

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA  
E TECNOLOGIA FLUMINENSE**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS APLICADOS À  
ENGENHARIA E GESTÃO**

**Tiago Ribeiro Espíndola Soares**

**CRESCIMENTO DO USO DE GÁS NATURAL E O IMPACTO NAS EMISSÕES DE  
DIÓXIDO DE CARBONO - O BRASIL NO CONTEXTO DOS BRICS**

**Campos dos Goytacazes/RJ**

**2021**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA  
E TECNOLOGIA FLUMINENSE**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS APLICADOS À  
ENGENHARIA E GESTÃO**

Tiago Ribeiro Espíndola Soares

**CRESCIMENTO DO USO DE GÁS NATURAL E O IMPACTO NAS EMISSÕES DE  
DIÓXIDO DE CARBONO - O BRASIL NO CONTEXTO DOS BRICS**

João José de Assis Rangel  
(Orientador)

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, no Curso de Mestrado Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão (MPSAEG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão.

Campos dos Goytacazes/RJ

2021

Biblioteca Anton Dakitsch  
CIP - Catalogação na Publicação

S676c Soares, Tiago Ribeiro Espíndola  
Crescimento do uso de gás natural e o impacto nas emissões de dióxido de carbono - o Brasil no contexto dos BRICS / Tiago Ribeiro Espíndola Soares - 2021.  
64 f.: il. color.

Orientador: João José de Assis Rangel

Dissertação (mestrado) -- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Campus Campos Centro, Curso de Mestrado Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão, Campos dos Goytacazes, RJ, 2021.

Referências: f. 56 a 64.

1. Gás Natural. 2. Emissões de CO<sub>2</sub>. 3. Trilema de Energia. 4. Decomposição de Kaya. I. Rangel, João José de Assis, orient. II. Título.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA  
E TECNOLOGIA FLUMINENSE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS APLICADOS À  
ENGENHARIA E GESTÃO

Tiago Ribeiro Espíndola Soares

CRESCIMENTO DO USO DE GÁS NATURAL E O IMPACTO NAS EMISSÕES DE  
DIÓXIDO DE CARBONO - O BRASIL NO CONTEXTO DOS BRICS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, no Curso de Mestrado Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão (MPSAEG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão.

Aprovado em 14 de dezembro de 2021

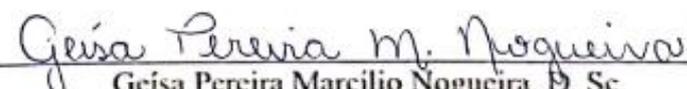
Banca Examinadora:

  
João José de Assis Rangel, D. Sc.  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense - IFF  
(Orientador)

**Henrique Rego**  
**Monteiro da Hora:**  
**01857552750**

Assinado digitalmente por Henrique Rego Monteiro da  
Hora:01857552750  
DN: CN=Henrique Rego Monteiro da Hora,  
01857552750, OU=IFF - Instituto Federal Fluminense,  
O=ICPEdu, C=BR  
Razão: Eu estou aprovando este documento  
Localização: Campos dos Goytacazes  
Data: 2022.03.17 15:24:52-03'00'  
Foxit PDF Reader Versão: 11.2.1

Henrique Rego Monteiro da Hora, D. Sc.  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense - IFF

  
Geisa Pereira Marcilio Nogueira, D. Sc.  
Universidade Candido Mendes - UCAM

Dedico este trabalho à minha esposa Maria Clara

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente com essa pesquisa, professores do SAEG, meu orientador, professor João Rangel, colegas do mestrado, em especial Hugo Machado. E por último e mais importante, minha esposa, Maria Clara.

## RESUMO

Este trabalho analisa as emissões de CO<sub>2</sub> e o aumento de consumo de gás natural no Brasil, num contexto que estuda o Trilema de Energia (seguridade energética, equidade energética e sustentabilidade ambiental) e desenvolvimento dos países dos BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul). Muito tem se discutido a respeito das mudanças climáticas provocadas pelas emissões de gases do efeito estufa. Entretanto, um sistema ideal não deve apenas ser sustentável ambientalmente, mas também garantir o suprimento de energia e ser viável economicamente para toda população. A abordagem do Trilema de Energia avalia esses três pilares, atribuindo uma nota a cada país e estabelecendo um ranque. Nesse mesmo enfoque, pesquisas mostram que o gás natural é uma alternativa para o problema da mudança climática, tornando-se um combustível de transição enquanto são desenvolvidas tecnologias de baixos custo e impacto ambiental. A partir de dados disponíveis no portal da Agência Internacional de Energia e Relatório de Trilema de Energia, foram feitos estudos da matriz energética, elétrica, população, emissões, Produto Interno Bruto (PIB) e Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), para o período de 1990 a 2019. Os resultados mostram que os BRICS, países em desenvolvimento, tiveram aumento das emissões de CO<sub>2</sub>, enquanto países desenvolvidos têm conseguido diminuir o lançamento de gases na atmosfera. Não foi observado um padrão entre desenvolvimento e participação de energia renovável nas matrizes energéticas. Porém, países com alto IDH apresentam um sistema mais bem avaliado no Trilema de Energia. Houve aumento no consumo de gás natural no Brasil e no mundo, e no mesmo período, foi observada uma 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. Além disso, o país ainda tem os melhores indicadores ambientais, com maior uso de fontes energéticas renováveis e mais bem avaliado no Trilema de Energia dentre os BRICS. Sendo assim, o Brasil pode optar em expandir o uso deste recurso.

**Palavras-chave:** Gás Natural, Emissões de CO<sub>2</sub>, Trilema de Energia, Decomposição de Kaya.

## ABSTRACT

This work analyzes CO<sub>2</sub> emissions and the increase of natural gas consumption in Brazil, in a context that studies the Energy Trilemma and Development of BRICS countries (Brazil, Russia, India, China and South Africa). Much has been discussed about climate change caused by greenhouse gas emissions. However, an ideal system must not only be environmentally sustainable, but also ensure energy supply and be economically available to the entire population. The Energy Trilemma approach evaluates these three pillars, assigning a score to each country and establishing a rank. In this same focus, researches show that natural gas is an alternative to the problem of climate change, becoming a transitional fuel while low cost and environmental impact technologies are developed. Based on data available on the International Energy Agency portal and the Energy Trilemma Report, studies were carried out on the energy matrix, electric, population, emissions, Gross Domestic Product (GDP) and Human Development Index (HDI) for the period. from 1990 to 2019. The results show that the BRICS, developing countries, had an increase in CO<sub>2</sub> emissions, while developed countries have managed to reduce the release of gases into the atmosphere. A standard was not observed between the development and participation of renewable energy in the energy matrices. However, countries with a high HDI have a system better evaluated in the Energy Trilemma. There was an increase in the consumption of natural gas in Brazil and in the world, and in the same period, there was a deterioration in Brazil per capita emissions, energy and carbon intensity. Nevertheless, this change is not related to the growth in natural gas consumption. In addition, the country still has the best environmental indicators, with greater use of renewable sources and the best evaluated in the Energy Trilemma among the BRICS. Therefore, Brazil may choose to expand the use of this resource.

**Keywords:** Natural Gas, CO<sub>2</sub> Emissions, Energy Trilemma, Kaya Decomposition.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Emissões de CO <sub>2</sub> por população .....	32
Figura 2. Relação de emissões per capita com CO <sub>2</sub> /PIB .....	34
Figura 3. Participação das fontes fósseis, renováveis e nuclear na matriz energética.....	36
Figura 4. Matriz energética.....	37
Figura 5. Participação dos combustíveis fósseis em relação ao total dessa fonte .....	39
Figura 6. Variação de PIB, energia primária e CO <sub>2</sub> para os BRICS .....	41
Figura 7. CO <sub>2</sub> /energia primária para os combustíveis fósseis .....	43
Figura 8. Matriz elétrica dos países dos BRICS, OCDE e Mundo.....	46
Figura 9. Decomposição de Kaya para os BRICS, OCDE e Mundo.....	48
Figura 10. Relação da posição no ranque do Trilema de Energia com participação de fontes renováveis, fósseis e IDH. ....	50
Figura 11. Nota dos pilares do Trilema de Energia para os BRICS .....	53

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Produções originadas neste trabalho .....	56
---	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Emissões per capita dos BRICS e OCDE.....	32
Tabela 2. Comparativo da participação do PIB, emissões de CO <sub>2</sub> e população para 2019.....	34
Tabela 3. Cálculo de coeficiente de correlação $\rho$ .....	51

## LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

AUT – Áustria

BRA – Brasil

CHE – Suíça

CHN – China

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

DNK – Dinamarca

FIN – Finlândia

FRA – França

GBR – Reino Unido

GEE – Gases de Efeito Estufa

IDH – Índice de Desenvolvimento Humano

IEA – *International Energy Agency*

IND – Índia

LUX – Luxemburgo

NOR – Noruega

NZL – Nova Zelândia

OCDE – Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico

PIB – Produto Interno Bruto

RUS – Rússia

SWE – Suécia

WEC – *World Energy Council*

ZAF – África do Sul

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Contextualização .....	15
1.2 Objetivos.....	17
1.2.1 Objetivo Geral .....	17
1.2.2 Objetivos Específicos .....	17
1.3 Justificativa.....	17
1.4 Delimitações e Estrutura do Trabalho .....	18
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	19
2.1 Referencial Teórico .....	19
2.1.1 Trilema de Energia .....	19
2.1.2 Decomposição de Kaya .....	21
2.2 Gás Natural no Brasil .....	22
2.3 Estado da Arte .....	25
2.4 Conclusão da Revisão de Literatura .....	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1 Descrição do Conjunto de Países Selecionados .....	28
3.2 Base de Dados .....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	30
4.1 Emissões de CO <sub>2</sub> x População.....	30
4.2 Análise CO <sub>2</sub> /PIB x CO <sub>2</sub> /Cap .....	32
4.3 Análise da Matriz Energética .....	34
4.4 Histórico da Participação dos Combustíveis Fósseis nas Matrizes dos BRICS .....	38
4.5 Variação Percentual de energia primária, PIB e CO <sub>2</sub> .....	40
4.6 Relação CO <sub>2</sub> /Energia Primária .....	42
4.7 Análise da Matriz Elétrica .....	44
4.8 Análise da Decomposição de Kaya .....	46
4.9 Trilema de Energia, IDH e Energia Renovável.....	49
4.10 Avaliação dos Pilares do Trilema de Energia.....	52
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	54
5.1 Conclusões.....	54
5.2 Limitações do Trabalho .....	55
5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros .....	56

5.4 Produções Originadas neste Trabalho .....	56
REFERÊNCIAS .....	56

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

No ano de 2021, foi aprovada a Lei nº 14.134, chamada de Nova Lei do Gás. Esta lei visa implementar um novo regime, criando um segundo mercado de gás, onde os compradores primários podem vender o gás não utilizado. Desta maneira, pretende-se estabelecer um livre acesso à rede, para aumentar a eficiência e o consumo, além de baratear os custos (BRASIL, 2021). Mesmo no regime atual, o uso de gás natural já vem crescendo ano após ano. Por exemplo, em 1990, o gás natural ocupava 2,35% da matriz energética brasileira, chegando a 10,80%, em 2018. Porém, o consumo nacional ainda fica abaixo de países comparáveis como Estados Unidos, México e Argentina. No cenário mundial, esse combustível representava 18,96% de toda energia primária, em 1990, alcançando 23,35%, em 2018, o que pode indicar uma possibilidade de expansão desse mercado energético no Brasil (ANP, 2020; IEA, 2021).

Todavia, um acréscimo no uso do gás natural ainda é uma preocupação ambiental por ser um combustível fóssil. Com isso, quando comparado a outros países e à média mundial, o Brasil apresenta baixas emissões de poluentes tanto em números absolutos quanto em termos relativos à população. No entanto, o País tem aumentado suas emissões totais bem como a intensidade de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), podendo perder sua posição de matriz energética diversificada e relativamente limpa. Em contrapartida, outros países como a China e os Estados Unidos, que ainda têm altíssimas emissões, têm conseguido diminuir esse indicador (FEIJÓ; RANGEL, 2018).

O aumento das emissões de gases do efeito estufa (GEE) têm provocado mudanças climáticas irreversíveis nos ecossistemas do planeta, sendo um dos principais problemas enfrentados pela humanidade. A ação humana, pelo lançamento na atmosfera de CO<sub>2</sub>, dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), óxido nitroso (NO<sub>x</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), entre outros gases, tem provocado o aumento do efeito estufa e conseqüentemente o aquecimento global (RIPPLE *et al.*, 2019). O crescimento da atividade econômica, o uso de combustíveis fósseis e o desmatamento são alguns dos fatores que têm causado o aumento da concentração de poluentes (IPCC, 2015), sendo o setor de energia um dos principais responsáveis pelas emissões de GEE (IEA, 2019)

O Acordo de Paris de 2015 traçou metas que cada país deve alcançar individualmente, em relação à eficiência energética, energias renováveis e redução das emissões, para que o aumento da temperatura global fique abaixo dos 2° C (ARANGO-ARAMBURO; RÍOS-OCAMPO; LARSEN,

2020). Entretanto, no ano de 2019, as emissões de CO<sub>2</sub> continuaram crescendo e foram a maior de todos os anos (IEA, 2019).

Em função do crescente aumento das emissões de gases na atmosfera, diversos estudos têm sido conduzidos para avaliar essa questão. Uma das metodologias empregadas na literatura para se estudar as emissões de CO<sub>2</sub> é a Decomposição ou Identidade de Kaya. Esse método carrega o conceito de que as emissões de CO<sub>2</sub> são influenciadas pelo crescimento econômico, populacional e de energia primária, além de relações com economia e política. Sendo possível analisar graficamente o caminho percorrido e a tendência em relação ao lançamento de poluentes na atmosfera (PUI; OTHMAN, 2019).

No contexto em que se busca diminuir as emissões de GEE sem prejudicar o fornecimento de energia e seus custos, o Conselho Mundial de Energia divulga anualmente um relatório chamado de Índice Mundial do Trilema de Energia (em inglês: *World Energy Trilemma Index* (ETI)). O documento avalia a capacidade do país de fornecer energia ecologicamente correta, acessível e atendendo à demanda interna. O referido relatório apresenta um ranque onde é possível comparar a situação de cada país. O mesmo é construído a partir das notas calculadas para cada um dos três pilares, além de considerar o contexto de cada país (WEC, 2018).

Diante da necessidade de diminuir as emissões de GEE, 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). Isso porque dentre as fontes fósseis, o gás natural é considerado mais limpo que o carvão e o petróleo, por ser menos intensivo em carbono. Assim, o gás natural se torna um importante combustível de transição, até que se desenvolvam alternativas tecnológicas de baixo custo e impacto ambiental (VIEIRA *et al.*, 2004). No Brasil, país que usa majoritariamente hidroenergia para geração de eletricidade, este combustível não teve grande relevância até 1990, já que ainda não haviam sido descobertas as grandes reservas desse combustível e pela grande oferta de hidroeletricidade. Esse recurso adquiriu maior importância pelo aumento da demanda energética e pela descoberta da camada do pré-sal, onde se encontram grandes reservas dessa fonte energética (BRONZATTI; NETO, 2008; FIOREZE *et al.*, 2013).

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 Produto Interno Bruto (PIB) e na população (BIJOS; GUILHON, 2014). Assim, o Brasil é comparável aos países do grupo.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem o objetivo de analisar o crescimento do uso de gás natural na matriz energética brasileira e o respectivo impacto nas emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera, a partir do contexto do grupo de países dos BRICS.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Analisar a relação entre a utilização de gás natural e as emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil entre os anos de 1990 e 2019;
- Avaliar as correlações entre os diferentes países dos BRICS com base no ranque do Trilema de Energia e seus respectivos estágios de desenvolvimento;
- Avaliar as correlações entre os diferentes países dos BRICS com base no ranque do Trilema de Energia e a utilização de combustíveis fósseis e renováveis; e
- Demonstrar que o emprego conjunto das metodologias de Identidade de Kaya e Trilema de Energia podem auxiliar na compreensão de questões energéticas e ambientais.

## **1.3 Justificativa**

O Brasil vem apresentando crescimento no consumo de gás natural, com aumento da participação desse recurso na sua matriz energética. Entretanto, seu uso ainda é baixo, tanto em termos absolutos como relativos à população. As nações da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) apresentam maior consumo de gás natural, como também países como Estados Unidos e México, com população comparável à do Brasil. A Argentina também possui maior consumo de gás natural, além de ser um fornecedor. No entanto, recentemente foi aprovada uma lei que busca modernizar o mercado de gás natural brasileiro, prometendo aumentar os investimentos no setor e o uso desse combustível. Somado a isso, as descobertas de grandes reservas no pré-sal brasileiro elevam as expectativas de crescimento e mostram todo o potencial desse mercado.

Entretanto, sendo uma fonte fóssil, um maior consumo de gás natural resultaria em maiores emissões de GEE, principalmente o CO<sub>2</sub>, agravando as mudanças climáticas já em curso. A maioria dos países é dependente das fontes de combustíveis fósseis. Com isso, o petróleo, o gás natural e o carvão ocupam grande parte da matriz energética mundial. Esses combustíveis têm como vantagem o baixo custo e alta confiabilidade. Por outro lado, as fontes renováveis em certas ocasiões ainda não são viáveis economicamente e ainda apresentam o problema da intermitência. Ou seja, nem sempre é possível atender aos três pilares energéticos, seguridade, equidade e sustentabilidade ambiental, para obter um sistema sustentável. Ao mesmo tempo o gás natural tem se mostrado uma opção viável para uma transição energética, onde ele seria utilizado até que se desenvolvam tecnologias que solucionem os pontos fracos das energias limpas. É o mais limpo dentre os combustíveis fósseis, mais eficiente, emitindo menos CO<sub>2</sub> para uma mesma energia liberada. Poderia substituir o carvão usado em termelétricas, por exemplo (VIEIRA *et al.*, 2005).

Uma última questão é que não foram encontradas pesquisas que busquem conjuntamente melhorar os indicadores de emissão de CO<sub>2</sub>, levando em consideração os desafios do trilema de energia onde se deve garantir além da sustentabilidade ambiental, equidade energética e seguridade energética. Desse modo, é interessante analisar o crescimento do gás natural usando indicadores como Identidade de Kaya e a nota do Trilema de Energia. Ainda no aspecto comparativo, avaliar o Brasil no grupo de países dos BRICS é razoável, diante das semelhanças existentes entre eles. O baixo número de publicações e sobre o tema abordado como também o fato de todas os trabalhos serem recentes justificam o estudo do assunto, evidenciando sua importância, relevância e contemporaneidade.

#### **1.4 Delimitações e Estrutura do Trabalho**

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. No capítulo um, apresenta-se a introdução, com contextualização, objetivo geral e específicos, justificativa e questões de pesquisa. No capítulo dois, a revisão de literatura, contém o referencial teórico, discorrendo sobre o trilema de energia, a decomposição de Kaya e o gás natural no Brasil. Além disso, bibliometria e um item tratando do estado da arte, com resultados dos principais trabalhos encontrados na etapa anterior. Por fim, a conclusão da revisão de literatura.

No terceiro capítulo, apresenta-se a metodologia empregada, com a descrição dos países escolhidos para o estudo e as bases de dados utilizadas. No capítulo quatro, são apresentados e

discutidos os resultados. Por último, no capítulo cinco, nas considerações finais, têm-se as conclusões, limitações do trabalho, sugestões para estudos futuros e as produções originadas desta dissertação.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Referencial Teórico**

Esta seção apresenta uma descrição dos conceitos base para a pesquisa: Trilema de Energia e Decomposição de Kaya. Os métodos foram escolhidos para se poder avaliar a situação de cada país frente às questões ambientais, econômicas e de demanda e comparar com os indicadores obtidos através do método de Kaya.

#### **2.1.1 Trilema de Energia**

O Trilema de Energia é um conceito criado pelo Conselho Mundial de Energia (WEC - *World Energy Council*), que considera a sustentabilidade energética definida sob três aspectos: segurança energética, equidade energética e sustentabilidade ambiental. 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 for possível garantir equidade e segurança energética, não é possível falar em sustentabilidade. Sendo assim, um sistema de energia ideal não deve apenas ser ecologicamente correto, mas deve 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; WEC, 2018)

O conselho divulga anualmente um relatório, chamado de Índice Mundial do Trilema de Energia (ETI - *World Energy Trilemma Index*), atribuindo uma nota para cada nação, estabelecendo um ranque comparativo do sistema de energia de 125 países. O documento avalia a capacidade do país de fornecer energia sustentável ecologicamente, com segurança e acessibilidade, e é usado como ferramenta de suporte para tomada de decisão envolvendo política energética (HEFFRON; MCCAULEY; DE RUBENS, 2018; WEC, 2018).

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 a população e está relacionada à parte econômica da nação. Muitas pessoas não têm acesso à energia moderna, confiável e sustentável, o que interfere na sua qualidade de vida, configurando assim uma população com pobreza energética (SETYOWATI, 2020). O mundo tem 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), onde a energia solar fotovoltaica é uma opção (EBHOTA; JEN, 2018).

Não existe uma definição única para o conceito de seguridade energética, porém, segundo WEC (2020), ela mede a capacidade do país de atender à demanda de energia atual e futura e responder adequadamente aos choques e interrupções no fornecimento. É muito dependente do contexto e da abordagem adotada por cada país no que se refere às estratégias de energia. Ela aparece no topo da lista de prioridades das nações, desenvolvidos ou não. É uma questão de segurança nacional e afeta as relações externas tendo impacto no cenário geopolítico mundial. Historicamente o conceito foi associado ao suprimento de petróleo, porém, hoje também está ligado ao abastecimento de gás natural e eletricidade (FUENTES *et al.*, 2020).

De uma maneira geral, a seguridade energética diz respeito ao gerenciamento do suprimento de energia primária, seja ela de fontes internas ou externas, garantindo oferta para suprir a demanda atual e futura (ŠPRAJC; BJEGOVIĆ; VASIĆ, 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 energia é um recurso essencial para toda atividade econômica. Definir um padrão de segurança para o suprimento de energia é uma tarefa difícil para os governantes. Existe o risco de um gasto excessivo de recursos naturais e econômicos de um lado, e risco de falta de energia no outro, podendo gerar grandes crises políticas e econômicas.

Brown *et al.* (2014) definem a segurança energética como o fornecimento de energia confiável, igualitária e ecologicamente correta. 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 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 CO<sub>2</sub>, como resultado de ações de mudança de uso da terra, principalmente o desmatamento (TARKO; KURBATOVA; LLERENA, 2019). No Brasil, em 2018, 44% das emissões de CO<sub>2</sub> equivalente foram por mudança de uso da terra (ANGELO; RITTL, 2019).

A meta de diminuir a emissão de GEE também está ligada ao setor de energia, por emitir dois terços dos GEE e 80% do CO<sub>2</sub> mundial. A emissão de CO<sub>2</sub> pela queima de combustíveis fósseis é o maior contribuinte para aumento do efeito estufa. Porém, em 2018, o mundo aumentou a emissão de gás, tendo a maior de todos os tempos, sustentada pelo crescimento econômico (IEA, 2019). Uma mudança tecnológica pode ser o principal fator de compensação a longo prazo (HENRIQUES; BOROWIECKI, 2017).

### **2.1.2 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; ZHANG; HUANG, 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. 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 a emissão de CO<sub>2</sub>, e qual variável tem maior influência no CO<sub>2</sub> (KAYA, 1997; YANG; LIANG; DROHAN, 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)

P: população

PIB: produto interno bruto (US\$)

E: energia primária (ktep)

Os principais indicadores gerados com a Decomposição de Kaya são PIB per capita, intensidade energética (energia primária/PIB) E intensidade de CO<sub>2</sub> ou intensidade carbônica (emissões de CO<sub>2</sub>/energia primária). Comumente também são analisados os números da população, da energia primária e emissões de CO<sub>2</sub> e do PIB.

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 proveniente de carbono e grande participação de atividades de alto uso energético na economia. A literatura recente indica que Pesquisa e Desenvolvimento, 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 a intensidade energética continuam sendo os fatores mais importantes (PUI; OTHMAN, 2019).

## 2.2 Gás Natural no Brasil

No ano de 2019, o Brasil tinha 364 bilhões de m<sup>3</sup> de reservas provadas, aquelas viáveis economicamente, 549 bilhões de m<sup>3</sup> de reservas totais de gás natural, e teve uma produção de 25,8

bilhões de m<sup>3</sup>. O consumo foi 35,8 bilhões de m<sup>3</sup>, sendo que 9,9 milhões de m<sup>3</sup> (27,7% do total) foram importados. O principal país de origem foi a Bolívia, que vendeu 6,8 milhões de m<sup>3</sup> para o Brasil (68,7% do total). O consumo de gás natural brasileiro está abaixo de países comparáveis como os Estados Unidos (846,6 bilhões de m<sup>3</sup>), o México (90,7 bilhões de m<sup>3</sup>) e a Argentina (47,5 bilhões de m<sup>3</sup>) (ANP, 2020).

O sistema de transporte de gás na América Latina é considerado pouco integrado. A rede brasileira possui 11,7 mil km (9,5 mil km para transporte e 2,2 mil km para transferência), percorrendo principalmente o litoral do país, com destaque também para o gasoduto Brasil Bolívia, o GASBOL. Para efeito e comparação, a companhia *TransCanada* opera uma rede de dutos de 91,9 mil km entre os Estados Unidos e o Canadá (ANP, 2020; LEAL; REGO; DE OLIVEIRA RIBEIRO, 2019).

Apesar das boas reservas brasileiras, principalmente no pré-sal, o setor de gás nacional é pouco desenvolvido. Diferentemente do que ocorre na Europa e nos Estados Unidos, no Brasil não há demanda de gás para aquecimento, sendo usado, então na indústria e termelétricas. Entretanto, o crescimento do setor não acompanha o consumo de energia elétrica, sendo dependente da demanda da indústria (MATHIAS; SZKLO, 2007).

O consumo de gás natural vem crescendo ao longo dos anos tanto em termos absolutos como relativos. A participação desse combustível na matriz energética era de 2,35% em 1990 passando para 10,63% em 2016. Porém, esse percentual ainda é baixo se comparado com o grupo de países da OCDE (29,95% de participação) e mundo (22,06%) (RANGEL *et al.*, 2019).

Devido às restrições impostas pela pandemia da Covid-19, é prevista, para 2020, uma diminuição de 6% no consumo de energia mundial quando comparado a 2019, a maior queda em 70 anos. Os números apontam para um decréscimo de 8% para o carvão, 9% petróleo, enquanto para as energias renováveis espera-se crescimento de 1%. O consumo de gás natural já vinha caindo antes da crise do novo coronavírus, por causa das temperaturas mais altas no hemisfério norte, e deve apresentar uma queda de 5%, principalmente pela menor demanda para aquecimento residencial e comercial (IEA, 2020).

O Brasil poderia usar este recurso num processo de transição para uma matriz de energia elétrica de baixo carbono, substituindo as termelétricas a carvão e petróleo por gás natural. Dentre as fontes energéticas fósseis, o gás natural é considerado mais limpo por ser menos intensivo em carbono. Com a mesma liberação de energia, emite até 30% menos CO<sub>2</sub> que a queima de óleo

diesel e praticamente não libera particulados de SO<sub>2</sub>. Assim, o gás natural se torna um importante combustível de transição, até que se desenvolvam alternativas tecnológicas de baixo impacto ambiental (VIEIRA *et al.*, 2004).

Campos *et al.* (2017) apresentam as principais estratégias em curso para a expansão da indústria de gás no Brasil, como expansão da oferta através da produção do pré-sal e dutos internacionais, aumento da malha de dutos de transporte, e incentivo do uso desse recurso na geração de energia elétrica. Nesse sentido, 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.

As usinas termelétricas aumentaram sua potência gerada de 25 MW em 2006 para 43 MW em 2017, tendo o gás natural uma participação de 30% (ONS, 2018). Depois do setor industrial, a geração termoelétrica é o segmento que mais utiliza esse 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).

Todavia, apesar dos avanços recentes, se faz necessária uma melhoria na legislação para atrair investimentos e aprimorar a rede de gás. Nesse contexto, foi aprovada a Lei nº 14.134/2021 (inicialmente nº 6.407/2013 na Câmara dos Deputados), chamado de Nova Lei do Gás ou Marco Regulatório de Gás, para mudar o regime de outorga, buscando um mercado mais aberto e competitivo. O projeto altera a Lei nº 11.909 de 2009 desverticalizando o segmento de transporte de gás natural, implementando o livre acesso à rede, aumentando o número de usuários, o volume transportado e a eficiência econômica. Pretende-se criar um mercado secundário de gás para atender àqueles que desejam comprar o produto já contratado e que não está sendo consumido pelo comprador primário. Além da adoção de incentivos fiscais, o projeto prevê a criação do Operador do Sistema Nacional de Transporte de Gás Natural (ONGÁS), para coordenar e controlar a operação da movimentação de gás natural (BRASIL, 2013, 2021; LEAL; REGO; DE OLIVEIRA RIBEIRO, 2019).

### 2.3 Estado da Arte

Nessa sessão são apresentados os principais trabalhos encontrados na revisão bibliográfica, além de outros julgados importantes, com o intuito de mostrar o estado em que esta área de pesquisa se encontra para estabelecer uma oportunidade de pesquisa e evidenciar sua relevância.

A dificuldade para se alcançar uma boa avaliação nos três principais critérios do trilema de energia é evidenciada em estudo realizado por Asbahi *et al.* (2019). Os autores concluem que a segurança energética está negativamente correlacionada com a sustentabilidade ambiental, e mesmo para os países do topo do ranque, há discrepâncias entre as notas dos três pilares. Para (WEISS *et al.*, 2021), equilibrar as três áreas do trilema de energia é um desafio.

Entretanto, Šprajc; Bjegović e Vasić (2019) criticam a metodologia de cálculo para a nota do trilema de energia e não recomendam que o relatório seja usado para orientação de política energética, questionando sua confiabilidade. Os autores relatam que três pilares não têm peso igual na nota final e sugerem que o contexto de cada país usado para cálculo deveria ser incluído no relatório.

Segundo Ebhota e Tabakov (2018) e Shen *et al.* (2019), os desafios para alcançar a equidade energética são maiores nos países em desenvolvimento. Com a expansão das cidades, crescimento populacional e êxodo rural, os sistemas de energia têm enfrentado problemas, especialmente para atender ao aumento exponencial à demanda de energia elétrica. Cervantes Bravo *et al.* (2020) dizem que o acesso a esse tipo de energia é a chave para medir a equidade energética.

Gent e Tomei (2017) exemplificam a falta de uma política voltada para a segurança energética. Até os anos 2000, os países da América Central produziam energia elétrica a partir de hidroelétricas, quando, após as privatizações do setor, passaram a usar fontes fósseis importadas. Durante a alta do preço do petróleo nos anos seguintes, esses países passaram por racionamento de energia. Zafeiratou e Spataru (2018) mostram os desafios energéticos enfrentados por mais de 100 ilhas ao redor do mundo. As ilhas não conectadas eletricamente com o continente dependem, principalmente, de diesel e óleo combustível para geração de energia elétrica. Para que a demanda não seja prejudicada, tem-se como resultado impactos ambientais e problemas econômicos.

Orthofer; Huppmann, Krey (2019) concluem que para se resolver o trilema de energia na África do Sul, o gás de xisto é uma alternativa para substituir o carvão e até mesmo fontes de baixo carbono, desde que o custo seja baixo. Segundo Weiss *et al.* (2021), manter as usinas nucleares atenderia o problema ambiental e com menores custos aos consumidores da Suíça.

Outros autores têm usado o conceito de trilema de energia, com outras metodologias, para encontrar alternativas para uma matriz energética mais sustentável. Buscando uma economia de baixo carbono, Ali Shah *et al.* (2021) utilizaram o Trilema de Energia para escolha de uma opção de energia a partir de resíduo (*WtE – waste-to-energy*) para o Paquistão. Os autores concluíram que a tecnologia de gaseificação é a melhor para garantir acesso à energia moderna, limpa, acessível e sustentável.

Mohammed; Alhawsawi, Soliman (2020) concluíram que, para que a Arábia Saudita suba no ranque do trilema de energia, os principais fatores a serem considerados são o mix de geração de eletricidade, emissões de CO<sub>2</sub>, intensidade energética e armazenamento de energia.

Em uma pesquisa a nível municipal para a cidade de Xiamen, China, Jing *et al.* (2021), utilizaram o conceito de trilema de energia, a fim de buscarem uma transição energética para um sistema elétrico mais equilibrado. Os autores concluíram que é necessário um aumento de 3,9% nos custos para um mix mais diversificado, e aumento de 26,8% para um caminho de menos emissões.

Com o auxílio do trilema de energia para revisão no plano de desenvolvimento de eletricidade de Maluku Utara, província da Indonésia, Syafrianto *et al.* (2020) concluem que é necessária a instalação de uma usina geotérmica para diminuir o uso de diesel. Com o aumento da demanda por energia elétrica, é necessária uma diversificação para evitar aumento de custos e de emissão de CO<sub>2</sub>.

Ao estudar as relações dos pilares do trilema de energia com crescimento econômico e emissões, Fu *et al.* (2021) sugerem um pagamento para empresas que emitirem menos carbono, de modo a maximizar seus lucros para equilibrar o tripé energético.

No entanto, para se alcançar o objetivo de diminuição das emissões de CO<sub>2</sub>, as ações necessárias podem variar entre os países. Um estudo realizado por Jing e Guan (2016), mostra um crescimento das emissões de CO<sub>2</sub> no período de 1995 a 2009 e as diferenças entre os países desenvolvidos e em desenvolvimento. Enquanto no primeiro grupo houve acréscimo do uso de gás natural e menor crescimento de emissão de CO<sub>2</sub>, no segundo ocorreu aumento no uso de carvão, especialmente na China. O trabalho também destaca a alta emissão per capita dos Estados Unidos. Lima *et al.* (2015) concluíram que Brasil e Portugal precisam focar em melhoria da eficiência energética, enquanto China e Reino Unido devem aumentar sua participação de fontes renováveis na matriz energética.

Cervantes-Bravo *et al.* (2017), mostraram por meio de um estudo de caso aplicado na Argentina que o uso do gás natural, apesar de ser um combustível fóssil, é uma opção, especialmente para países com alto uso de petróleo, para diminuir as emissões de CO<sub>2</sub>. Sendo usado como combustível de transição e com o aumento da eficiência energética, é possível diminuir o índice de poluentes na atmosfera. Porém, os autores afirmam que é necessário aumentar a eficiência energética e mudar a matriz energética, sem prejudicar a seguridade, para alcançar as metas de redução de emissões de CO<sub>2</sub>.

Não foram encontrados trabalhos que abordem o Trilema de energia com o Identidade de Kaya. No entanto, utilizando o método da Decomposição de Kaya, diversos estudos apontam para o gás natural como alternativa para frear a mudança climática.

Em estudo envolvendo os 47 países da África Subsaariana, Lin e Agyeman (2020) apontam que até o ano de 2030 é possível implementar uma política energética de baixo carbono, propondo melhoria na eficiência energética, uso de gás natural e energias renováveis. Em trabalho envolvendo a província de Hebei, na China, Wang; Zhang, Liu (2019) afirmam que substituir carvão por petróleo e gás natural diminuiria a intensidade carbônica. Em estudo realizado no Irã para o período de 2001 a 2014, Mohamadbagheri (2017) conclui que a substituição de combustíveis líquidos por gás natural, apesar do aumento da intensidade energética, também foi responsável pela diminuição da intensidade de CO<sub>2</sub>. O autor finaliza dizendo que o uso de gás natural pode contribuir para o alcance dos compromissos firmados pelos países para mitigação da mudança climática.

Segundo Muradov (2013), apesar do aumento das emissões de CO<sub>2</sub> mundial, há sinais de descarbonização pelo aumento de uso de gás natural, fontes renováveis e eficiência energética. Para Dimitroulopoulo e Ziomas (2011), a introdução de combustíveis “mais limpos”, como gás natural e fontes renováveis, na Grécia contribuiu para a redução da intensidade energética e intensidade carbônica, no período de 2000 a 2008.

## **2.4 Conclusão da Revisão de Literatura**

Esta revisão de literatura buscou textos que podem auxiliar no entendimento do que é um sistema de energia sustentável, pautado em três dimensões: ecológica, econômica e de demanda. Assim como era esperado e lógico, as nações procuram atender, primeiramente, à demanda energética, estabelecendo um sistema confiável, em seguida, às necessidades de equidade, e deixando por último a questão ambiental. Porém, é de conhecimento amplo que os problemas

ambientais caminham com as questões energéticas. O uso conjunto dos métodos de Identidade de Kaya e Trilema de Energia busca obter uma avaliação mais completa, no sentido de se chegar a uma matriz mais sustentável em todos os sentidos, melhorando os indicadores de emissão de CO<sub>2</sub>.

Também foi visto que o gás natural vem ganhando cada vez mais espaço na matriz energética mundial e brasileira em particular, apresentando assim um grande potencial de crescimento, podendo melhorar a situação nacional frente ao trilema de energia. Pesquisas apontam para esta fonte como uma alternativa para a questão climática, funcionando como combustível de transição para minimizar o problema da intermitência das fontes renováveis. Estudos indicam, inclusive, a diminuição das emissões de GEE, uma vez que o gás natural é menos poluente que o petróleo e o carvão, e já vem sendo utilizado em diversos países com esse objetivo. O número de publicações encontradas e sua distribuição ao longo dos anos mostram que o tema que relaciona gás natural, emissões de CO<sub>2</sub> e trilema de energia é recente e vem ganhando cada vez mais importância.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Descrição do Conjunto de Países Selecionados**

O grupo dos países chamado BRICS é formado por Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul. O conceito foi criado por Jim O'Neil, em 2001, tendo a África do Sul entrado apenas em 2011. Essas nações, consideradas emergentes e em consolidação, ganharam visibilidade pelos bons indicadores macroeconômicos, em especial o crescimento do PIB (BIJOS; GUILHON, 2014). Tem relevância no cenário mundial pela parcela da população do planeta (42% em 2017), PIB (23,3% em 2017) (WDI, 2018), e emissões de CO<sub>2</sub>, que somaram, em 2015, 42% das emissões mundiais (FEIJÓ; RANGEL, 2018).

Esse grupo de países tem uma forte dependência de combustíveis fósseis, com participação de mais de 90% na matriz energética em China, Rússia, Índia e África do Sul, no período de 1995 a 2014. Os BRICS têm conseguido diminuir a intensidade energética, mas ainda estão aquém de países desenvolvidos para este indicador (DAI; ZHANG; HUANG, 2016). O grupo tem apresentado crescimento nas emissões per capita, porém, diminuição na intensidade de CO<sub>2</sub>, influenciado principalmente pelo acréscimo do PIB per capita, mas também pela queda na intensidade energética. O grupo deve focar seus esforços em aumento da eficiência energética, energias renováveis e desvincular o crescimento econômico das emissões de CO<sub>2</sub> (SU *et al.*, 2020).

Todavia, existem diferenças entre os países do grupo, onde cada nação e seus impactos ambientais devem ser analisados separadamente. Existe uma relação entre crescimento econômico e emissões de CO<sub>2</sub>, porém não é igual para os cinco países. Apesar de o consumo de energia afetar negativamente o meio ambiente, esses países não devem adotar uma política de forte redução das emissões pois o crescimento econômico é muito importante para eles (AZEVEDO; SARTORI; CAMPOS, 2018).

### 3.2 Base de Dados

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 2019, elaborado pelo WEC, bem como seu sítio eletrônico, para consultar a posição dos países no ranque e a nota de cada um deles. Os países selecionados são os do grupo dos BRICS. Foram incluídos na análise os números mundiais, grupo dos países da OCDE e o grupo dos BRICS com dados referentes à soma dos cinco países.

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, e 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 CO<sub>2</sub>. Além disso, uma análise da participação dos combustíveis fósseis e renováveis na matriz energética, também para os anos de 1990 e 2019 e sua evolução ao longo desses anos. O histórico da participação das fontes fósseis nas matrizes dos BRICS, com estudo ano a ano, de 1990 a 2019, assim como a relação CO<sub>2</sub>/energia primária. Variação percentual da energia primária, CO<sub>2</sub> e PIB, dessa vez com intervalos de tempo de cinco em cinco anos. E por último, uma análise da matriz elétrica nos anos de 1990 e 2019.

Posteriormente, 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 1 representam aumento do indicador em relação ao ano base, e menores que 1, queda.

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.

Por último, foi feita 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).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 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 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.

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. Conseqüentemente, 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). 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. Pode-se ver que a população é semelhante à da China e da Índia, porém com emissões consideravelmente maiores. 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).

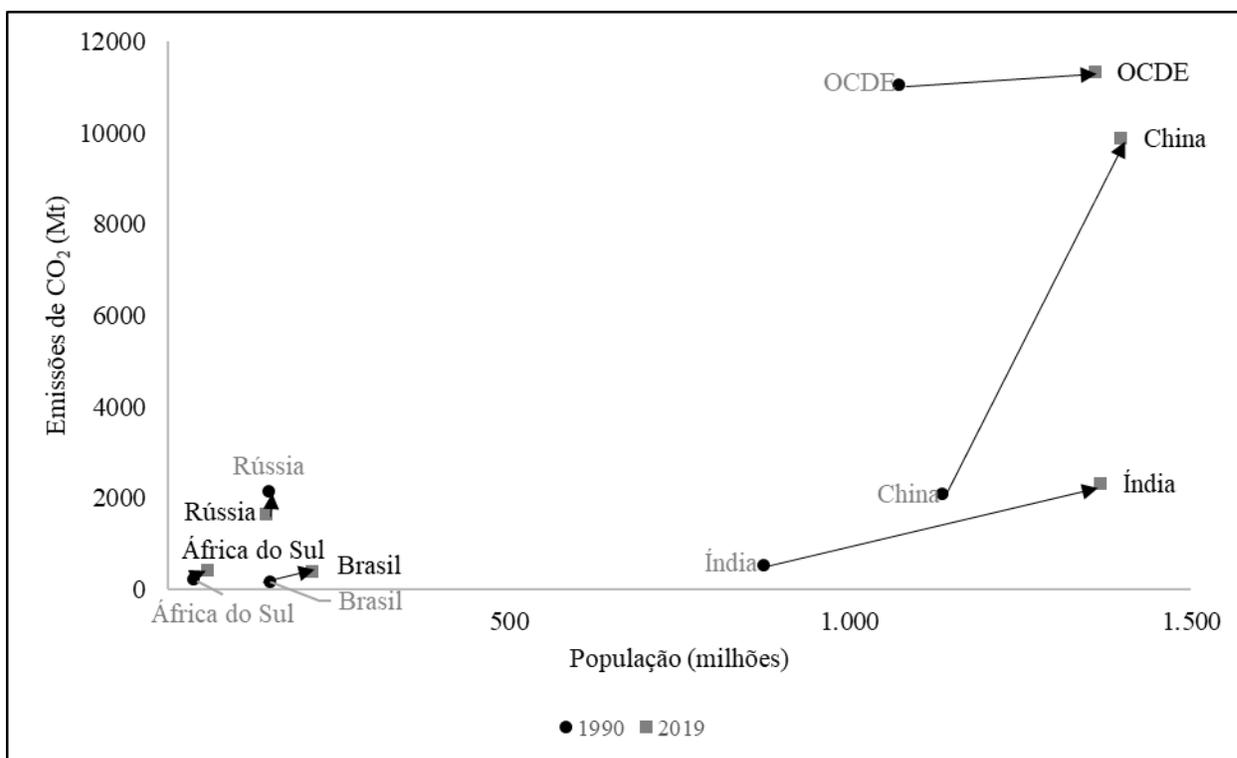


Figura 1. Emissões de CO<sub>2</sub> por população

Tabela 1. Emissões per capita dos BRICS e OCDE

Emissões per capita (t CO <sub>2</sub> /cap)	Índia	Brasil	China	África do Sul	Rússia	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

#### 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 2 apresenta ainda os valores percentuais do PIB e das emissões de CO<sub>2</sub>. Além disso, foi colocada 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>.

É possível destacar a posição da Rússia e da China em 1990 e a grande diferença para 2019, representada pelo 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 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.

Corroborando os resultados de Su *et al.* (2020), o grupo dos BRICS apresentou aumento nas emissões per capita, de 2,22 t CO<sub>2</sub> per capita para 4,62 t CO<sub>2</sub>/ per capita, enquanto OCDE teve queda nas emissões per capita, de 10,32 t CO<sub>2</sub>/ per capita para 8,32. Assim, os países desenvolvidos possuem emissões per capita DE 1,8 vezes o valor dos BRICS.

A Tabela 2 faz um comparativo, para cada país e grupo, da fração de 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 a 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. 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.

Do mesmo modo apontado por Dai, Zhang e Huang (2016), 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\$, com a 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\$.

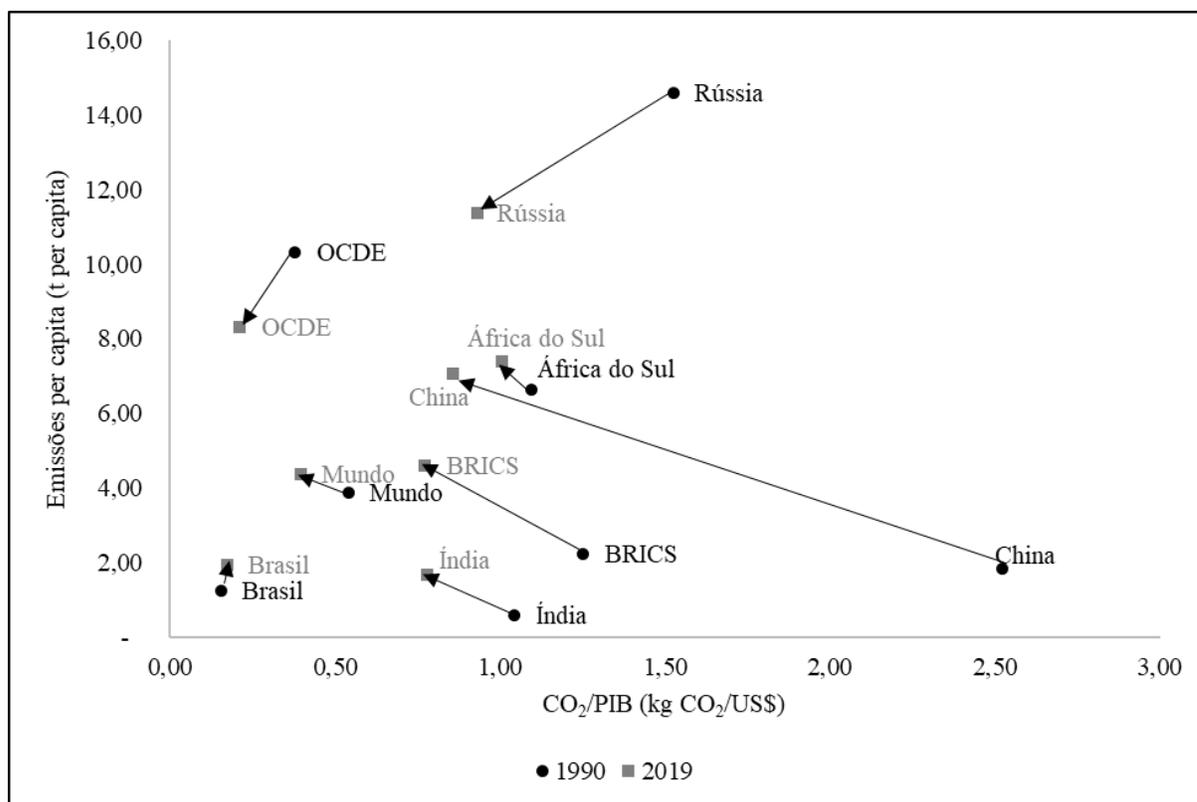


Figura 2. Relação de emissões per capita com CO<sub>2</sub>/PIB

Tabela 2. Comparativo da participação do PIB, emissões de CO<sub>2</sub> e população para 2019

	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

### 4.3 Análise da 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 3 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. A Figura 4 mostra a matriz energética dos países, seguindo a mesma divisão, porém apresentando os números absolutos ao longo dos anos de 1990 e 2019. A unidade é megatonelada equivalente de petróleo (Mtep).

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. Conseqüentemente, 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. Su *et al.* (2020) Apontam que um maior uso de fontes renováveis é importante para a diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> nos BRICS.

Falando 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 grandes consumidores de energia, contribuíram muito para que o uso de carvão no mundo também aumentasse, passando de 25% para 27%.

O gás natural merece destaque nesta análise. O seu uso de maior valor foi 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 2019. 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%.

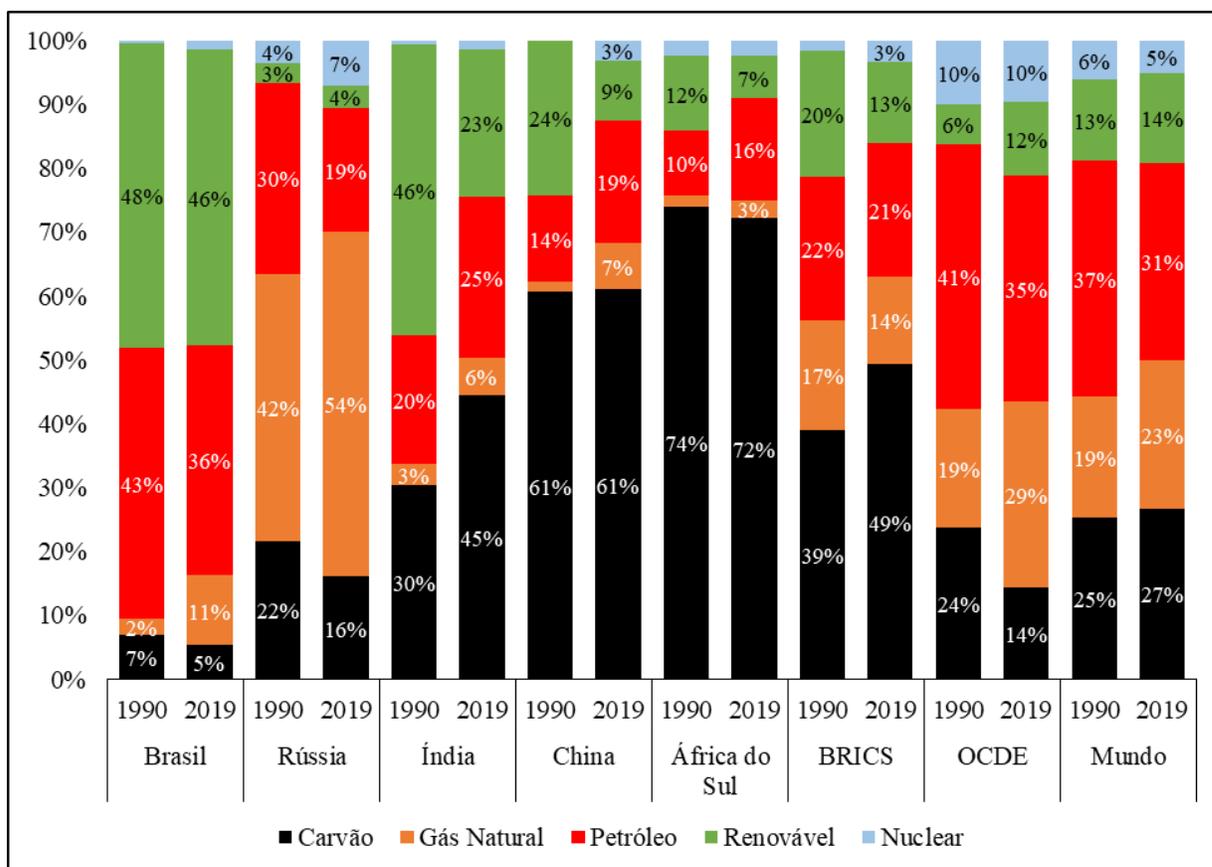


Figura 3. Participação das fontes fósseis, renováveis e nuclear na matriz energética

Analisando agora os números absolutos, com o eixo das ordenadas em Mtep, 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. No Brasil, apesar da diminuição da fração de fontes 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 consolidado 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 de petróleo e principalmente de carvão, e aumento no uso de gás natural.

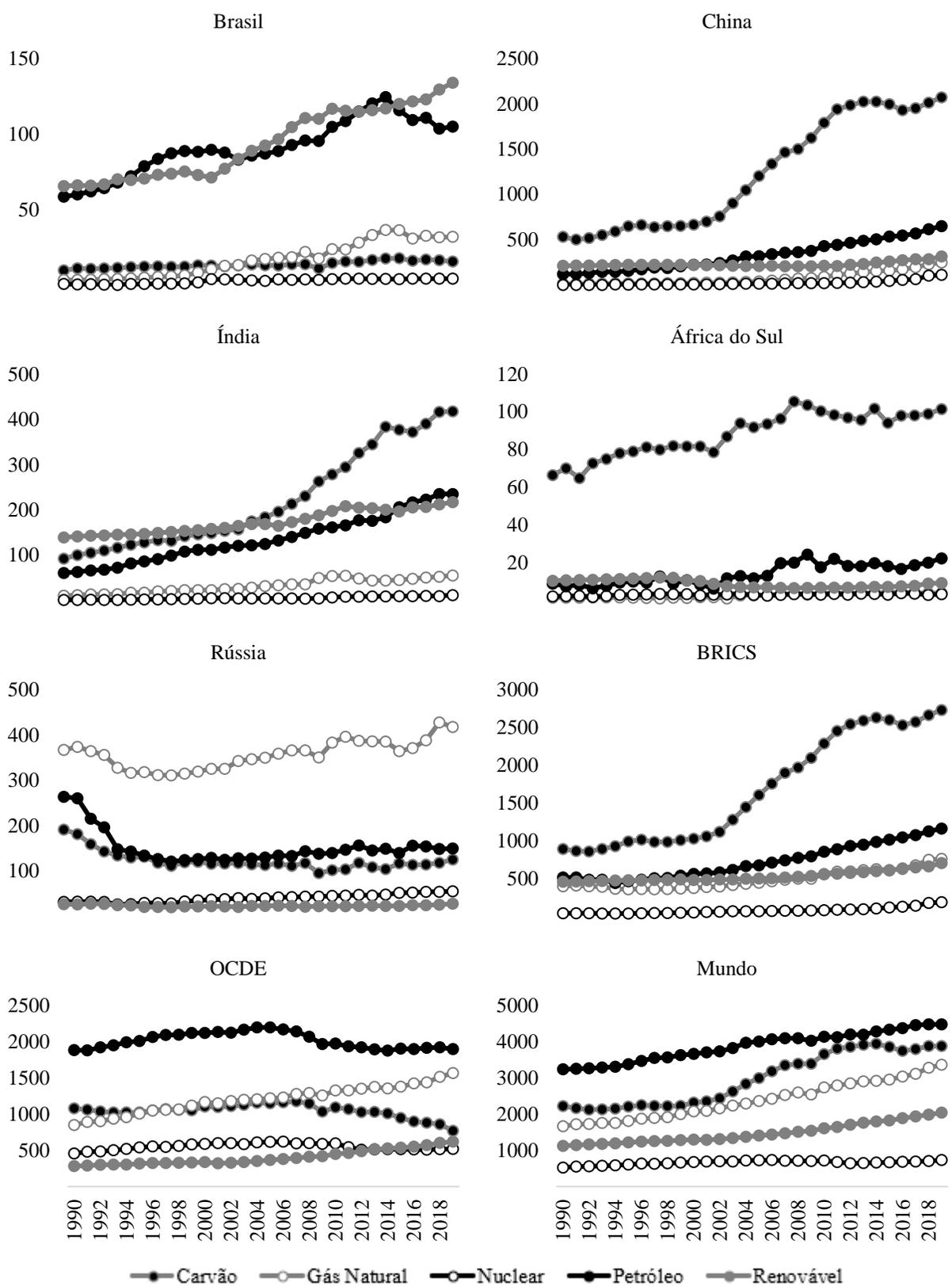


Figura 4. Matriz energética

#### 4.4 Histórico da Participação dos Combustíveis Fósseis 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 5 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.

Inicialmente, pode-se observar que China, Índia e África do Sul têm como característica o forte uso de carvão, com valores na ordem de grandeza de 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.

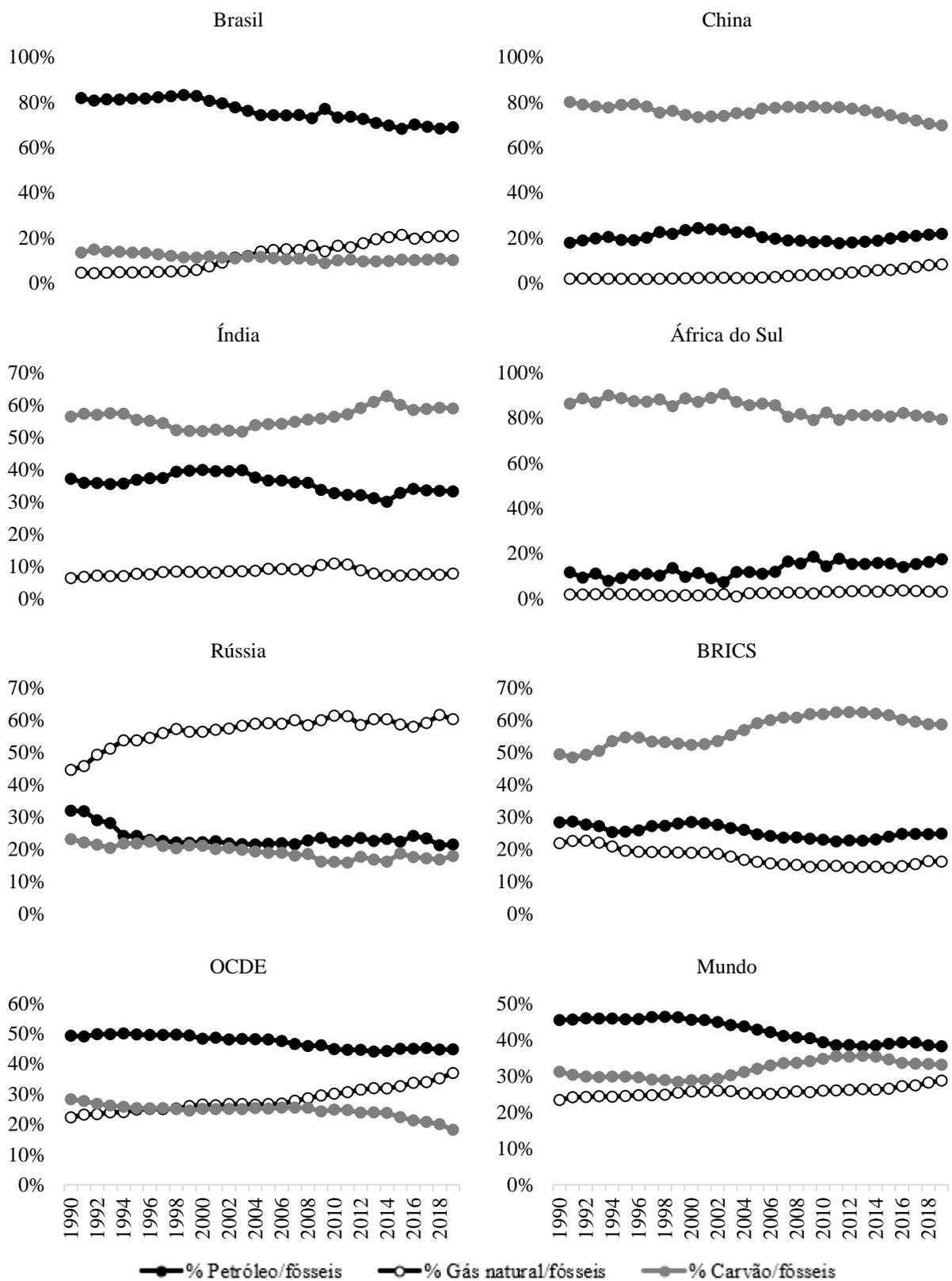


Figura 5. Participação dos combustíveis fósseis em relação ao total dessa fonte

#### 4.5 Variação Percentual de energia primária, PIB e CO<sub>2</sub>

A próxima seção deste trabalho apresenta um estudo da relação entre PIB, emissões de CO<sub>2</sub> e energia primária. A Figura 6 mostra a variação desses indicadores, para os países dos BRICS, em relação a cinco anos antes, começando em 1995 e terminando em 2019, com o último intervalo de tempo de quatro anos.

Em primeiro lugar, pode-se notar que os países dos BRICS têm características distintas entre si, não havendo um comportamento padrão. As taxas de crescimento variam entre as nações, além de descontinuidades apresentadas por uns países e outros não.

Por sua vez, o gráfico consolidado para os países dos BRICS mostra que o grupo teve taxas positivas para os três indicadores em todos os períodos analisados, com maior crescimento de PIB que energia e CO<sub>2</sub>. É possível observar que, de um modo geral, também houve crescimento das taxas até o intervalo compreendido entre 2000 e 2005, quando então passaram a cair, formando uma figura triangular no gráfico, porém permanecendo positivas. Dessa maneira, pode-se ver que o grande crescimento econômico e de energia dos BRICS já não é tão alto como foi na primeira década dos anos 2000.

Para o grupo da OCDE, nota-se crescimento do PIB em todos os intervalos, com queda nas emissões de CO<sub>2</sub> a partir de 2010, o que é muito positivo do ponto de vista ecológico. Também houve queda no consumo de energia, com exceção entre 2015 e 2019. Já o caso mundial mostra grande crescimento econômico, principalmente entre 1995 e 2005. Apesar das taxas menores, também houve grande aumento no consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub>.

Falando mais especificamente de cada país, observa-se o alto índice de aumento de PIB, CO<sub>2</sub> e energia primária para a Índia e China em todos os intervalos de tempo, característica de países em desenvolvimento. No geral, essas duas nações tiveram maior crescimento econômico que de energia ou de emissões de CO<sub>2</sub>. A China chegou a uma taxa de 78,3% de crescimento de PIB de 1990 para 1995, taxa essa que caiu nos anos seguintes, mas sempre positiva.

A África do Sul novamente não mostrou um padrão de comportamento. Teve aumento de PIB em todo o período, com grande aumento de CO<sub>2</sub> entre 2000 e 2005, de 32,7%, e queda de 3,6% na energia primária entre 2010 e 2015. A Rússia, por sua vez, teve queda nos três indicadores entre 1990 e 1995, período de dissolução da União Soviética. Nos anos seguintes, o país teve crescimento de PIB sem grande aumento de energia primária e CO<sub>2</sub>.

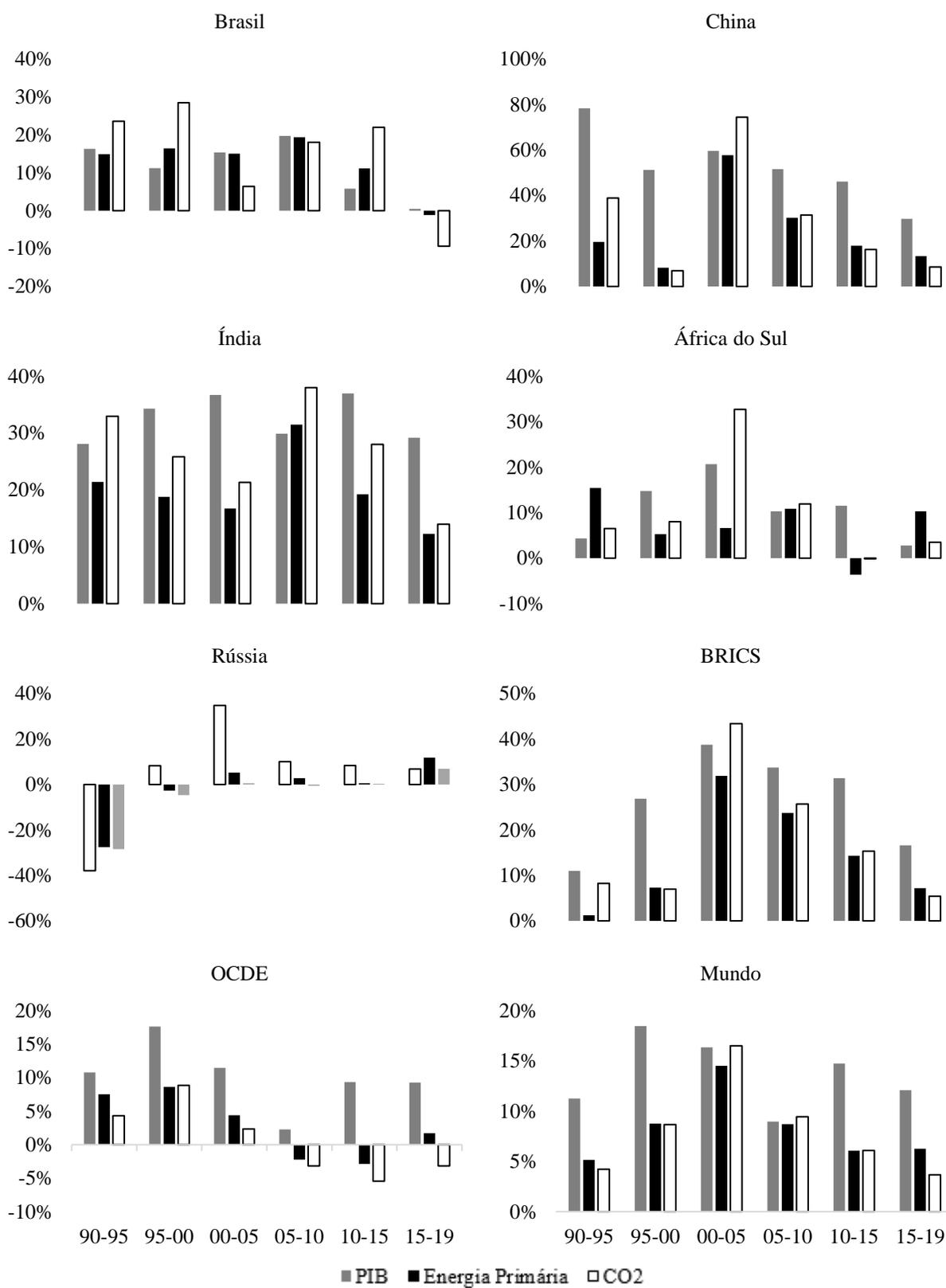


Figura 6. Variação de PIB, energia primária e CO<sub>2</sub> para os BRICS

Por último, o Brasil, no geral, teve maior variação positiva de CO<sub>2</sub> que energia primária e PIB. Diferentemente dos outros países, no último intervalo analisado, entre 2015 e 2019, houve apenas um ligeiro aumento no PIB, pela crise interna brasileira, além de decréscimo na energia primária e principalmente nas emissões de CO<sub>2</sub>.

#### **4.6 Relação CO<sub>2</sub>/Energia Primária**

A Figura 7 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 equivalente de petróleo. 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 CO<sub>2</sub>. Assim, a relação CO<sub>2</sub>/energia primária 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.

Como era de se esperar, o gás natural é o combustível mais limpo dentre os fósseis, com uma relação CO<sub>2</sub>/energia primária mais baixa. Desse modo, ele libera menos CO<sub>2</sub> 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>/energia primária 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>/energia primária para os combustíveis fósseis acompanha a curva do carvão em China, Índia, África do Sul e o grupo dos BRICS consolidado, 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>/tep em 1990 para 3,14 t CO<sub>2</sub>/tep 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>/tep, 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.

Já o mundo apresentou linhas estáveis nessa análise, tendo, em 2019, 2,85 t CO<sub>2</sub>/tep. O valor foi de 2,16 t CO<sub>2</sub>/tep para o gás natural, 2,53 t CO<sub>2</sub>/tep para o petróleo e 3,82 t CO<sub>2</sub>/tep 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.

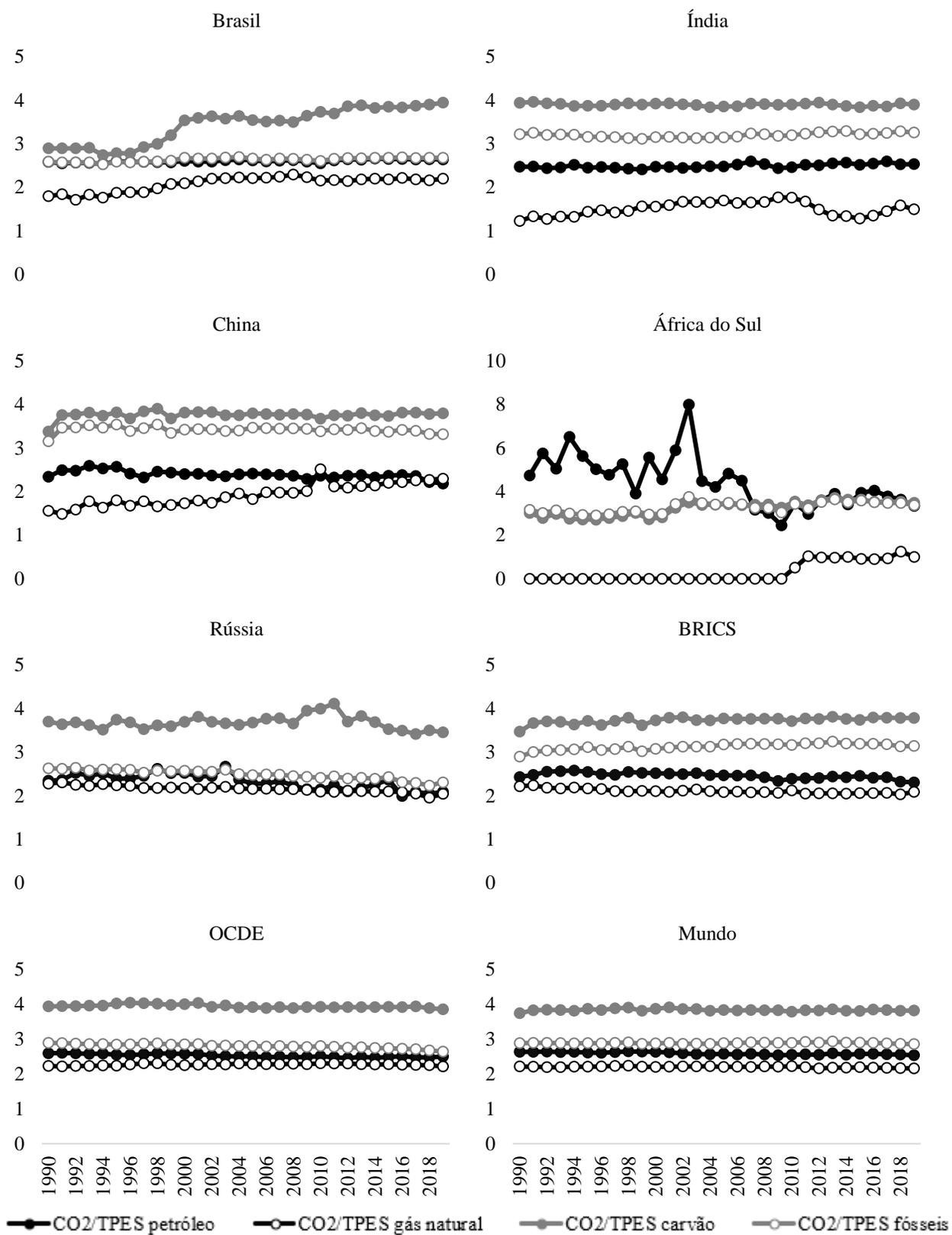


Figura 7. CO<sub>2</sub>/energia primária para os combustíveis fósseis

Apesar do aumento de uso de gás natural no Brasil, o que tenderia a uma maior eficiência energética, a relação CO<sub>2</sub>/energia primária para os combustíveis fósseis não teve grandes alterações, saindo de 2,59 t CO<sub>2</sub>/toe para 2,68 t CO<sub>2</sub>/toe. Isso ocorreu pela grande participação ainda de petróleo, de modo que as curvas ficam quase que sobrepostas, além da diminuição da eficiência do carvão, que já é o combustível menos limpo, passando de 2,90 t CO<sub>2</sub>/toe para 3,94 t CO<sub>2</sub>/toe.

A África do Sul mostrou grandes variações de CO<sub>2</sub>/energia primária do petróleo, saindo de 4,74 t CO<sub>2</sub>/toe em 1990, chegando a 7,99 t CO<sub>2</sub>/toe em 2002 e finalizando em 3,35 t CO<sub>2</sub>/toe em 2019. Emissões de CO<sub>2</sub> por uso de gás natural só foram registradas a partir de 2009 neste país.

No ano de 2019, a nação mais eficiente no sentido dessa análise foi a Rússia, com 2,31 t CO<sub>2</sub>/toe, seguido por Brasil (2,68 t CO<sub>2</sub>/toe), Índia (3,26 t CO<sub>2</sub>/toe), China (3,32 t CO<sub>2</sub>/toe) e África do Sul (3,39 t CO<sub>2</sub>/toe). O primeiro país tem alto uso de gás natural e o último, alto uso de carvão, o que explica a posição de cada um.

#### **4.7 Análise da Matriz Elétrica**

A Figura 8 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 CO<sub>2</sub> mais especificamente dentro da matriz elétrica de cada nação.

A geração de eletricidade é ponto chave para o trilema de energia. 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 seguridade energética. Altas tarifas influenciam na nota da equidade energética.

Inicialmente, é possível visualizar, novamente, o alto uso de carvão para os países estudados. Essa fonte energética é a mais usada 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.

É interessante notar que o mundo mostrou uma diversificação da matriz elétrica, diminuindo o uso de petróleo (de 11% para 3%) e energia nuclear (de 17% para 10%), e aumentando o consumo de biocombustíveis (de 1% para 2%), energia solar fotovoltaica (de 0% para 3%), eólica (de 0% para 5%) e gás natural (de 15% para 23%). Por um caminho parecido seguiu o grupo da OCDE, entretanto, houve diminuição do uso de carvão (de 40% para 22%), que foi substituído principalmente pelo gás natural (de 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. 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 (de 1% para 3%), biocombustíveis (de 2% para 9%), além do surgimento na matriz elétrica do gás natural, com 10%, e energia eólica, com 9%.

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. A 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%).

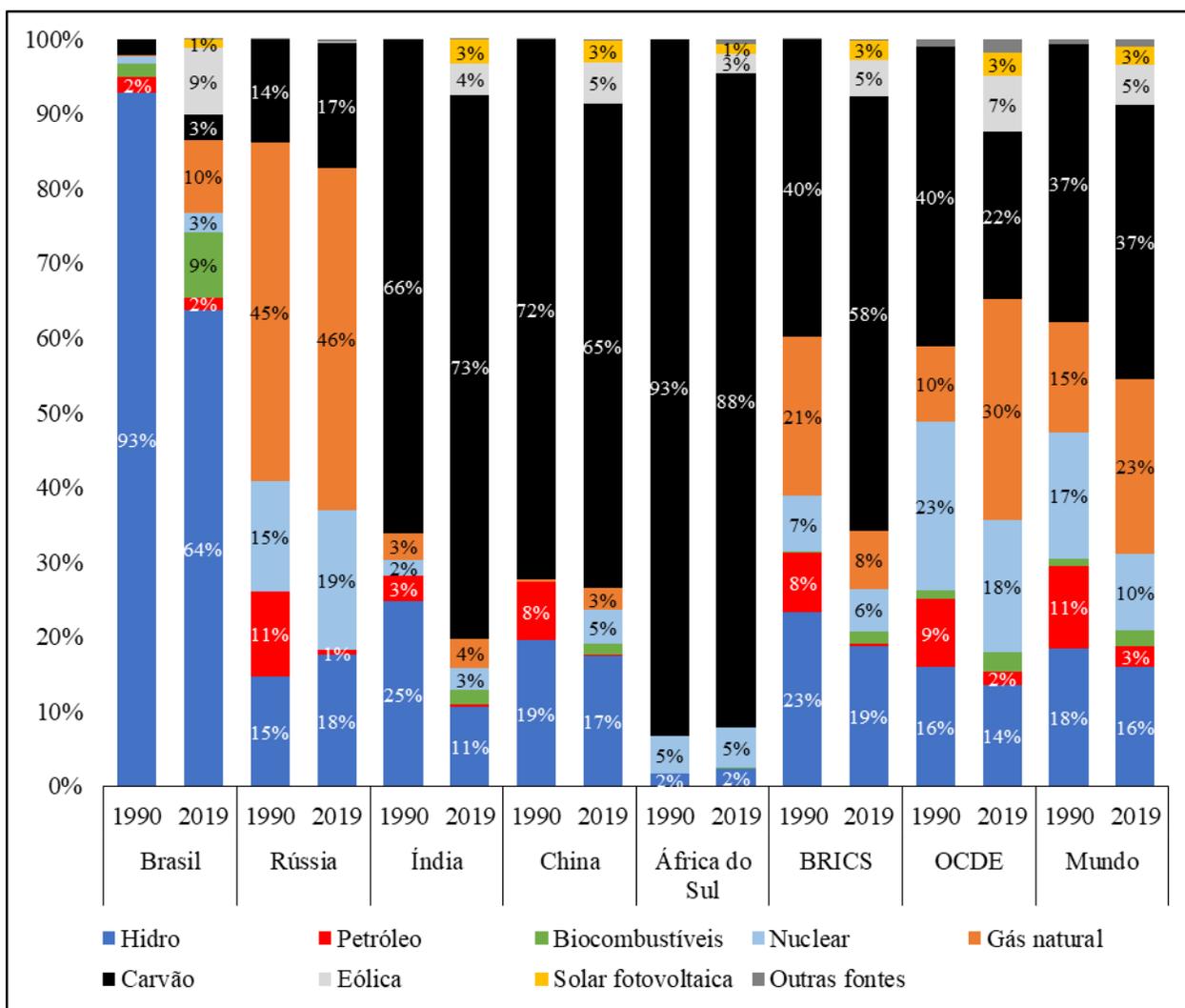


Figura 8. Matriz elétrica dos países dos BRICS, OCDE e Mundo

#### 4.8 Análise da Decomposição de Kaya

A Figura 9 apresenta a Decomposição de Kaya para os países dos BRICS, OCDE e mundo. Numa primeira análise grupal, os países dos dos BRICS, no geral, apresentaram um aumento populacional, o que resultou em acréscimo no gasto de energia primária e nas emissões de CO<sub>2</sub>. Os indicadores intensidade de CO<sub>2</sub> e intensidade energética não variaram consideravelmente 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>. A curva das emissões de CO<sub>2</sub> 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 causa 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 aumento 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. Com a Rússia, foi o único país que conseguiu diminuir consideravelmente a intensidade energética.

Fazendo um paralelo com a Figura 4, percebe-se que para o Brasil, a curva de emissões de CO<sub>2</sub> acompanha a curva do consumo de petróleo. O mesmo comportamento ocorre com China, Índia e África do Sul e o consolidado do 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.

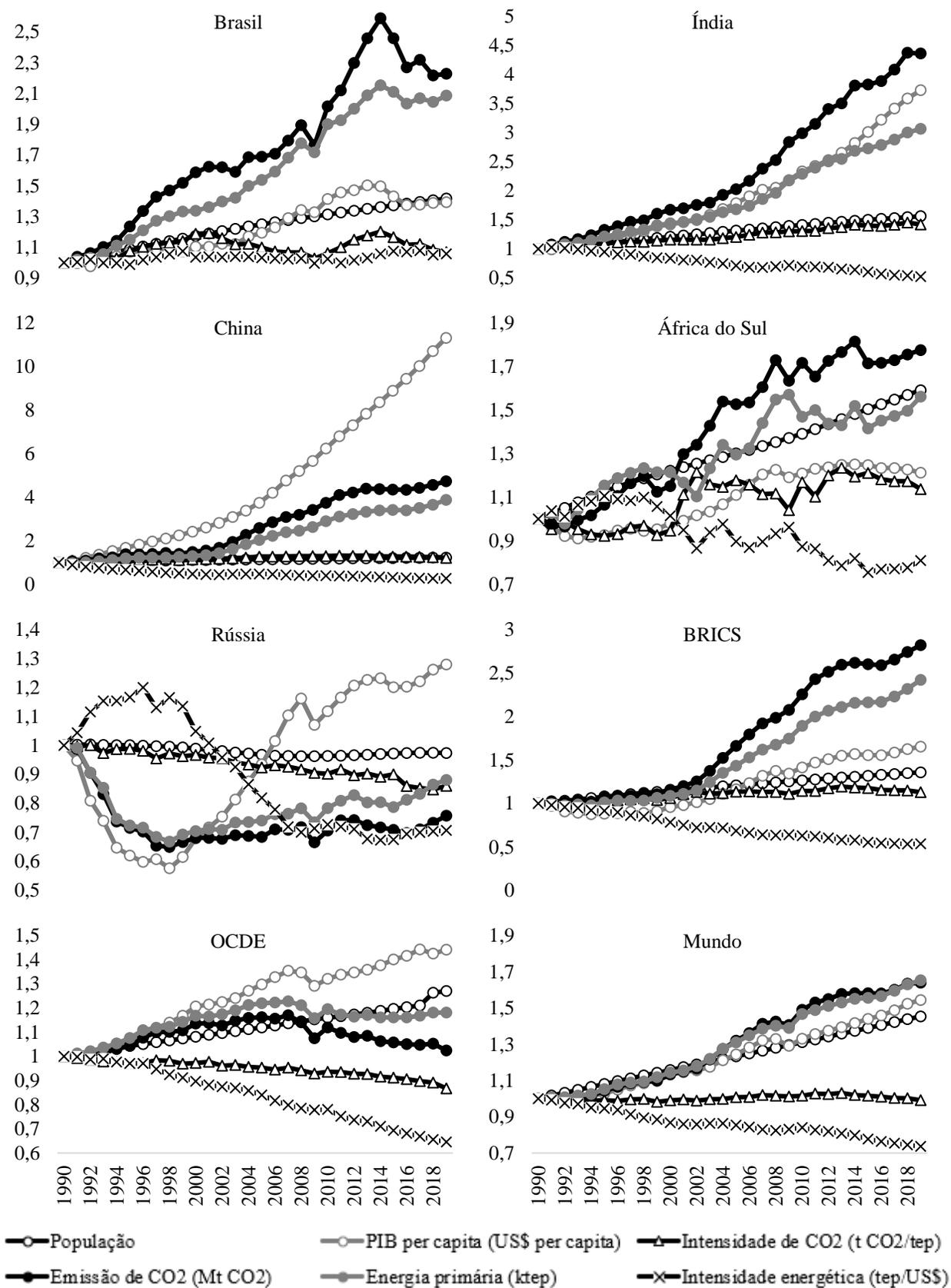


Figura 9. Decomposição de Kaya para os BRICS, OCDE e Mundo

#### 4.9 Trilema de Energia, IDH e Energia Renovável

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 (Índice de Desenvolvimento Humano) e, segundo, com relação às participações percentuais de energia renovável em suas respectivas matrizes energéticas. Para isto, foi construído o gráfico da Figura 10 (com dados de 2019). O eixo da abscissa descreve o ranque do Trilema de Energia, já no eixo da ordenada esquerda está a participação das fontes renováveis e fósseis 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 utilização de fontes renováveis e fósseis.

Inicialmente pode-se dividir a figura 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, baixo IDH (África do Sul e Índia).

No que se refere ao Trilema de Energia e a participação de energia renovável, 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.

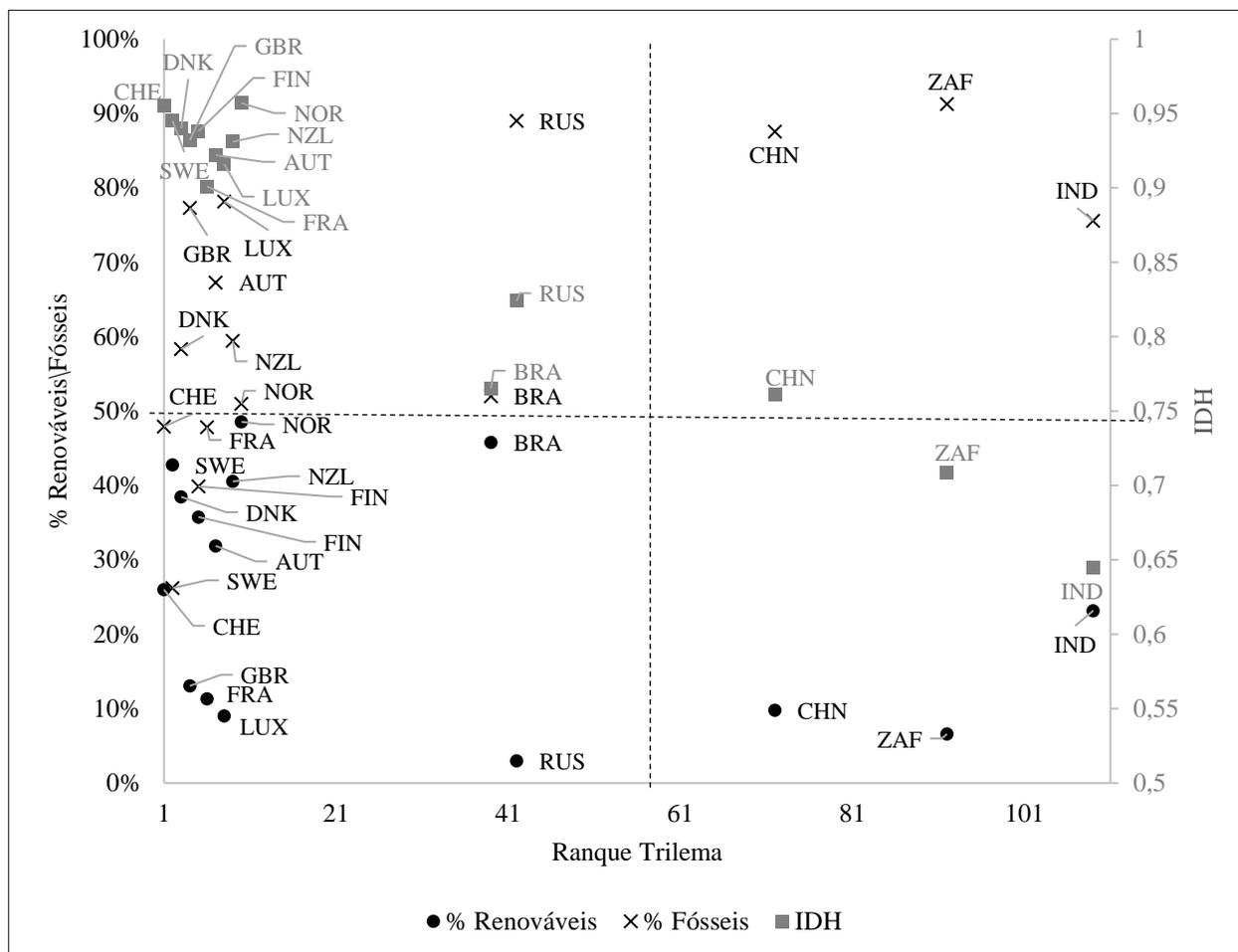


Figura 10. Relação da posição no ranque do Trilema de Energia com participação de fontes renováveis, fósseis e IDH.

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 10 mostra a diferença do grupo dos BRICS em relação aos 10 primeiros do ranque, 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%.

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

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

#### 4.10 Avaliação dos Pilares do Trilema de Energia

A Figura 11 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.

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.

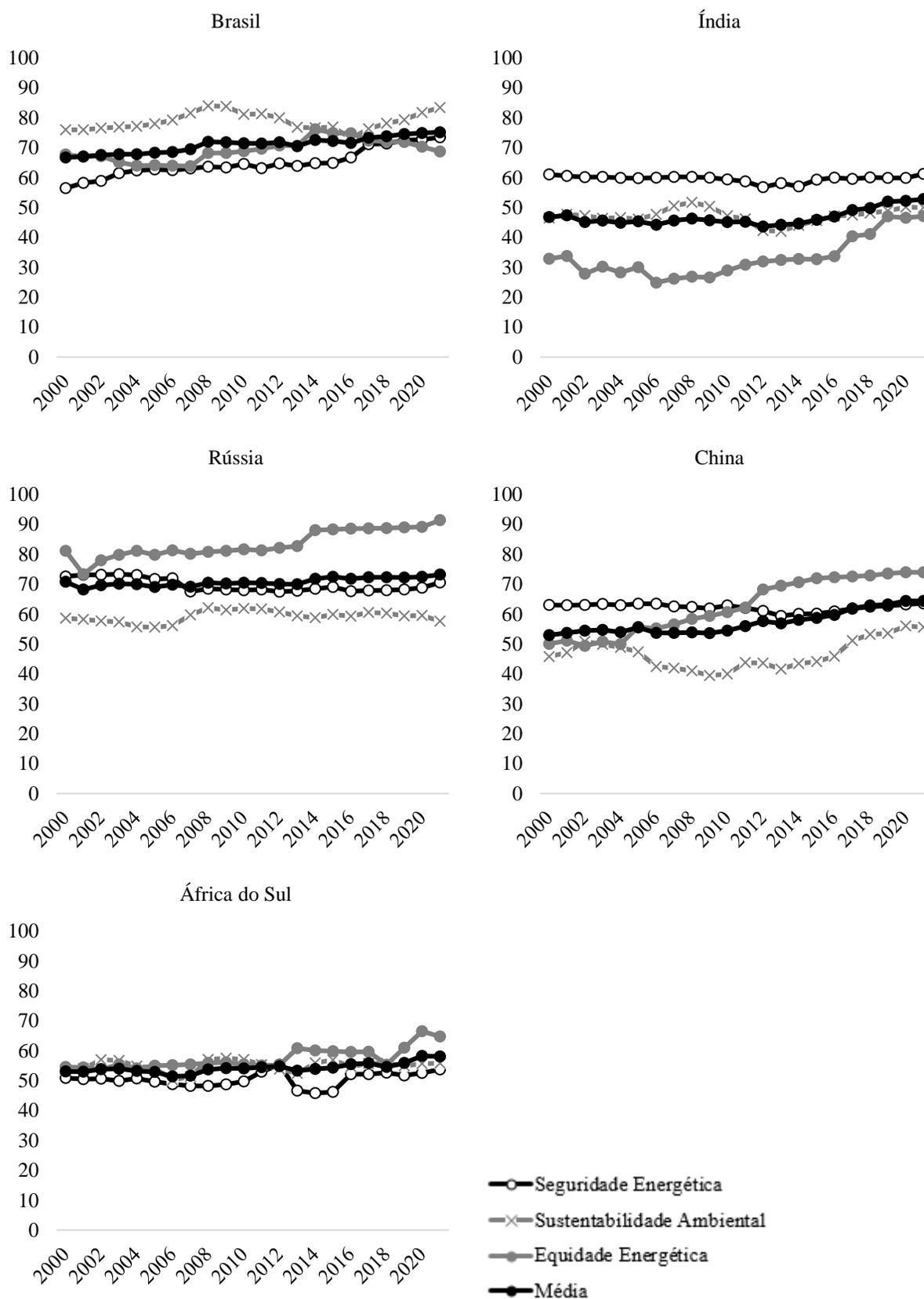


Figura 11. Nota dos pilares do Trilema de Energia para os BRICS

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Conclusões

Este trabalho buscou fazer um estudo das emissões de CO<sub>2</sub> para os países dos BRICS, avaliando a possibilidade de expansão de combustíveis fósseis, em especial do gás natural, num contexto em que são avaliados o desenvolvimento e o trilema de energia dos países. Para tanto, foram utilizados dados disponíveis no portal da Agência Internacional de Energia e no Relatório de Trilema de Energia, elaborado pelo WEC. A partir de conhecimento empírico, foram feitos estudos das matrizes energética e elétrica, população, emissões de CO<sub>2</sub> e PIB. Adicionalmente, este trabalho apresentou uma análise que envolveu trilema de energia, IDH e a matriz energética, a avaliação dos pilares do trilema de energia e a 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. E, nações com alto índice de desenvolvimento humano apresentam valores variados no uso de fontes energéticas renováveis e fósseis.

Por outro lado, países com alto IDH possuem 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, pode-se ver que o uso de fontes mais limpas, de imediato, não tem um impacto 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 país que aumentou as emissões per capita e por PIB no período analisado, porém, ao mesmo tempo, 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, dentre os BRICS, 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 item beneficia o Brasil, diminuindo a necessidade energética e conseqüentemente as emissões de CO<sub>2</sub>.

Foi observado um aumento no consumo de gás natural tanto em números absolutos como em participação na matriz energética, no Brasil e no mundo. Com expectativas de queda nos custos de produção e distribuição, um maior uso desse combustível poderia contribuir para a melhora da equidade energética pela diminuição dos custos de eletricidade. Além disso, atenuaria o risco de falta de energia elétrica nos períodos de seca pelos quais o Brasil tem passado, melhorando a segurança energética.

A partir das análises realizadas, pode-se dizer que, no Brasil, 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 as emissões, uma vez que ele vem substituindo o carvão, recurso considerado mais poluente, como já discutido.

Por último, pode-se concluir que:

- O uso de gás natural não trouxe impacto considerável para a intensidade energética e intensidade de CO<sub>2</sub>.
- No trilema de energia, não foi observada relação direta do consumo de gás natural com os quesitos ambiental, segurança e equidade energética.
- Diante dos indicadores de emissões relativas, matriz energética, matriz elétrica e Trilema de Energia, é possível uma expansão do uso de gás natural no Brasil.
- A abordagem proposta nessa pesquisa, de utilizar juntamente as metodologias da Decomposição de Kaya e Trilema de Energia, se mostrou eficaz para compreensão dos problemas energéticos e ambientais a fim de construir um sistema mais sustentável.

## **5.2 Limitações do Trabalho**

Esta pesquisa teve como limitante as suas bases de dados. O portal da IEA possui um atraso de dois anos para a divulgação dos seus números. Além disso, as informações não são totalmente disponibilizadas para o usuário comum, de maneira estruturada, exigindo um grande trabalho

manual por parte do pesquisador. Também houve problemas com mudança de unidades de energia e categorização da energia primária por parte da IEA, e até mesmo com a composição do grupo da OCDE, que sofreu a inclusão da Colômbia durante o estudo, alterando os números.

Diferentemente da IEA, o WEC divulga as notas, o ranque e o relatório do Trilema de Energia no ano corrente. Por outro lado, o detalhe do cálculo não é disponibilizado e a coleta também exige trabalho manual. O relatório começou a ser divulgado no ano de 2000, não sendo possível um estudo com uma linha do tempo maior e que acompanhe a linha da IEA.

### 5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se um estudo mais detalhado da composição da nota de cada pilar do trilema de energia e sua relação com a matriz energética e outros indicadores como intensidade de CO<sub>2</sub> e intensidade energética. Um estudo do consumo de combustíveis por setor também seria interessante para avaliar o impacto de cada nicho da economia e onde cada país deve focar seus esforços para mitigação dos impactos ambientais. Da mesma forma, existe a demanda por uma pesquisa mais profunda das emissões de CO<sub>2</sub>, uma vez que cada nação possui suas particularidades, como discutido para o caso brasileiro. Ademais, a IEA informa apenas as emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis.

### 5.4 Produções Originadas neste Trabalho

Quadro 1. Produções originadas neste trabalho

	Título	Veículo	Ano	Situação
1	Análise de Emissões de CO <sub>2</sub> e Trilema de Energia nos BRICS	V Congresso Fluminense de Pós-Graduação	2020	Publicado
2	Análise de Emissões de CO <sub>2</sub> e Trilema de Energia nos BRICS	VI Congresso Fluminense de Pós-Graduação	2021	Publicado
3	Energias renováveis e desenvolvimento sustentável nos países dos BRICS	Boletim Petróleo, Royalties e Região	2021	Aceito para publicação
4	Emissões de CO <sub>2</sub> e o potencial de expansão dos combustíveis fósseis nos BRICS	<b>Natural Resources Forum,</b> United Nations Sustainable Development Journal (NRF)	-	A ser submetido

## REFERÊNCIAS

ALI SHAH, S. A. et al. Energy trilemma based prioritization of waste-to-energy technologies: Implications for post-COVID-19 green economic recovery in Pakistan. **Journal of Cleaner Production**, v. 284, p. 124729, fev. 2021.

ALMEIDA PRADO, F. et al. 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**, v. 53, p. 1132–1136, jan. 2016.

ANGELO, C.; RITTL, C. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas do Brasil**. Brasil: SEEG, nov. 2019. Disponível em: <[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)>. Acesso em: 13 maio. 2020.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2020**. Rio de Janeiro: ANP, 2020. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/arquivos/central-conteudos/anuario-estatistico/2020/anuario-2020.pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2020.

ARANGO-ARAMBURO, S.; RÍOS-OCAMPO, J. P.; LARSEN, E. R. Examining the decreasing share of renewable energy amid growing thermal capacity: The case of South America. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, p. 109648, mar. 2020.

ASBAHI, A. A. M. H. A. et al. Novel approach of Principal Component Analysis method to assess the national energy performance via Energy Trilemma Index. **Energy Reports**, v. 5, p. 704–713, nov. 2019.

AZEVEDO, V. G.; SARTORI, S.; CAMPOS, L. M. S. CO<sub>2</sub> emissions: A quantitative analysis among the BRICS nations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 107–115, jan. 2018.

BIJOS, L.; GUILHON, E. P. Brics, uma alternativa de poder? **Revista do Direito Público**, v. 9, n. 1, p. 9, 30 abr. 2014.

BOGOVIZ, A. V. et al. 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**, v. 9, n. 3, p. 244–250, 1 maio 2019.

BRASIL. 4476. PL 4476/2020 (Nº Anterior: PL 6407/2013). Dispõe sobre medidas para fomentar a Indústria de Gás Natural e altera a Lei nº 11.909, de 4 de março de 2009. -. 24 set. 2013.

BRASIL. 14134. Lei nº 14.314, de 8 de abril de 2021. Dispõe sobre as atividades relativas ao transporte de gás natural, de que trata o art. 177 da Constituição Federal, e sobre as atividades de escoamento, tratamento, processamento, estocagem subterrânea, acondicionamento, liquefação, regaseificação e comercialização de gás natural; altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, e 9.847, de 26 de outubro de 1999; e revoga a Lei nº 11.909, de 4 de março de 2009, e dispositivo da Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. -. 8 abr. 2021.

BRONZATTI, F. L.; NETO, A. I. **Matrizes energéticas no Brasil: Cenário 2010-2030**. . In: XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. 2008.

BROWN, M. A. et al. Forty years of energy security trends: A comparative assessment of 22 industrialized countries. **Energy Research & Social Science**, v. 4, p. 64–77, dez. 2014.

CAMPOS, A. F. et al. A review of Brazilian natural gas industry: Challenges and strategies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 1207–1216, ago. 2017.

CERVANTES BRAVO, R. J. et al. **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. **Anais...** In: SPE LATIN AMERICAN AND CARIBBEAN PETROLEUM ENGINEERING CONFERENCE. Virtual: Society of Petroleum Engineers, 2020. Disponível em: <<http://www.onepetro.org/doi/10.2118/199131-MS>>. Acesso em: 18 nov. 2020

CERVANTES-BRAVO, R. J. et al. **Energy Efficiency Scenarios Following the Energy Trilemma - Argentina's Commitment to COP21**. SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference. **Anais...** In: SPE LATIN AMERICA AND CARIBBEAN PETROLEUM ENGINEERING CONFERENCE. Buenos Aires, Argentina: Society of Petroleum Engineers, 2017. Disponível em: <<http://www.onepetro.org/doi/10.2118/185511-MS>>. Acesso em: 18 nov. 2020

DAI, S.; ZHANG, M.; HUANG, W. Decomposing the decoupling of CO2 emission from economic growth in BRICS countries. **Natural Hazards**, v. 84, n. 2, p. 1055–1073, nov. 2016.

DE CASTRO, N.; BRANDÃO, R. Causas da crise hídrica no Brasil. **Agência Broadcast Energia**, p. 3, 2021.

DIMITROULOPOULOU, C.; ZIOMAS, I. Update of indicators for climate change mitigation in Greece. **Energy Policy**, v. 39, n. 10, p. 6495–6504, out. 2011.

EBHOTA, W. S.; JEN, T.-C. **Photovoltaic Solar Energy: Potentials and Outlooks**. Volume 6B: Energy. **Anais...** In: ASME 2018 INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION. Pittsburgh, Pennsylvania, USA: American Society of Mechanical Engineers, 9 nov. 2018. Disponível em: <<https://asmedigitalcollection.asme.org/IMECE/proceedings/IMECE2018/52088/Pittsburgh,%20Pennsylvania,%20USA/275398>>. Acesso em: 18 nov. 2020

EBHOTA, W. S.; JEN, T.-C. 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**, v. 7, n. 1, p. 97–117, jan. 2020.

EBHOTA, W. S.; TABAKOV, P. Y. The place of small hydropower electrification scheme in socioeconomic stimulation of Nigeria. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 13, n. 4, p. 311–319, 1 dez. 2018.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Demanda de Gás Natural nos Mercados Nacional e Internacional**, 2020. . Acesso em: 6 jul. 2021

FEIJÓ, G. D. R.; RANGEL, J. J. DE A. 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**, v. 46, 31 ago. 2018.

FIOREZE, M. et al. Gás natural: potencialidades de utilização no Brasil. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 10, n. 10, p. 2251–2265, 7 abr. 2013.

FU, F. Y. et al. The dynamic role of energy security, energy equity and environmental sustainability in the dilemma of emission reduction and economic growth. **Journal of Environmental Management**, v. 280, p. 111828, fev. 2021.

FUENTES, S. et al. Transition to a greener Power Sector: Four different scopes on energy security. **Renewable Energy Focus**, v. 33, p. 23–36, jun. 2020.

GENT, D.; TOMEI, J. Electricity in Central America: Paradigms, reforms and the energy trilemma. **Progress in Development Studies**, v. 17, n. 2, p. 116–130, abr. 2017.

HARJANNE, A.; KORHONEN, J. M. Abandoning the concept of renewable energy. **Energy Policy**, v. 127, p. 330–340, abr. 2019.

HEFFRON, R. J.; MCCAULEY, D. The concept of energy justice across the disciplines. **Energy Policy**, v. 105, p. 658–667, jun. 2017.

HEFFRON, R. J.; MCCAULEY, D.; DE RUBENS, G. Z. Balancing the energy trilemma through the Energy Justice Metric. **Applied Energy**, v. 229, p. 1191–1201, nov. 2018.

HENRIQUES, S. T.; BOROWIECKI, K. J. The drivers of long-run CO<sub>2</sub> emissions in Europe, North America and Japan since 1800. **Energy Policy**, v. 101, p. 537–549, fev. 2017.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion 2019 - Highlights**. França: IEA, 2019. . Acesso em: 13 maio. 2020.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Energy Review 2020 The impacts of the Covid-19 crisis on global energy demand and CO<sub>2</sub> emissions**. França: IEA, jul. 2020.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Data and statistics**. França: IEA, 23 fev. 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics>>. Acesso em: 23 fev. 2021.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2014: mitigation of climate change**. Cambridge: Cambridge University, 2015.

JIANG, X.; GUAN, D. Determinants of global CO<sub>2</sub> emissions growth. **Applied Energy**, v. 184, p. 1132–1141, dez. 2016.

JING, R. et al. Balancing the Energy Trilemma in energy system planning of coastal cities. **Applied Energy**, v. 283, p. 116222, fev. 2021.

KAYA, Y. Environment, energy, and economy: strategies for sustainability. **Tokyo: United Nations University Press**, 1997.

LEAL, F. I.; REGO, E. E.; DE OLIVEIRA RIBEIRO, C. Natural gas regulation and policy in Brazil: Prospects for the market expansion and energy integration in Mercosul. **Energy Policy**, v. 128, p. 817–829, maio 2019.

LIMA, F. et al. 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**, v. 39, n. 3–4, p. 175–190, ago. 2015.

LIN, B.; AGYEMAN, S. D. Assessing Sub-Saharan Africa's low carbon development through the dynamics of energy-related carbon dioxide emissions. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 122676, nov. 2020.

MASSON-DELMOTTE, V. et al. **IPCC, 2018: Summary for Policymakers**. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2018.

MATHIAS, M. C.; SZKLO, A. Lessons learned from Brazilian natural gas industry reform. **Energy Policy**, v. 35, n. 12, p. 6478–6490, dez. 2007.

MOHAMADBAGHERI, A. The Effect of Fuel Switching on Greenhouse Gases Emissions in Iran. **International Journal of Economic Perspectives**, v. 11, n. Issue 3, p. 905–911, 2017.

MOHAMMED, M. S. H.; ALHAWSAWI, A.; SOLIMAN, A. Y. An Integrated Approach to the Realization of Saudi Arabia's Energy Sustainability. **Sustainability**, v. 13, n. 1, p. 205, 28 dez. 2020.

MURADOV, N. Decarbonization at crossroads: the cessation of the positive historical trend or a temporary detour? **Energy & Environmental Science**, v. 6, n. 4, p. 1060, 2013.

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **O Sistema em Números**. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-osin/o-sistema-em-numeros>> >.

ORTHOFFER, C. L.; HUPPMANN, D.; KREY, V. South Africa After Paris—Fracking Its Way to the NDCs? **Frontiers in Energy Research**, v. 7, p. 20, 5 mar. 2019.

PUI, K. L.; OTHMAN, J. The influence of economic, technical, and social aspects on energy-associated CO<sub>2</sub> emissions in Malaysia: An extended Kaya identity approach. **Energy**, v. 181, p. 468–493, ago. 2019.

RANGEL, J. J. DE A. et al. Energia e Desenvolvimento Sustentável no Brasil. **Boletim Petróleo, Royalties e Região - Campos dos Goytacazes/RJ - Ano XVI, nº 62**, abr. 2019.

RIPPLE, W. J. et al. World Scientists' Warning of a Climate Emergency. **BioScience**, p. biz088, 5 nov. 2019.

SETYOWATI, A. B. Mitigating Energy Poverty: Mobilizing Climate Finance to Manage the Energy Trilemma in Indonesia. **Sustainability**, v. 12, n. 4, p. 1603, 20 fev. 2020.

SHEN, W. et al. **Multi-objective Urban Electricity Network Transition Considering Generation Retirement**. 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). **Anais...** In: 2019 IEEE POWER & ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING (PESGM). Atlanta, GA, USA: IEEE, ago. 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8973816/>>. Acesso em: 18 nov. 2020

SIEGEL, S. **Estatística não-paramétrica: para as ciências do comportamento**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.

ŠPRAJC, P.; BJEGOVIĆ, M.; VASIĆ, B. Energy security in decision making and governance - Methodological analysis of energy trilemma index. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 114, p. 109341, out. 2019.

SU, W. et al. 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**, v. 28, n. 4, p. 657–669, jul. 2020.

SYAFRIANTO, D. et al. **Optimized Use of Renewable Energy Potential in Maluku Utara Power Systems using Energy Trilemma Concept**. 2020 International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICT-PEP). **Anais...** In: 2020 INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGY AND POLICY IN ENERGY AND ELECTRIC POWER (ICT-PEP). Bandung, Indonesia: IEEE, 23 set. 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9249900/>>. Acesso em: 27 set. 2021

TARKO, A.; KURBATOVA, A.; LLERENA, S. Effect of CO<sub>2</sub> increase on ecological parameters of plant ecosystems of Central and South America countries. **E3S Web of Conferences**, v. 116, p. 00090, 2019.

VIEIRA, E. P. L. et al. **Benefícios Ambientais do Gás Natural no Estado da Bahia**. . In: 3º. CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS. 2004.

VIEIRA, E. P. L. et al. **Benefícios Ambientais do Gás Natural no Estado da Bahia**. Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. **Anais...** In: 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS. Salvador: 2005.

WANG, S.; ZHANG, W.; LIU, L. Study on the Effect of Energy Consumption Structure on Carbon Intensity of Hebei Province from the Perspective of Sensitivity. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 237, p. 042022, 19 mar. 2019.

WDI, W. B. G. **World development indicators**. Washington: WDI, 2018. Disponível em: <<https://datacatalog.worldbank.org/dataset/world-development-indicators>>. Acesso em: 28 dez. 2018.

WEC - WORLD ENERGY COUNCIL. **World Energy Trilemma Index 2018**. Inglaterra: WEC, 2018.

WEC - WORLD ENERGY COUNCIL. **World Energy Trilemma Index 2020**. Londres: WEC, 2020. Disponível em: <[https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World\\_Energy\\_Trilemma\\_Index\\_2020\\_-\\_REPORT.pdf](https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World_Energy_Trilemma_Index_2020_-_REPORT.pdf)>. Acesso em: 7 dez. 2020.

WEC - WORLD ENERGY COUNCIL. **Energy Trilemma Index**. Disponível em: <<https://trilemma.worldenergy.org/#!/energy-index>>. Acesso em: 3 jan. 2022.

WEISS, O. et al. The Swiss energy transition: Policies to address the Energy Trilemma. **Energy Policy**, v. 148, p. 111926, jan. 2021.

YANG, P.; LIANG, X.; DROHAN, P. J. Using Kaya and LMDI models to analyze carbon emissions from the energy consumption in China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 21, p. 26495–26501, jul. 2020.

ZAFEIRATOU, E.; SPATARU, C. Sustainable island power system – Scenario analysis for Crete under the energy trilemma index. **Sustainable Cities and Society**, v. 41, p. 378–391, ago. 2018.