundo para os anos de 1990 e 2019. As fontes estão divididas em hidroeletricidade, petróleo, biocombustíveis, nuclear, gás natural, carvão, eólica, solar fotovoltaica e outras fontes (geotérmica, maremotriz, solar térmica e resíduos). Essa análise permite enxergar o uso de gás natural, combustíveis fósseis e emissões de dióxido de carbono mais especificamente dentro da matriz elétrica de cada nação.

A geração de eletricidade é ponto chave para o trilema energético. Risco de apagões por elevados preços de combustíveis ou falta de chuvas, por exemplo, importação de energia elétrica e baixa diversificação na geração impactam na segurança energética. Altas tarifas influenciam na nota da equidade energética.

Inicialmente, é possível visualizar, novamente, o alto uso de carvão para os países estudados. Esse combustível é o mais usado para geração de energia elétrica no mundo (37%), além de ser predominante no somatório dos BRICS (58%), China (65%), Índia (73%) e África do Sul (88%), considerando os valores de 2019. De uma forma geral, proporcionalmente, houve aumento do uso desse recurso em relação a 1990. No mesmo panorama dos países e grupos analisados, o petróleo tem deixado de ser usado para geração de eletricidade.

Interessante notar que o mundo mostrou uma diversificação da matriz elétrica, diminuindo o uso de petróleo (11% para 3%) e energia nuclear (17% para 10%). E aumentando o consumo de biocombustíveis (1% para 2%), energia solar fotovoltaica (0% para 3%), eólica (0% para 5%) e gás natural (15% para 23%). Caminho parecido seguiu o grupo da OCDE, entretanto, houve diminuição do uso de carvão (40% para 22%), que foi substituído principalmente pelo gás natural (10% para 30%). O grupo dos BRICS também mostrou um avanço na diversificação, mas ainda assim o carvão ocupou um espaço maior na matriz elétrica, saindo de 40% para 58%. Em 2019, o petróleo não teve mais valores significativos de geração de energia elétrica.

Falando mais especificamente dos países, o Brasil mais uma vez se destaca pelo uso de fontes renováveis, figura 7. Em 1990, a geração por hidroelétricas foi de 93%, caindo, porém, para 64% em 2019. Número ainda muito maior que o valor apresentado pelo mundo (16%). Houve aumento no uso de energia nuclear (1% para 3%), biocombustíveis (2% para 9%), além do surgimento na matriz elétrica do gás natural, com 10%, e energia eólica, com 9%.

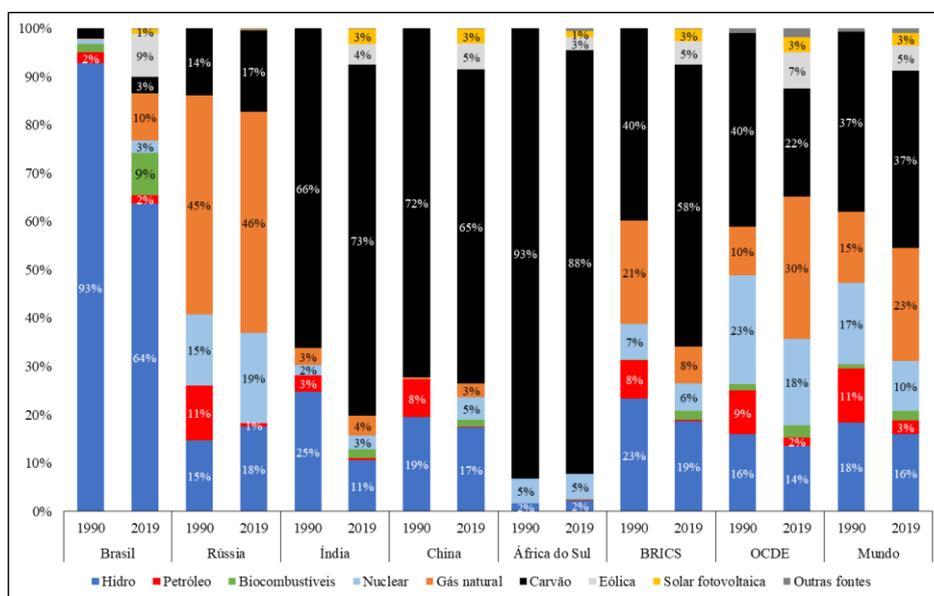


Figura 5 - Matriz elétrica dos países dos BRICS, OCDE e Mundo

A China praticamente extinguiu o uso de petróleo e substituiu parte do carvão por gás natural (3%), eólica (5%), solar fotovoltaica (3%) e nuclear (5%), em 2019. Índia, que já usava bastante carvão, chegou ao patamar de 73% de uso na geração de eletricidade. Porém, começou a usar energia eólica (4%), solar fotovoltaica (3%) e biocombustíveis (2%). No caso da Rússia, assim como na matriz energética, na elétrica o uso de gás natural também é destaque, tendo participação de 46%, e energia nuclear, com 19%, em 2019. Esses valores são consideravelmente maiores que a média mundial e que os números dos outros países estudados. Por último, a África do Sul foi o país mais dependente de carvão, utilizado para gerar 88% da energia elétrica em 2018. No entanto, passou a utilizar também energia eólica (3%) e solar fotovoltaica (1%).

#### 4.7. Trilema de energia, IDH, energia renovável e fóssil

Esta seção avalia a posição dos países no ranque do Trilema de Energia com relação a dois aspectos distintos. Primeiro, o Trilema de Energia com relação ao desenvolvimento tomando como referência o ranque do IDH e, segundo, com relação às participações percentuais de energia renovável em suas respectivas matrizes energéticas. Para isto, foi construído o gráfico da Figura 6 (com dados de 2019). O eixo da abscissa descreve o ranque do Trilema de Energia, já no eixo da ordenada esquerda está a participação dos renováveis e no eixo da ordenada direita a posição no ranque do IDH. Para efeito comparativo, além dos países dos BRICS, foi incluído também os dez primeiros do ranque do Trilema de Energia. Note que cada país aparece na Figura três vezes, ou seja, para cada posição do ranque do Trilema de Energia, um determinado país aparece com o valor do IDH e, também, a porcentagem de renovável e fóssil.

Inicialmente pode-se dividir a figura 8 em quatro regiões ou quatro quadrantes, cada uma com suas características. Nos quadrantes do lado direito estão os países dos BRICS China, África do Sul, com posição mais baixo no ranque. No lado esquerdo, estão os países líderes do ranque e numa posição intermediária, Brasil e Rússia. Na parte superior, ao mesmo tempo pode-se observar as nações com alto IDH, e na parte inferior, logicamente, baixo IDH (África do Sul e Índia).

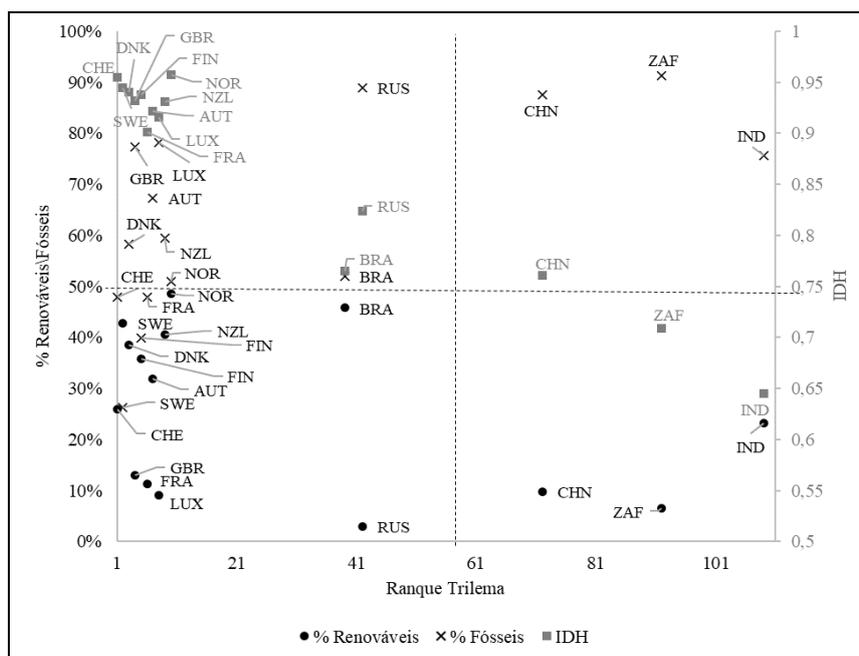


Figura 6 - Relação da posição no ranque do Trilema de Energia com participação de energias renováveis, fósseis e IDH

No que se refere ao Trilema de Energia e a participação de energia renovável, figura 8, observa-se que não há um padrão comportamental ou algum tipo de correlação entre os valores. Ou seja, todos os países, tanto dos BRICS como os dez primeiros, possuem participações bem

diferentes de energias renováveis em suas matrizes, com valores que variam de menos de 10% a quase 50% de fontes renováveis. No grupo de países dos BRICS, o Brasil se destaca com quase 50% de participação de energias renováveis. No grupo dos dez primeiros, a Noruega também se destaca com quase 50%.

Ainda é possível notar que as energias fóssil e renovável se complementam, de maneira a somar quase 100% da matriz energética dos países, fazendo com que os círculos e os xis fiquem opostos no gráfico, paralelos ao eixo das ordenadas. A França é exceção, já que possui alto uso de energia nuclear, restando 11% de renováveis e 48% de fósseis.

Por outro lado, é possível ver uma relação direta entre o IDH e a posição no ranque. O coeficiente de correlação  $\rho$  calculado de acordo com a Equação (2) foi de 0,8, indicando uma correlação forte entre as variáveis, onde à medida que se aumenta o IDH, as posições diminuem em número, porém, a classificação no ranque melhora. Os resultados foram significativos de acordo com a Equação (3), com  $t$  calc de 4,807 e  $t$  tab de 3,012. Os cálculos estão na Tabela 3.

Tabela 3: Cálculo de coeficiente de correlação  $\rho$ 

Sigla	País	x	y	Postos x	Postos y	$d_i$	$d_i^2$	Sigla	País	x	y	Postos x	Postos y	$d_i$	$d_i^2$
SWE	Suécia	2	0,945	2	3	-1	1	FRA	França	6	0,901	6	10	-4	16
DNK	Dinamarca	3	0,94	3	4	-1	1	NOR	Noruega	10	0,957	10	1	9	81
GBR	Reino Unido	4	0,932	4	6	-2	4	BRA	Brasil	39	0,765	11	12	-1	1
FIN	Finlândia	5	0,938	5	5	0	0	RUS	Rússia	42	0,824	12	11	1	1
ZAF	África do Sul	92	0,709	14	14	0	0	CHN	China	72	0,761	13	13	0	0
AUT	Áustria	7	0,922	7	8	-1	1	CHE	Suíça	1	0,955	1	2	-1	1
LUX	Luxemburgo	8	0,916	8	9	-1	1	IND	Índia	109	0,645	15	15	0	0
NZL	Nova Zelândia	9	0,931	9	7	2	4								

Entretanto, o mesmo não ocorre com o uso de energia renovável ou fóssil e a classificação baseada no trilema de energia. Sendo assim, os países líderes do ranque possuem alto índice de desenvolvimento humano, estando agrupados no canto superior esquerdo (quadrados). Porém não necessariamente tem um alto uso de energia renovável, estando dispersos no lado esquerdo (círculos e xis). Os países Reino Unido, França e Luxemburgo, inclusive, apresentam um baixo valor de energia renovável, variando entre 9% e 13%, estando próximo do valor mundial, que foi de 14% em 2019.

O gráfico da Figura 8 mostra a diferença do grupo dos BRICS em relação aos 10 primeiros do ranque, tabela 3, estando distantes dos líderes, variando entre as posições 39 (Brasil) e 109 (Índia). O grupo está posicionado no canto inferior direito, numa região de baixo uso de energia renovável. O Brasil tem a melhor posição entre os países integrantes do grupo, se distanciando da região ocupada pelos demais no mesmo quadrante, devido ao alto uso de energia renovável, de 46%. A Rússia apresenta uma posição no ranque próxima à do Brasil, porém, uso de fontes renováveis menor, de 3%.

#### 4.8. Avaliação dos pilares do trilema de energia

A Figura 7 faz um comparativo da nota de cada um dos pilares do Trilema de Energia para os países dos BRICS, apresentando os valores das notas separados, além das suas médias, para os anos de 2000 a 2020. Os gráficos foram construídos na mesma escala para facilitar e possibilitar a comparação. Vale lembrar que a média aqui apresentada não equivale a avaliação final do WEC, uma vez que não é considerada a nota do contexto de cada país.

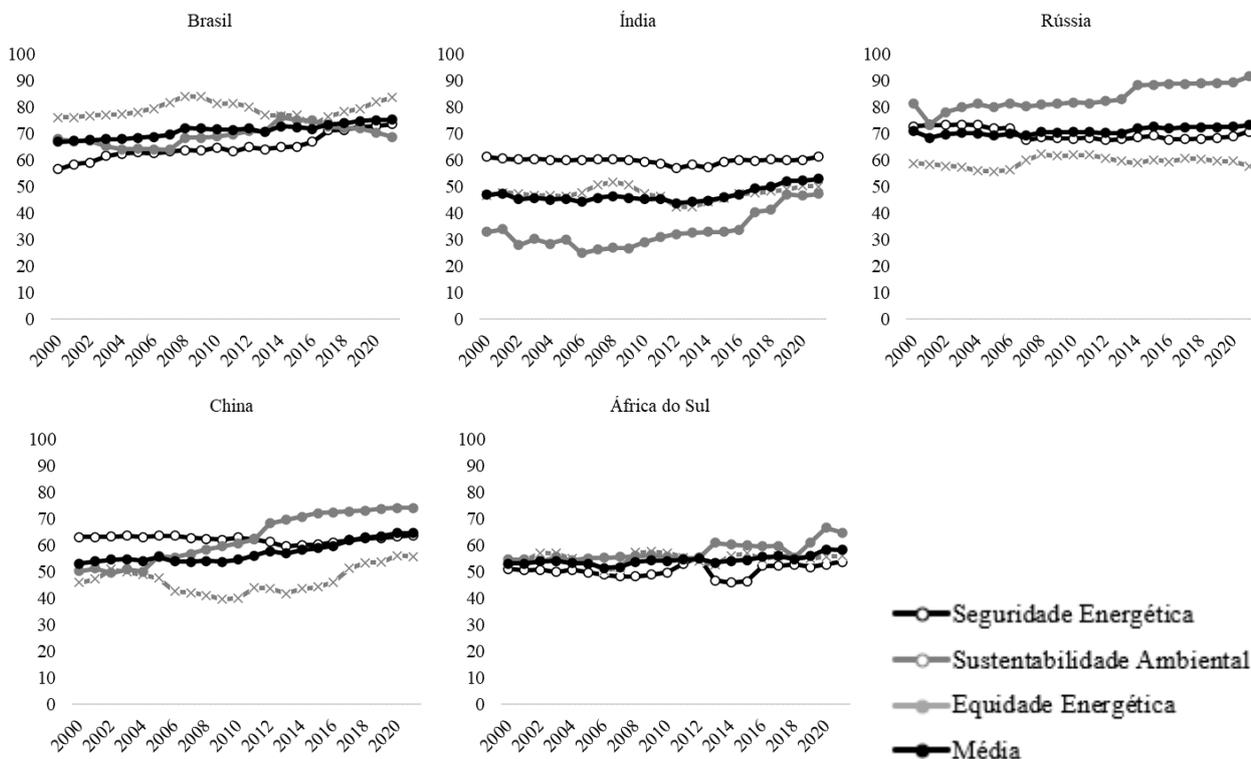


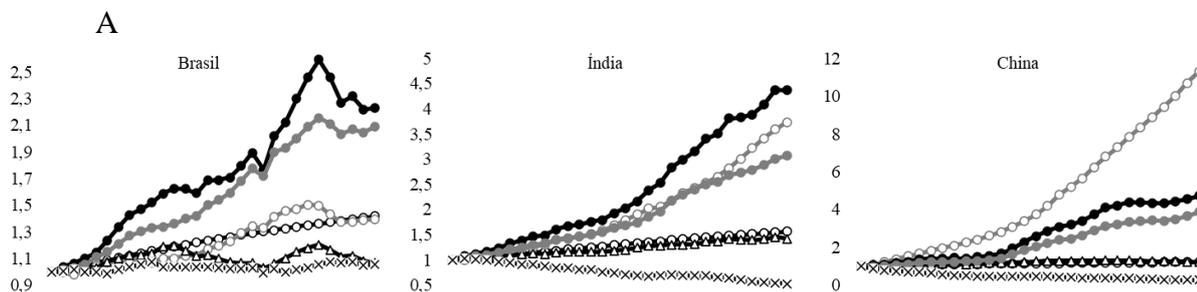
Figura 7 - Nota dos pilares do Trilema de Energia para os BRICS

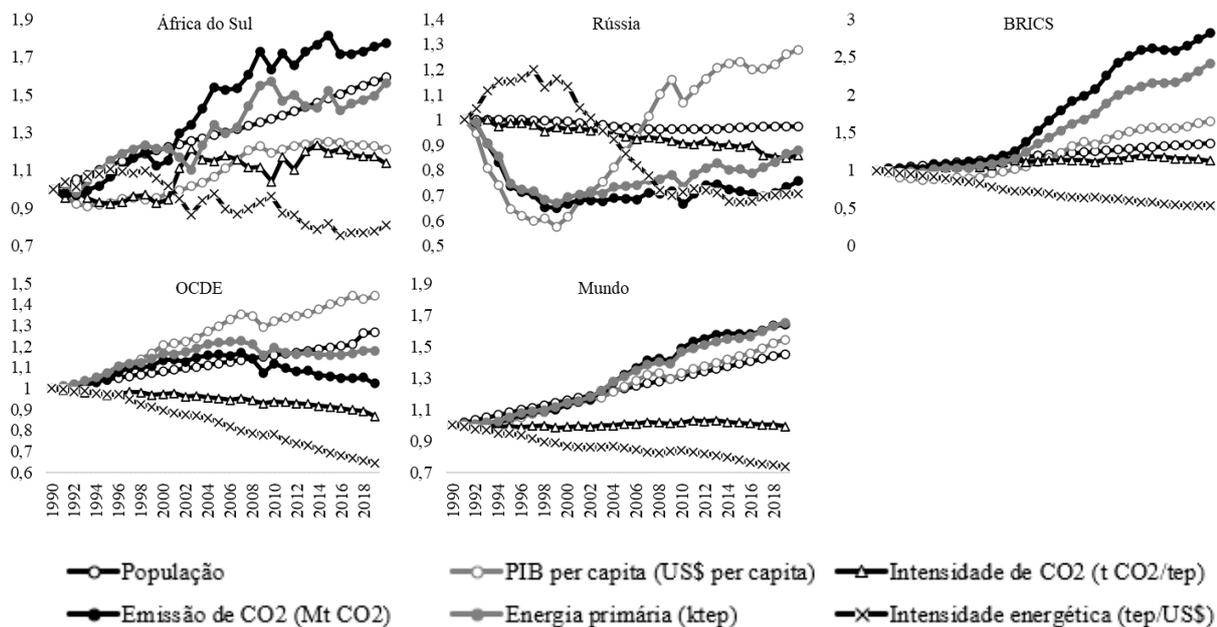
Pode-se observar, assim como mostrado anteriormente, que o Brasil é o que apresenta a melhor avaliação no Trilema de Energia, chegando a 75,2 de média em 2021. A melhor avaliação, como era de se esperar frente aos números apresentados, foi para o quesito ambiental, com valor de 83,4. Destaque também para o pilar de seguridade energética, que cresceu de 56,5 em 2000 para 73,5 em 2021, um aumento de 30,2%. Visualmente, também é possível ver que o Brasil tem baixa discrepância entre as notas, apresentado assim um sistema mais equilibrado no sentido de não prejudicar muito um quesito para melhorar outro. É o único país com nota da sustentabilidade ambiental superior às demais avaliações. Desse modo, os outros países priorizaram seguridade energética e equidade energética em detrimento do meio ambiente.

Os demais países também têm seus destaques. Índia e China apresentaram grande crescimento da avaliação da equidade energética, com aumentos de 43,3% e 47,8%, respectivamente. Rússia foi o único país com piora na seguridade energética (-2,7%) e sustentabilidade ambiental (-1,8%), porém, teve a melhor nota para equidade energética (89,2).

Por outro lado, utilizando uma metodologia distinta para cálculo da nota, Bogoviz *et al.* (2019) concluíram que, no período de 1990 a 2015, Rússia obteve melhora na seguridade energética, enquanto China apresentou piora.

#### 4.9. Análise da decomposição de Kaya





**Figura 8** apresenta as Decomposição de Kaya para os países dos BRICS, OCDE e mundo. Numa primeira análise grupal, os países do dos BRICS, no geral, apresentaram aumento populacional, que resultou em acréscimo no gasto de energia primária e nas emissões de dióxido de carbono. Os indicadores intensidade de CO<sub>2</sub> e intensidade energética não variaram significativamente entre 1990 e 2019, tendo curvas características de países em desenvolvimento. O gráfico que representa o grupo dos BRICS consolidado tem as mesmas propriedades. Já o grupo OCDE apresenta uma curva característica de países desenvolvidos, com queda na intensidade energética e intensidade de CO<sub>2</sub>.

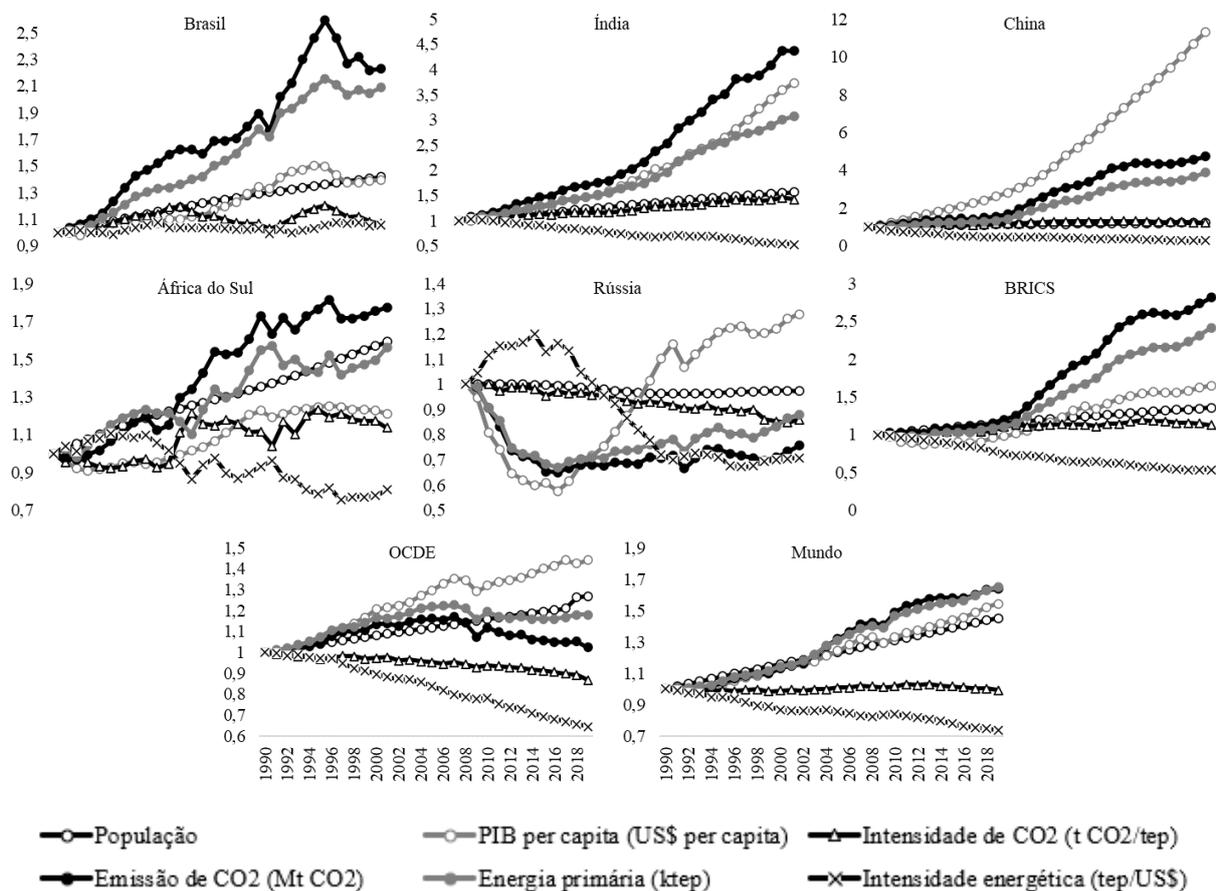


Figura 8 - Decomposição de Kaya para os BRICS, OCDE e Mundo

A curva das emissões de dióxido de carbono acompanha a curva de energia primária, que cresceu até a crise de 2008 e então passou a cair. Conforme apontado por Su *et al.* (2020), a queda na intensidade energética foi a principal responsável pela queda nas emissões de CO<sub>2</sub> para os países desenvolvidos, representados pelo G7. Por último, a curva mundial mostra linhas mais estáveis, com exceção para a descontinuidade no ano de 2009. A intensidade de CO<sub>2</sub> não se alterou, porém, a intensidade energética caiu consideravelmente. Para o gráfico global essas linhas já eram esperadas, visto que é difícil conseguir uma mudança considerável a nível mundial.

Em uma análise mais específica por país, pode-se ver que o Brasil apresentou aumento na energia primária, que foi acompanhado pelo aumento de emissão de CO<sub>2</sub>. A Rússia foi o único país que apresentou grande queda no seu PIB per capita e aumento na intensidade energética, na década de 1990. Isso ocorreu possivelmente por conta de instabilidades políticas pelo fim da União Soviética que causaram grande variação no PIB. No entanto, esses indicadores inverteram sua tendência no final dos anos 90. A Índia teve acréscimo na energia primária e nas emissões de CO<sub>2</sub>, e crescimento no PIB per capita. No período, a China teve grande aumento populacional, de quase quatro vezes, e de emissões de CO<sub>2</sub>, indicadores que se estabilizaram a partir de 2012. Porém, o maior destaque é para o seu PIB per capita que aumentou em 11,3 vezes de 1990 para 2019. Já a África do Sul mostra muitas instabilidades e descontinuidades, com exceção da população, que cresceu em um ritmo constante. Juntamente com a Rússia, foi o único país que conseguiu diminuir consideravelmente a intensidade energética.

Fazendo um paralelo com a Figura , percebe-se que para o Brasil, a curva de emissões de CO<sub>2</sub> acompanha a curva do consumo de petróleo. O mesmo ocorre com China, Índia e África do Sul e o grupo dos BRICS, porém com o carvão. Isso era esperado visto que esses são as fontes predominantes nas matrizes energéticas desses países. Para o Brasil, entretanto, houve algum aumento da intensidade energética e considerável acréscimo da intensidade carbônica, fato não ocorrido nas outras nações, seguindo novamente a curva de uso de petróleo.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho buscou fazer um estudo das emissões de dióxido de carbono para os países dos BRICS, avaliando a possibilidade de expansão de combustíveis fósseis num contexto em que são avaliados o desenvolvimento e o trilema energético dos países. Para tanto, foram utilizados dados disponíveis no portal da Agência Internacional de Energia e a partir do Relatório de Trilema de Energia, elaborado pelo WEC. A partir de conhecimento empírico, foram feitos estudos da matriz energética, matriz elétrica, população, emissões de CO<sub>2</sub> e PIB. Como resultado, este trabalho apresentou uma análise que envolveu trilema de energia, IDH e matriz energética, avaliação de cada um dos pilares do trilema energético e, por último, Decomposição de Kaya.

Aparentemente não existe um padrão entre desenvolvimento e a matriz energética dos países. O Brasil, por exemplo, que tem alto uso de energia renovável, e conseqüentemente um baixo uso de fontes fósseis, não tem um IDH alto. Entretanto, nações com alto índice de desenvolvimento humano, que para este trabalho foram consideradas as dez primeiras, apresentaram valores variados no uso de fontes renováveis e fósseis.

Por outro lado, países com alto IDH apresentam um sistema de energia mais bem avaliado, representado aqui pela nota do Trilema de Energia, apesar de não terem, indispensavelmente, alta participação de energia renovável. Como foi dito, a avaliação do Trilema de Energia não passa somente pela sustentabilidade ambiental, mas também pela equidade e seguridade energética. Esses dois últimos pilares são bem atendidos pelos países desenvolvidos, pois estão fortemente ligados à política, ao planejamento e à distribuição de renda. Dessa maneira, podemos ver que o uso de fontes mais limpas, de imediato, não tem um impacto muito forte no Trilema de Energia. Até mesmo porque outros indicadores, como intensidade energética, que está relacionada com eficiência e tecnologia, são usados para avaliar a sustentabilidade ambiental.

Pode-se dizer que um aumento no consumo de gás natural não traria grandes prejuízos ambientais, desde que ele seja usado para substituir o carvão, usado principalmente para geração de energia elétrica, especialmente em China, Índia e África do Sul. Entretanto, isso dificilmente ocorrerá em curto ou médio prazo, visto que o carvão é um recurso abundante nesses países.

O Brasil foi o único que aumentou as emissões per capita e por PIB no período analisado, porém, ao mesmo tempo, é o que tem as menores emissões relativas. Além disso, apresenta o melhor indicador de energia renovável. A nota do trilema de energia também mostrou que o país é o mais bem avaliado na média dos três pilares, além de ter a melhor avaliação no quesito ambiental. Nesse momento, vale dizer que as emissões de CO<sub>2</sub>, que impactam na avaliação ambiental, são influenciadas, logicamente, pela matriz energética, mas também pelo desenvolvimento e clima dos países, sendo que este último quesito beneficia o Brasil. Com expectativas de diminuição dos custos do gás natural, um maior uso desse combustível também poderia contribuir para a equidade energética. Além disso, diminuiria o risco de falta de energia elétrica nos períodos de seca pelos quais o Brasil tem passado.

O uso de gás natural por si só não trouxe impacto para a intensidade energética e intensidade de CO<sub>2</sub>. Esses indicadores foram mais influenciados pela diminuição da participação das fontes renováveis na matriz energética e maior consumo absoluto de petróleo. Na verdade, o aumento do consumo de gás natural pode contribuir para diminuição das emissões, uma vez que ele vem substituindo o carvão, recurso considerado mais sujo, como já discutido.

Sendo assim, diante dos indicadores de emissões relativas, matrizes energética, elétrica e Trilema de Energia, é possível uma expansão do uso de gás natural no Brasil, o que poderia contribuir para o desenvolvimento econômico e diminuição dos custos de energia sem grande prejuízo ecológico, que de certa maneira já é um requisito bem atendido no Brasil.

## 6. REFERÊNCIAS

- Almeida Prado, F., Athayde, S., Mossa, J., Bohlman, S., Leite, F., & Oliver-Smith, A. (2016). How much is enough? An integrated examination of energy security, economic growth and climate change related to hydropower expansion in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1132–1136. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.050>
- Andrade, C. E. S. de. (2016). *Avaliação da Emissão de Dióxido de Carbono e do uso de Energia no Ciclo de Vida de Sistemas Metroferroviários de Passageiros: Aplicação na Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro* [Tese de Doutorado]. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Angelo, C., & Rittl, C. (2019). *Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas do Brasil* (p. 33). SEEG. [http://www.observatoriodoclima.eco.br/wp-content/uploads/2019/11/OC\\_SEEG\\_Relatorio\\_2019pdf.pdf](http://www.observatoriodoclima.eco.br/wp-content/uploads/2019/11/OC_SEEG_Relatorio_2019pdf.pdf)
- Asbahi, A. A. M. H. A., Gang, F. Z., Iqbal, W., Abass, Q., Mohsin, M., & Iram, R. (2019). Novel approach of Principal Component Analysis method to assess the national energy performance via Energy Trilemma Index. *Energy Reports*, 5, 704–713. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.06.009>
- Bijos, L., & Guilhon, E. P. (2014). Brics, uma alternativa de poder? *Revista do Direito Público*, 9(1), 9. <https://doi.org/10.5433/1980-511X.2014v9n1p9>
- Bogoviz, A. V., Ragulina, Y. V., Lobova, S. V., & Alekseev, A. N. (2019). A QUANTITATIVE ANALYSIS OF ENERGY SECURITY PERFORMANCE BY BRAZIL, RUSSIA, INDIA, CHINA, AND SOUTH AFRICA IN 1990-2015. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 9(3), 244–250. <https://doi.org/10.32479/ijep.7585>
- Lei nº 14.134, de 8 de abril de 2021, nº 14134 (2021), -. <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.134-de-8-de-abril-de-2021-312904769>
- Bronzatti, F. L., & Neto, A. I. (2008). Matrizes energéticas no Brasil: Cenário 2010-2030. *Anais Eletrônicos do Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 15.
- Brown, M. A., Wang, Y., Sovacool, B. K., & D'Agostino, A. L. (2014). Forty years of energy security trends: A comparative assessment of 22 industrialized countries. *Energy Research & Social Science*, 4, 64–77. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.08.008>
- Campos, A. F., da Silva, N. F., Pereira, M. G., & Vasconcelos Freitas, M. A. (2017). A review of Brazilian natural gas industry: Challenges and strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1207–1216. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.104>
- Cervantes Bravo, R. J., Jimenez Nieves, E., Valqui Ordoñez, B., Canto Espinoza, D., & Hinostroza Cairo, A. (2020). A Sustainable Future Under Energy Intensity Scenarios-Peru's Compliance with COP24 in an Energy Trilemma Environment. *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Virtual. <https://doi.org/10.2118/199131-MS>
- Dai, S., Zhang, M., & Huang, W. (2016). Decomposing the decoupling of CO2 emission from economic growth in BRICS countries. *Natural Hazards*, 84(2), 1055–1073. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2472-0>
- de Castro, N., & Brandão, R. (2021). Causas da crise hídrica no Brasil. *Agência Broadcast Energia*, 3.
- Ebhota, W. S., & Jen, T.-C. (2020). Fossil Fuels Environmental Challenges and the Role of Solar Photovoltaic Technology Advances in Fast Tracking Hybrid Renewable Energy System. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 7(1), 97–117. <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00101-9>
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. (2020). *Demanda de Gás Natural nos Mercados Nacional e Internacional*.
- Feijó, G. D. R., & Rangel, J. J. de A. (2018). Analysis of behaviour in the emissions of carbon dioxide of Brazil and other countries based on the Kaya Identity and the Emission Profile. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 46. <https://doi.org/10.5380/dma.v46i0.55087>
- Fioreze, M., Hedlund, K. F. S., Graepin, C., Silva, T. C. N., Azevedo, F. C. G. de, & Kemerich, P. D. da C. (2013). Gás natural: Potencialidades de utilização no Brasil. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 10(10), 2251–2265. <https://doi.org/10.5902/223611707896>
- Harjanne, A., & Korhonen, J. M. (2019). Abandoning the concept of renewable energy. *Energy Policy*, 127, 330–340. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.029>
- Heffron, R. J., & McCauley, D. (2017). The concept of energy justice across the disciplines. *Energy Policy*, 105, 658–667. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.03.018>

- IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. (2015). *CO2 emissions from fuel combustion 2019—Highlights* (p. 165). IEA. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb3b2e8d-28e0-47fd-a8ba-160f7ed42bc3/CO2\\_Emissions\\_from\\_Fuel\\_Combustion\\_2019\\_Highlights.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb3b2e8d-28e0-47fd-a8ba-160f7ed42bc3/CO2_Emissions_from_Fuel_Combustion_2019_Highlights.pdf)
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. (2015). *Climate change 2014: Mitigation of climate change*. Cambridge University.
- Kaya, Y. (1997). *Environment, energy, and economy: Strategies for sustainability*. Tokyo: United Nations University Press.
- Lima, F., Portugal-Pereira, J., Lucena, A. F. P., Rochedo, P., Cunha, J., Lopes Nunes, M., & Szklo, A. S. (2015). Analysis of energy security and sustainability in future low carbon scenarios for Brazil: Analysis of energy security and sustainability in future low carbon scenarios for Brazil. *Natural Resources Forum*, 39(3–4), 175–190. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12081>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H. O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M., & Waterfield, T. (2018). *IPCC, 2018: Summary for Policymakers*. World Meteorological Organization.
- Pui, K. L., & Othman, J. (2019). The influence of economic, technical, and social aspects on energy-associated CO2 emissions in Malaysia: An extended Kaya identity approach. *Energy*, 181, 468–493. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.168>
- Ripple, W. J., Wolf, C., Newsome, T. M., Barnard, P., & Moomaw, W. R. (2019). World Scientists' Warning of a Climate Emergency. *BioScience*, biz088. <https://doi.org/10.1093/biosci/biz088>
- Setyowati, A. B. (2020). Mitigating Energy Poverty: Mobilizing Climate Finance to Manage the Energy Trilemma in Indonesia. *Sustainability*, 12(4), 1603. <https://doi.org/10.3390/su12041603>
- Siegel, S. (1975). *Estatística não-paramétrica: Para as ciências do comportamento*. McGraw-Hill do Brasil.
- Šprajc, P., Bjegović, M., & Vasić, B. (2019). Energy security in decision making and governance—Methodological analysis of energy trilemma index. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109341. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109341>
- Su, W., Wang, Y., Streimikiene, D., Balezentis, T., & Zhang, C. (2020). Carbon dioxide emission decomposition along the gradient of economic development: The case of energy sustainability in the G7 and Brazil, Russia, India, China and South Africa. *Sustainable Development*, 28(4), 657–669. <https://doi.org/10.1002/sd.2016>
- Tarko, A., Kurbatova, A., & Llerena, S. (2019). Effect of CO<sub>2</sub> increase on ecological parameters of plant ecosystems of Central and South America countries. *E3S Web of Conferences*, 116, 00090. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911600090>
- Vieira, E. P. L., Garcia, E. C. B., Torres, D. E. A., Osvaldo, D., & Guimarães, M. H. (2005). Benefícios Ambientais do Gás Natural no Estado da Bahia. *Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás*, 6.
- WEC - World Energy Council. (2018). *World Energy Trilemma Index 2018*. WEC.
- WEC - World Energy Council. (2022). *Energy Trilemma Index*. Energy Trilemma Index. <https://trilemma.worldenergy.org/#!/energy-index>
- Yang, P., Liang, X., & Drohan, P. J. (2020). Using Kaya and LMDI models to analyze carbon emissions from the energy consumption in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(21), 26495–26501. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09075-7>

**DECLARATION OF CONTRIBUTIONS TO THE ARTICLE - CRediT**

ROLE	TSoares	JRangel
Conceptualization – Ideas; formulation or evolution of overarching research goals and aims.		X
Data curation – Management activities to annotate (produce metadata), scrub data and maintain research data (including software code, where it is necessary for interpreting the data itself) for initial use and later re-use.	X	
Formal analysis – Application of statistical, mathematical, computational, or other formal techniques to analyze or synthesize study data.	X	
Funding acquisition - Acquisition of the financial support for the project leading to this publication.		
Investigation – Conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data/evidence collection.	X	
Methodology – Development or design of methodology; creation of models.		X
Project administration – Management and coordination responsibility for the research activity planning and execution.		X
Resources – Provision of study materials, reagents, materials, patients, laboratory samples, animals, instrumentation, computing resources, or other analysis tools.		X
Software – Programming, software development; designing computer programs; implementation of the computer code and supporting algorithms; testing of existing code components.	X	
Supervision – Oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team.		X
Validation – Verification, whether as a part of the activity or separate, of the overall replication/reproducibility of results/experiments and other research outputs.		X
Visualization – Preparation, creation and/or presentation of the published work, specifically visualization/data presentation.	X	
Writing – original draft – Preparation, creation and/or presentation of the published work, specifically writing the initial draft (including substantive translation).	X	
Writing – review & editing – Preparation, creation and/or presentation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision – including pre- or post-publication stages.		X