

Energias renováveis e desenvolvimento sustentável nos países dos BRICS

Renewable energies and sustainable development in BRICS countries

Resumo: Esse trabalho analisa a participação da energia renovável na matriz energética do grupo de países dos BRICS com relação aos seus estágios de desenvolvimento e consumo de energia primária. O estudo empregou duas abordagens: Trilema de Energia e Identidade de Kaya. A primeira é um índice que busca um valor que congrega três vetores associados ao uso de energia, que são: segurança no suprimento, acesso para todos e sustentabilidade ambiental. Já a segunda metodologia, a de Kaya, avalia diversos indicadores da matriz energética de um determinado país em um período de tempo, como: intensidade energética, intensidade de dióxido de carbono e crescimento econômico. Os resultados mostraram que não há um comportamento definido entre o desenvolvimento alcançado por um determinado país e a utilização de energia renovável em sua matriz energética. Por outro lado, foi possível constatar ainda que há uma forte correlação entre o índice de desenvolvimento e a posição de um país no ranque do Trilema de Energia.

Palavras-chave: trilema de energia; identidade de Kaya; emissões de CO₂; intensidade energética.

Abstract: This work analyzes the participation of renewable energy in the energy matrix of the BRICS group of countries in relation to their stages of development and primary energy consumption. The study employed two approaches: Energy Trilemma and Kaya Identity. The first is an index that seeks a value that brings together three vectors associated with energy use, which are security of supply, access for all, and environmental sustainability. The second methodology by Kaya assesses several indicators of the energy matrix of a given country in a specific time frame, such as: energy intensity, carbon dioxide intensity, and economic growth. The results induced that there is no defined behavior between the development achieved by a given country and the use of renewable energy in its energy matrix. On the other hand, it was also possible to verify that there is a strong correlation between the development index and the position of a country in the Energy Trilemma ranking.

Keywords: energy trilemma; Kaya identity; CO₂ emissions; energy intensity.

Tiago Ribeiro Espíndola Soares

Mestrando em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão pelo Instituto Federal Fluminense – Campos (IFF). Graduação em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF)

João José de Assis Rangel

Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Professor no Instituto Federal Fluminense – Campos–Centro. E-mail: joao@iff.edu.br

Introdução

As energias renováveis têm sido apresentadas em diversas publicações científicas atuais como uma das principais soluções para o desafio climático global. Nesse contexto, em um recente trabalho, (HARJANNE; KORHONEN, 2019) discutiram como a energia renovável é enquadrada no conceito central de políticas energéticas e analisaram como a sua utilização pode afetar o debate e a condução da política energética. Nesse mesmo trabalho, especificamente, os autores demonstraram, além de outros conceitos, que pode existir uma baixa correlação entre a participação de fontes renováveis nas matrizes energéticas dos diferentes países e suas políticas energéticas sustentáveis. Para isso, consideraram como parâmetro comparativo base o Trilema de Energia.

Especificamente, o conceito de Trilema de Energia está relacionado à avaliação da sustentabilidade energética dos países a partir da segurança no suprimento de energia, além do equilíbrio energético para a população e também, logicamente, da sustentabilidade ambiental (WEC, 2018). Não é de se estranhar que o terceiro lema descrito, sustentabilidade ambiental, tenha um papel de destaque nesse contexto. Assim, é possível encontrar grande quantidade de trabalhos nos quais são analisados aspectos de sustentabilidade, expansão das matrizes energéticas e desenvolvimento econômico.

Como exemplos de estudos recentes sobre desenvolvimento sustentável, pode ser citado o trabalho de Zafeiratou e Spataru (2018). Nele, os autores mostraram os desafios energéticos enfrentados por mais de 100 mil 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, têm-se como resultado os impactos ambientais e problemas econômicos. Em outro trabalho, 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 que, após as privatizações do setor, passaram a usar fontes fósseis importadas. Durante a alta do preço do petróleo nos anos seguintes, os países passaram, então, por racionamento de energia. Segundo Cervantes Bravo *et al.* (2020), o acesso à energia elétrica é a chave para medir a equidade energética.

Nesse contexto, existem diferenças entre países desenvolvidos e em desenvolvimento. Para Ebhota e Tabakov (2018) e Shen *et al.* (2019), com a expansão das cidades, o crescimento populacional e o êxodo rural, os sistemas de energia têm enfrentado problemas, especialmente para atender ao aumento exponencial da demanda de eletricidade. Além disso, é importante destacar o artigo de Asbahi *et*

al. (2019). Os autores evidenciam a dificuldade para se alcançar uma boa avaliação nos três principais critérios do Trilema de Energia. Concluem, então, que a seguridade energética está negativamente correlacionada com a sustentabilidade energética, e, mesmo para os países do topo do ranque, há discrepâncias entre as notas dos três pilares. Conseqüentemente, isso mostra que o desafio energético é grande e vai além de se pensar apenas na substituição de combustíveis fósseis por energia renovável com baixas emissões de dióxido de carbono (CO₂). E isso, normalmente, já seria um esforço hercúleo.

Segundo dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2019), as emissões de CO₂ do setor de energia representam cerca de dois terços do total de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Assim, as reduções dos gases poluentes permanecem no centro do debate da mitigação das mudanças climáticas e representam uma das principais questões a abordar para uma agenda política mais ampla. Historicamente, as emissões de CO₂ estão relacionadas ao desenvolvimento econômico e ao mix do consumo de energia primária. Entretanto, de 1990 a 2017, houve queda de 35% na intensidade energética mundial [quantidade de energia usada para gerar uma unidade de produto interno bruto (PIB)]. Alguns países também têm conseguido crescimento econômico maior que a emissão de GEE, porém sem o suficiente para atingir as metas globais de redução de poluentes (IEA, 2019).

Assim, diante do que foi exposto, este trabalho tem como objetivo analisar a participação da energia renovável em relação ao desenvolvimento e à sustentabilidade energética para o grupo de países dos BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul). Para isso, o texto foi organizado da seguinte forma: a próxima seção apresenta a revisão de literatura, que mostra o estado da arte e alguns conceitos relativos ao tema. Na seção 3, está descrita a metodologia usada neste trabalho. A seção 4 apresenta os resultados, e a seção 5, as conclusões. Por fim, a seção 6 descreve as referências.

Revisão de literatura

Essa seção apresenta uma breve descrição sobre Trilema de Energia e Decomposição de Kaya. As duas abordagens foram escolhidas para poder avaliar o ranque dos países a partir do Trilema de Energia e compará-los com os determinantes obtidos no método de Kaya (em que se obtêm forças motrizes, como: população, atividade econômica, eficiência energética e estrutura energética). Assim, é possível avaliar aspectos da matriz energética em relação à economia, demografia e fatores ambientais.

Trilema de energia

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

Para o cálculo da nota do Trilema de Energia de cada país, são usados 13 indicadores agrupados em quatro dimensões. Cada uma das três dimensões já citadas tem 30% de peso na nota final, com os 10% restantes inseridos no contexto de cada país. Os principais indicadores são: dependência de importação, diversidade da geração de energia elétrica e armazenamento de energia para segurança 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 CO₂ per capita para sustentabilidade ambiental; e estabilidade macroeconômica, eficácia do governo e capacidade de inovação para o contexto do país. (WEC, 2018).

A equidade diz respeito à acessibilidade de energia para toda população e está relacionado com a parte econômica da nação. Muitas pessoas não têm acesso a 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

forte dependência de combustíveis fósseis, porém, uma mudança para uma matriz energética de baixo carbono, com o uso de energia solar e eólica, por exemplo, se torna um desafio pela necessidade de maiores investimentos, podendo condenar parte da população mundial à pobreza energética (HARJANNE; KORHONEN, 2019). Para que os três pilares do Trilema de Energia sejam atendidos, se faz necessário pesquisa e desenvolvimento em energias renováveis (EBHOTA; JEN, 2020).

De uma maneira geral, a segurança 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, 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).

Brown *et al.* (2014) definem a segurança energética como “fornecer de forma equitativa serviços de energia disponíveis, acessíveis, confiáveis, eficientes, ambientalmente benignos, governados de forma proativa e socialmente aceitáveis para os usuários finais”. Nesse sentido, entende-se que a segurança energética deve vir acompanhada de sustentabilidade ambiental e igualdade social (LIMA *et al.*, 2015).

A sustentabilidade ambiental está relacionada com a redução da intensidade energética, intensidade de CO₂ e transição para fontes renováveis de baixo carbono. A mudança climática é um dos principais problemas enfrentados pela sociedade. O aumento da emissão de gases do efeito estufa (GEE), principalmente o CO₂, tem causado o aquecimento global. A região da América Latina e Caribe tem uma das maiores emissões de dióxido de carbono como resultado de ações de mudança de uso da terra, principalmente o desmatamento (TARKO; KURBATOVA; LLERENA, 2019). No Brasil, em 2018, 44% das emissões de CO₂ equivalente foram por mudança de uso da terra (ANGELO; RITTLL, 2019).



DOUTORADO
COM LINHA DE PESQUISA EM PLANEJAMENTO
E DESENVOLVIMENTO REGIONAL

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 CO₂ e relacioná-las com a população, PIB e energia primária (KAYA; YOKOBORI, 1998). Esse método carrega o conceito de que as emissões de CO₂ são influenciadas, e assim, decompostas matematicamente, pelo crescimento econômico, populacional e de energia primária, além de relações com economia e política. A partir de gráficos, é possível analisar qual o caminho percorrido pelo país e sua tendência em relação à emissão de CO₂, e qual variável tem maior influência no dióxido de carbono (YANG; LIANG; DROHAN, 2020).

A decomposição de Kaya é representada pela equação (1):

$$C = P \cdot \frac{PIB}{P} \cdot \frac{E}{PIB} \cdot \frac{C}{E}$$

em que:

C: emissões de CO₂ (Mton)

PIB: produto interno bruto (US\$)

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

P: população (habitantes)

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

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

C/E: intensidade carbônica (Mton CO₂/ktep)

Baseado na Identidade de Kaya, o aumento das emissões de CO₂ se devem, principalmente, a quatro fatores: crescimento econômico, ineficiência energética, alto uso de energia baseada em carbono e grande participação de atividades de alto uso energético na economia. A literatura recente indica que o aumento da eficiência energética e de escolhas mais ecológicas são determinantes para o controle das emissões de CO₂. Entretanto, a atividade econômica e a intensidade energética continuam sendo os fatores mais importantes (PUI; OTHMAN, 2019).

Métodos

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 CO₂. Também, a partir do Relatório de Trilema de Energia de 2018, elaborado pelo WEC, com a posição de cada país no

ranque. Os países selecionados são os do grupo dos BRICS. Foi avaliada a participação das fontes renováveis na matriz energética dos países, de 1990 e 2018, a partir da seguinte classificação: fóssil (petróleo, gás natural e carvão), renovável (solar, eólica, hidroenergia, biomassa e resíduos) e nuclear. Foi feita a análise da emissão de CO₂ em função da população para 2018. E também da emissão per capita em função do CO₂/PIB, comparando os anos de 1990 e 2018, estudando o avanço de cada nação em relação a esses indicadores. A partir delas, foi possível comparar a posição relativa de cada país e seu impacto no mundo no que se refere às emissões de dióxido de carbono.

Foi feita uma avaliação da posição do país no ranque de Trilema de Energia, a fração do uso de energia renovável na matriz energética, e seu Índice de Desenvolvimento Humano (IDH).

Também foi realizada a decomposição de Kaya para análise da energia primária e as emissões de CO₂ com o crescimento populacional e econômico dos países, entre 1990 e 2018, 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 CO₂ (Mt CO₂/tep), energia primária (tep), população e emissões totais de CO₂ (Mt CO₂). 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.

Resultados e discussão

Esta seção apresenta uma caracterização dos países componentes dos BRICS, considerando as características de suas matrizes energéticas, populações, emissões de CO₂ e PIB. Além disso, aborda o Trilema de Energia e sua relação com as fontes renováveis e o IDH dos países. Por último, a análise ainda busca contrastar esses dados com os determinantes obtidos pela Decomposição de Kaya.

Além dos países do grupo em estudo, foram incluídos, para efeito comparativo, os dados dos países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), mundo, valor global dos BRICS e os dez mais do ranque de Trilema de Energia.

População e emissões de CO₂

A Figura 1 apresenta os cinco países dos BRICS considerando as suas populações e as respectivas emissões de CO₂ (em 2018). Estão descritos os valores absolutos nos eixos e a razão, em toneladas de CO₂ per capita. Dessa forma, quando se observam os valores absolutos no sistema de

coordenadas, é possível comparar os países em termos dimensionais e seus respectivos impactos no âmbito global. Por outro lado, quando se observa, também, a razão entre as grandezas, de forma per capita, o valor obtido proporciona uma informação de caráter mais comportamental dos habitantes desses países e como eles impactam nas respectivas emissões gasosas.

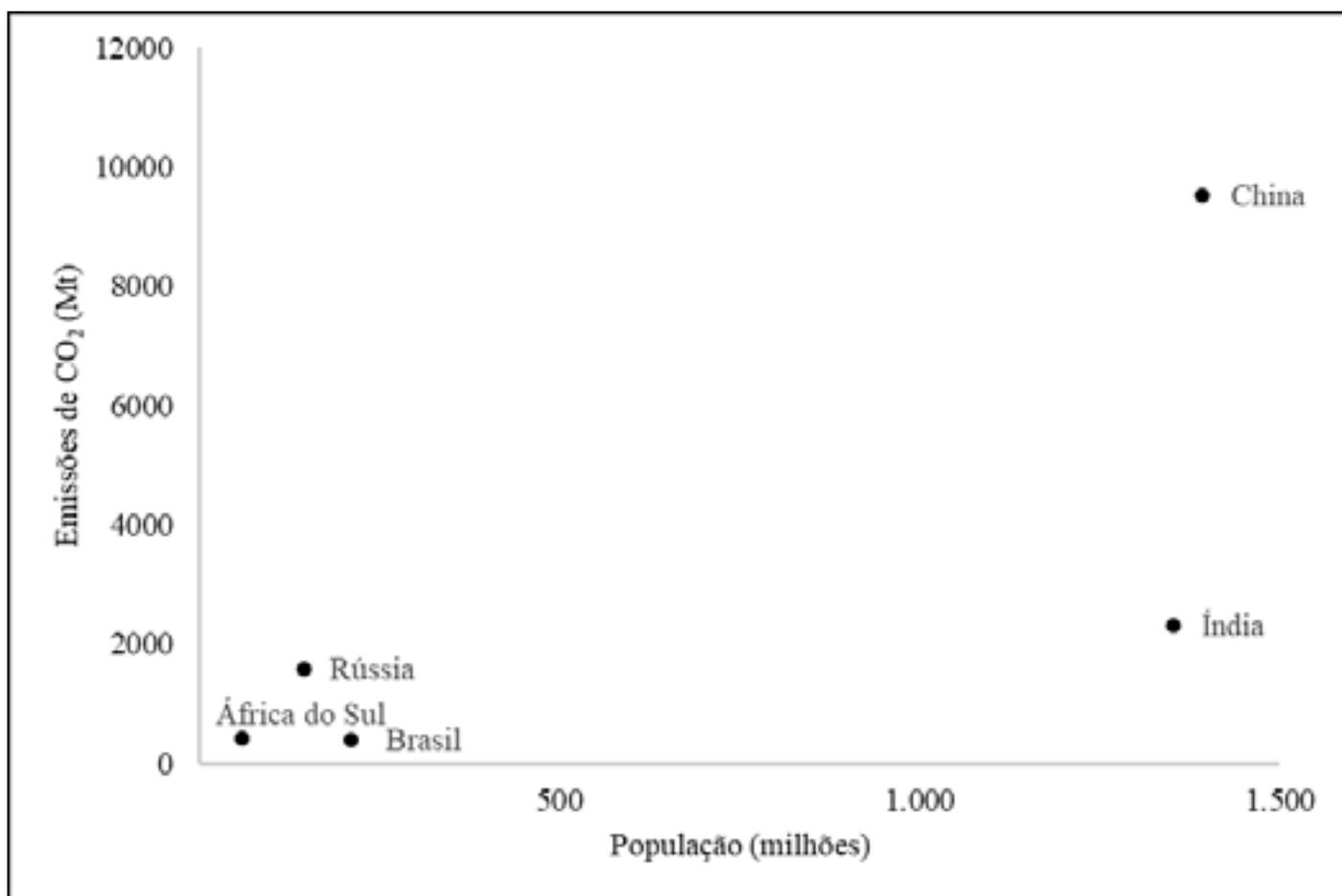
Observe que não há, de forma clara, uma relação de proporcionalidade entre os países do grupo, nem tão pouco uma correlação entre eles. Isso considerando tanto os valores absolutos como os relativos. Conseqüentemente, fica claro que existe uma grande distinção entre os países no que se refere às emissões de CO₂.

No eixo demográfico, China e 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 58 milhões (África do Sul) ao máximo de 209 milhões de habitantes (Brasil). Já no eixo das emissões de CO₂, apenas a China possui um valor discrepante dos demais e bem superior aos outros países, com 9.582 Mt CO₂. As emissões dos demais países do grupo variam de 428 Mt CO₂ (África do Sul) a 2.317 Mt CO₂ (Índia).

Observando agora o valor obtido da relação das emissões de CO₂ pela população, pode-se notar a grande variação entre os países com um fator de mais de seis vezes para os extremos: Índia (1,71 t CO₂/cap) e Rússia (10,98 t CO₂/cap). A China, por sua vez, apesar da enorme população e de altos valores para as emissões de CO₂, não possui um valor tão alto para emissões de seus habitantes. Ou seja, as emissões de CO₂ dos chineses têm um valor próximo à média do grupo, com 6,84 t CO₂/cap.

Figura 1: Países dos BRICS – população e emissões de CO₂, em 2018



País	IND	BRA	CHN	ZAF	RUS
Emissões per capita (t CO ₂ /cap)	1,71	1,94	6,84	7,41	10,98

Fonte: IEA, 2020. Ostras, 2021.

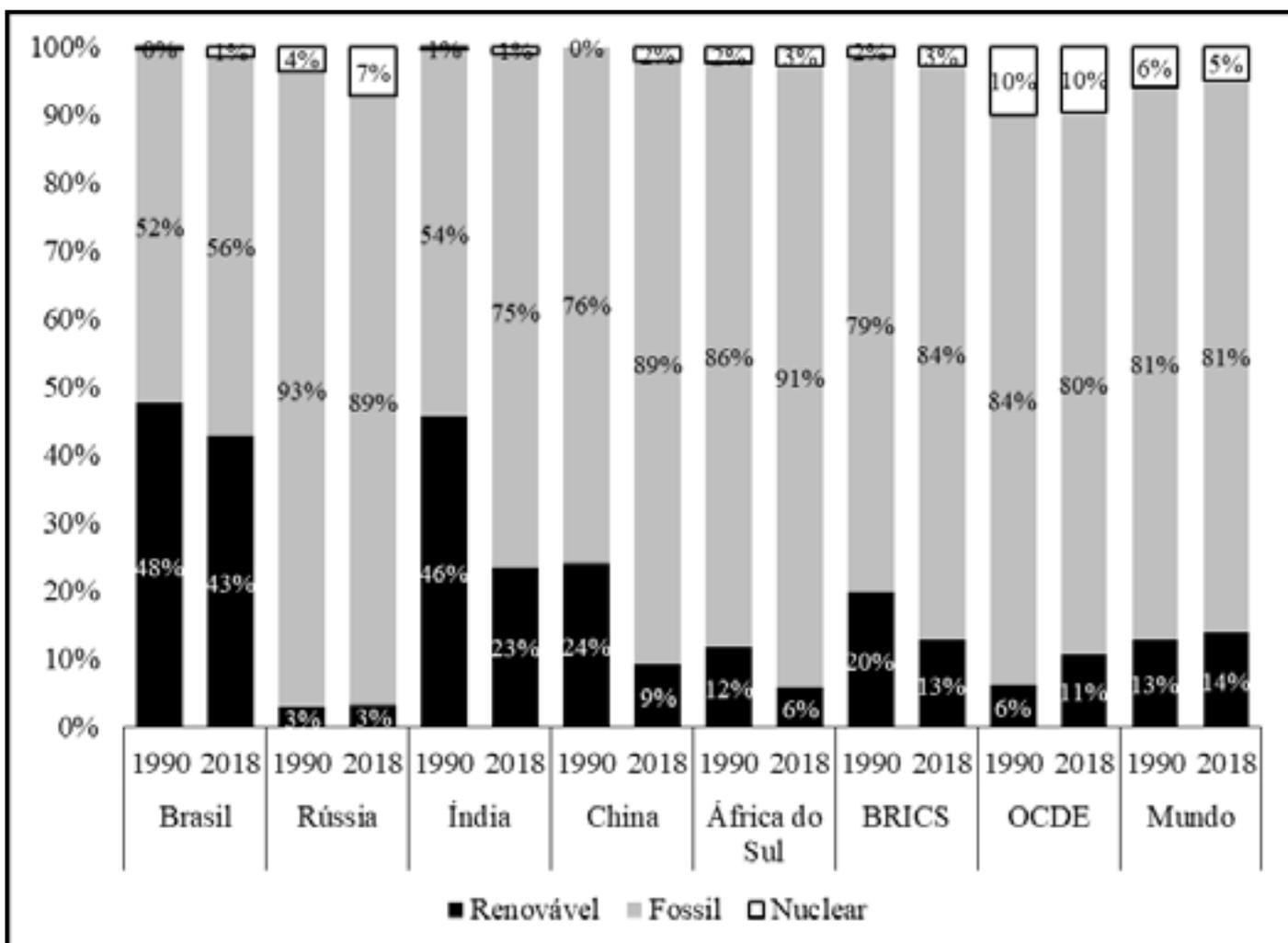
Participação dos combustíveis renováveis na matriz energética

A seção anterior caracterizou os países do grupo em relação às emissões de CO₂ e suas respectivas populações. Já esta seção apresenta, em termos percentuais, as participações dos tipos de energia primária (fóssil, renovável e nuclear) no suprimento total de energia de suas matrizes energéticas para 1990 e 2018 (Figura 2). Foi incluído ainda, para efeito comparativo, o valor total dos países que compõem os BRICS bem como da OCDE e mundo.

Observe a preponderância da participação de energia fóssil de todos os países. Note, na parte esquerda da Figura 2, os dois valores extremos para a fração de energia fóssil, no caso, Brasil (56%) e Rússia (89%), em 2018. Conseqüentemente, esses mesmos dois países apresentam, também, os valores extremos para o uso total de energia renovável, no caso, Brasil (43%) e Rússia (3%), também para 2018. Veja também que nenhuma nação aumentou o uso de fontes renováveis no período descrito.

A energia nuclear continua sendo pouco utilizada, tendo aumentado apenas na Rússia, saindo de 4% para 7%, e

Figura 2: Participação das fontes primárias na matriz energética



Fonte: IEA, 2020.

tendo maior participação na OCDE, com 10% em ambos os anos descritos.

Os valores mostram, ainda, que os países do grupo da OCDE buscaram, nesse período, diminuir a dependência de fontes fósseis de 84% para 80%. Essa diminuição foi compensada pelo aumento da participação de fontes renováveis de 6% para 11%, quase o dobro do valor. A matriz mundial não apresentou mudanças significativas, tendo ainda forte dependência das fontes fósseis, com 81%. Mesmo assim,

vale destacar o pequeno acréscimo das fontes renováveis de 13% para 14%. Enquanto os BRICS diminuíram a participação de renovável de 20% para 13% e aumentou a de fósseis de 79% para 84%, contrário da tendência mundial.

Análise CO₂/PIB x CO₂/Cap

A Figura 3 descreve a relação das emissões de CO₂ por PIB em função das emissões per capita dos países dos BRICS, OCDE e mundo para 1990 e 2018. A Figura apresenta ainda os valores percentuais do PIB e emissões de CO₂. Além disso, foi colocada também uma seta em cada país com a origem no ano de 1990 em direção ao ano de 2018. O fato de a seta apontar para próximo da origem dos eixos (ponto 0,0) demonstra que a população e o PIB têm valores com tendência de aumentar mais que os das emissões de CO₂, o que é o recomendável.

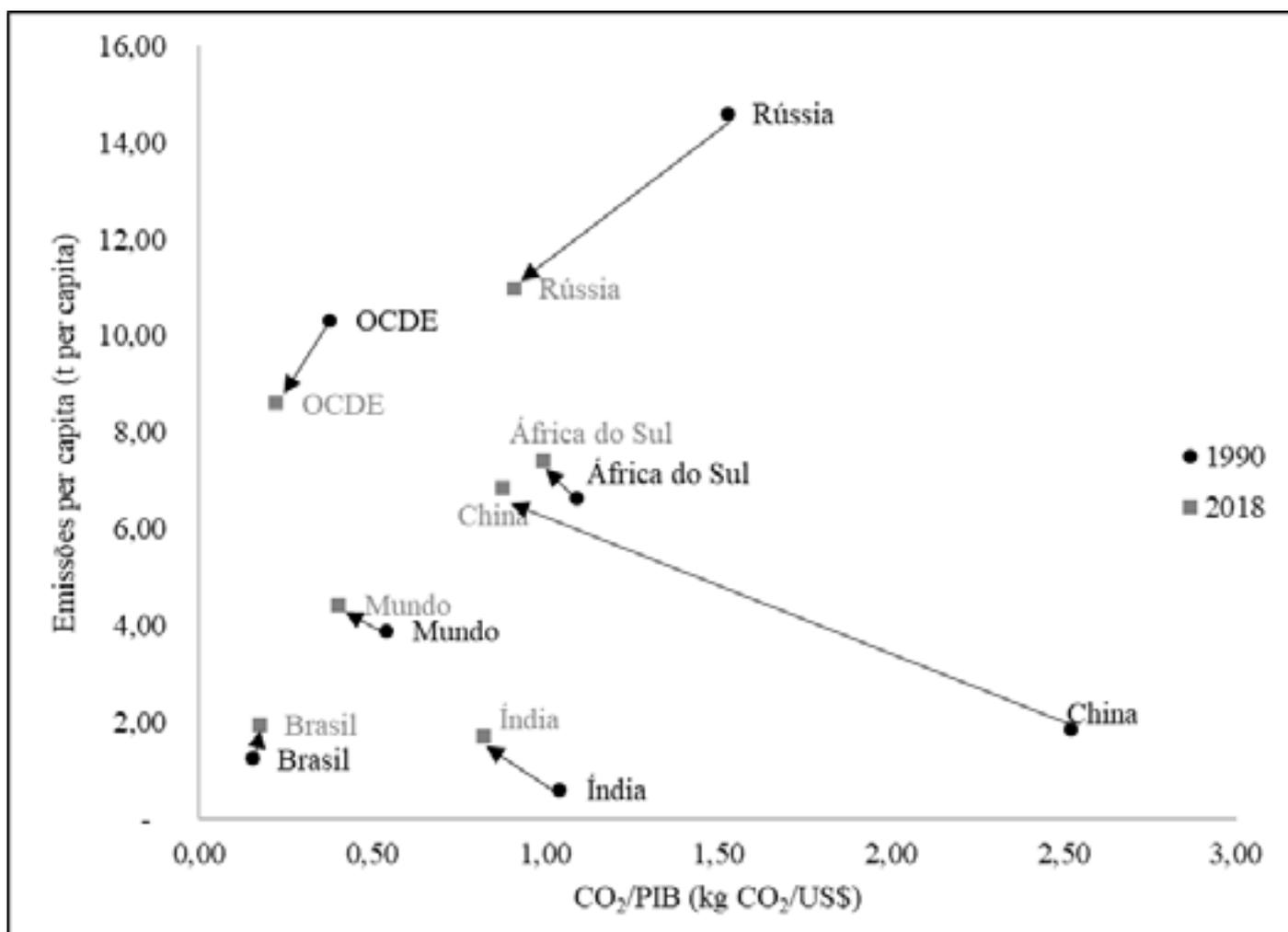
É possível destacar a posição de Rússia e China em 1990 e a grande diferença para 2018, representada pelo elevado tamanho das setas. O primeiro país apresentava, em 1990, um alto valor de emissões per capita, de 14,6 toneladas de CO₂ por pessoa, enquanto

o segundo, um alto número de emissão por PIB, de 2,52 kg de CO₂ por dólar.

A Rússia juntamente com a OCDE foram os únicos que conseguiram melhoria 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 CO₂/US\$ para 0,17 kg CO₂/US\$ e de 0,24 t CO₂ per capita para 1,94 t CO₂ per capita, distanciando-se da origem. Entretanto, apesar da piora, em 2018, Brasil e Índia foram os países que, proporcionalmente, menos contribuíram para a emissão de CO₂. Ambos permaneceram abaixo da média mundial, de 4,41 toneladas de dióxido de carbono por habitante.

Figura 3: Emissões per capita em função das emissões por PIB



País	CHN	IND	BRA	RUS	ZAF	Outros
% PIB	13,1	3,4	2,8	2,1	0,5	78,1
% CO ₂	28,4	6,9	1,2	4,7	1,3	57,4

Fonte: IEA, ZUZU.

A China é o país do grupo de maior PIB (13,7% do PIB mundial), também o mais poluidor (28,4%). Sendo assim, possui um alto valor de emissões por PIB, de 0,88 kg CO₂/US\$, juntamente com Rússia (0,91 kg CO₂/US\$), África do Sul (1,00 kg CO₂/US\$) e Índia (0,82 kg CO₂/US\$). Nesse contexto, o Brasil é o único que tem maior fração de PIB (2,8%) do que de emissão de CO₂ (1,2%), resultando em um baixo valor para este indicador, de 0,17 kg CO₂/US\$.

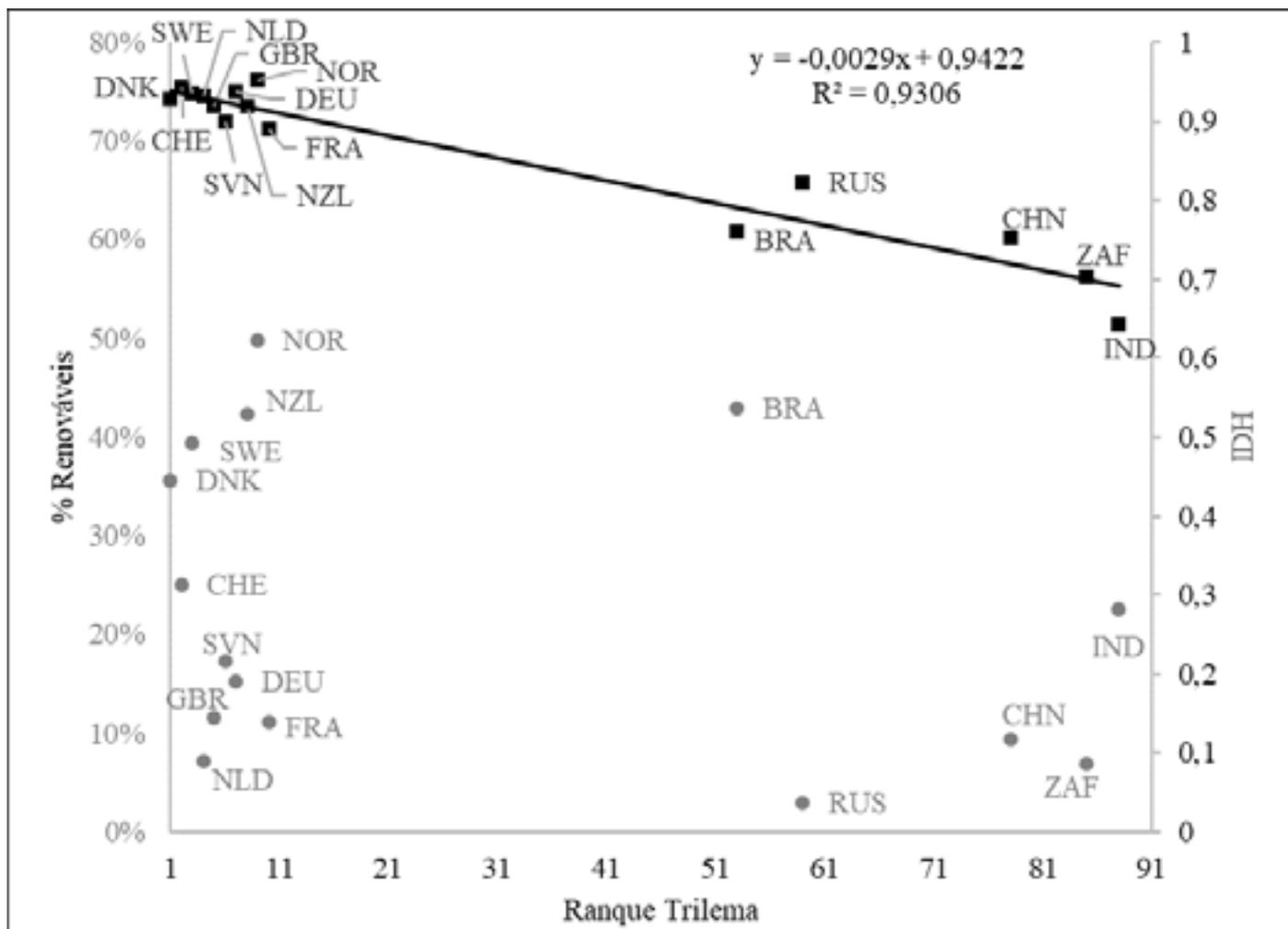
Trilema de Energia, IDH e energia renovável

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 (ranque do IDH) e, segundo, com relação às participações percentuais de energia renovável em suas respectivas matrizes energéticas. Para isto, foi construído o gráfico da Figura 4 (com dados de 2018). O eixo da abscissa descreve o ranque do Trilema de Energia, já no eixo da ordenada

esquerda, está a participação dos renovável e, no eixo da ordenada direito, a posição no ranque do IDH. Para efeito comparativo, além dos países dos BRICS, foram incluídos os dez mais do ranque do Trilema de Energia. Note que cada país aparece na Figura duas vezes, ou seja, para cada posição do ranque do Trilema de Energia, um determinado país aparece com o valor do IDH e também da porcentagem de renovável.

Na parte inferior da Figura 4 (abaixo de 50%), podem-se ver os países com relação ao Trilema de Energia e a participação de energia renovável. Observe 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 mais, possuem participações bem diferentes de energias renovável em suas matrizes, com valores que variam de menos de 10% a quase 50% de renovável. No grupo de países dos BRICS, o Brasil se destaca com quase 50% de participação de renovável. No grupo dos dez primeiros, a Noruega se sobressai com quase 50% também.

Figura 4: Fração de energia renovável e IDH em função do ranque de trilema de energia.



É possível observar uma relação direta entre o IDH e a posição no ranque. O coeficiente de correlação linear (R^2) foi de 0,93, o que indicou uma forte dependência entre as variáveis, em que, à medida que se aumentam as posições, o IDH cresce. Entretanto, o mesmo não ocorre com o uso de energia renovável e a classificação baseada no Trilema de Energia. Sendo assim, os países líderes do ranque que possuem alto índice de desenvolvimento humano estão agrupados no canto superior esquerdo (quadrados), porém não necessariamente têm um alto uso de energia renovável; estão dispersos no lado esquerdo (círculos). Os países Holanda, Reino Unido, Eslovênia, Alemanha e França, inclusive, apresentam um baixo valor para esse indicador, variam entre 7% e 17%, estão próximos do valor mundial, que foi de 14% em 2018.

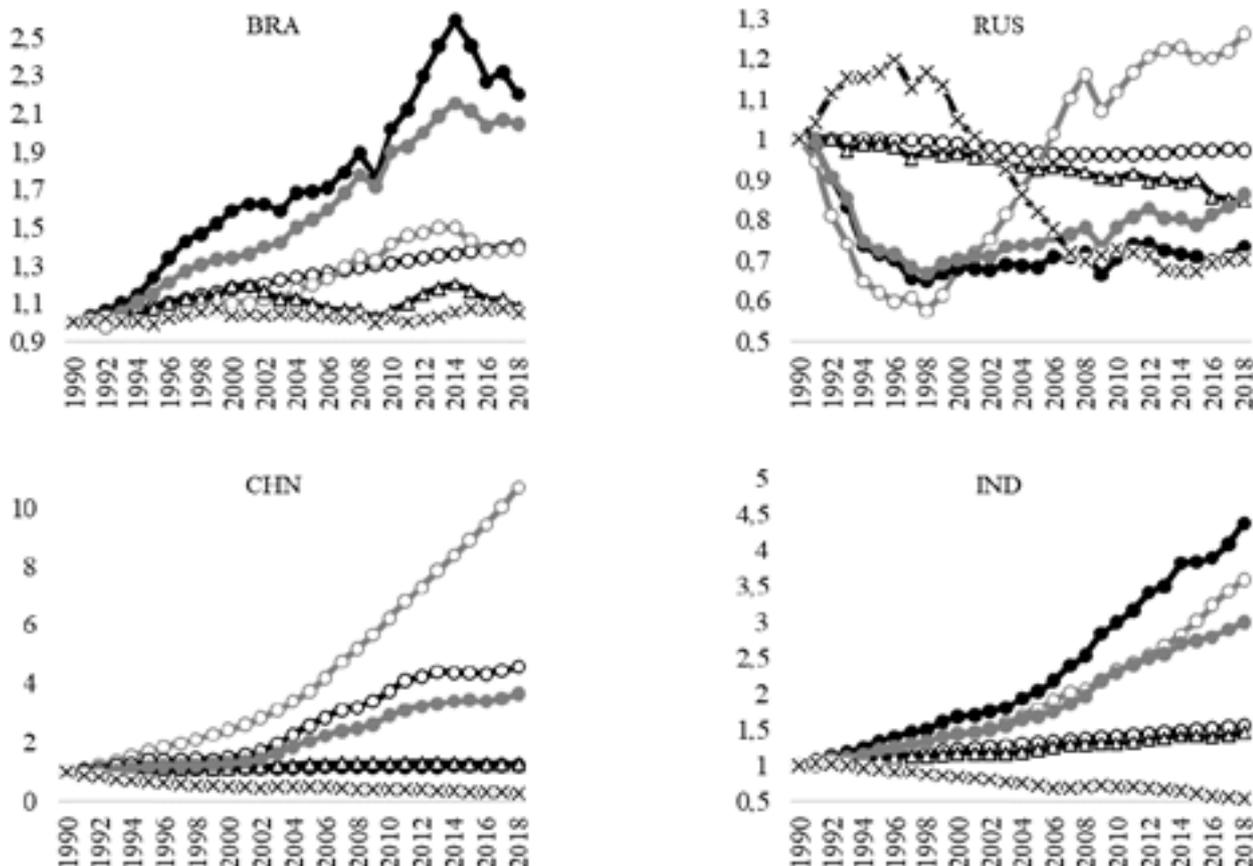
O gráfico mostra a diferença do grupo dos BRICS em relação aos 10 primeiros do ranque; estão distantes dos líderes, variam entre as posições 53 (Brasil) e 88 (Índia). O grupo está posicionado no canto inferior direito, numa região de baixo uso de energia renovável. O Brasil tem a melhor posição dentro do grupo; se distanciam da região ocupada por este devido ao alto uso de energia renovável, de 43%.

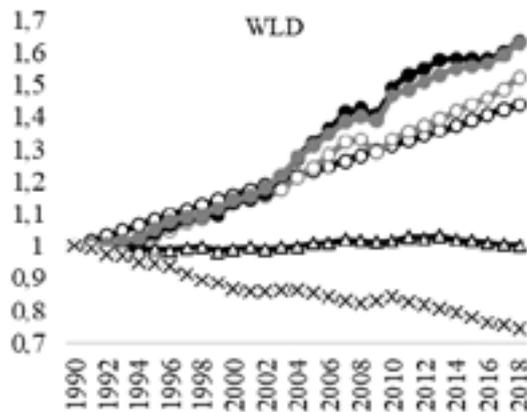
Forças motrizes de Kaya

A Figura 5 apresenta as forças motrizes de Kaya para os países dos BRICS, OCDE e mundo. Numa primeira análise grupal, os países dos BRICS, no geral, apresentaram aumento populacional, o que resultou em acréscimo no gasto de energia primária e nas emissões de dióxido de carbono.

Os indicadores intensidade de CO_2 e intensidade energética não variaram significativamente entre 1990 e 2018, tendo curvas características de países em desenvolvimento. Já o grupo OCDE apresenta uma curva característica de países desenvolvidos, com queda na intensidade energética e intensidade de CO_2 . A curva das emissões de dióxido de carbono acompanha a curva de energia primária, que cresceu até a crise de 2008 e, então, passou a cair. Por último, a curva mundial mostra linhas mais retas, com exceção para a descontinuidade em 2009. A intensidade de CO_2 não se alterou, porém, a intensidade energética caiu consideravelmente. Para o gráfico global, já eram esperadas linhas mais retas, visto que é difícil conseguir uma mudança considerável em nível mundial.

Figura 5: Forças motrizes de Kaya





- População
- PIB per capita (US\$ per capita)
- △— Intensidade de CO₂ (t CO₂/tep)
- Emissão de CO₂ (Mt CO₂)
- Energia primária (ktep)
- ×— Intensidade energética (tep/US\$)

Fonte: IEA, 2020

Fazendo uma análise mais específica por país, podemos ver que o Brasil apresentou aumento na energia primária, que foi acompanhado pelo aumento de emissão de CO₂, enquanto os outros indicadores não variaram significativamente. A Rússia foi o único país que apresentou grande queda no seu PIB per capita e aumento na intensidade energética na década de 1990. Isso ocorreu possivelmente por conta de

instabilidades políticas pelo fim da União Soviética, que causaram grande variação no PIB. No entanto, esses indicadores inverteram sua tendência no final dos anos 1990. A Índia teve acréscimo na energia primária e nas emissões de CO₂, e crescimento no PIB per capita. No período, a China teve grande aumento populacional, de quase quatro vezes, e de emissões de CO₂, indicadores que se estabilizaram a partir de 2012. Porém, o maior

MESTRADO

PESQUISA OPERACIONAL E INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL

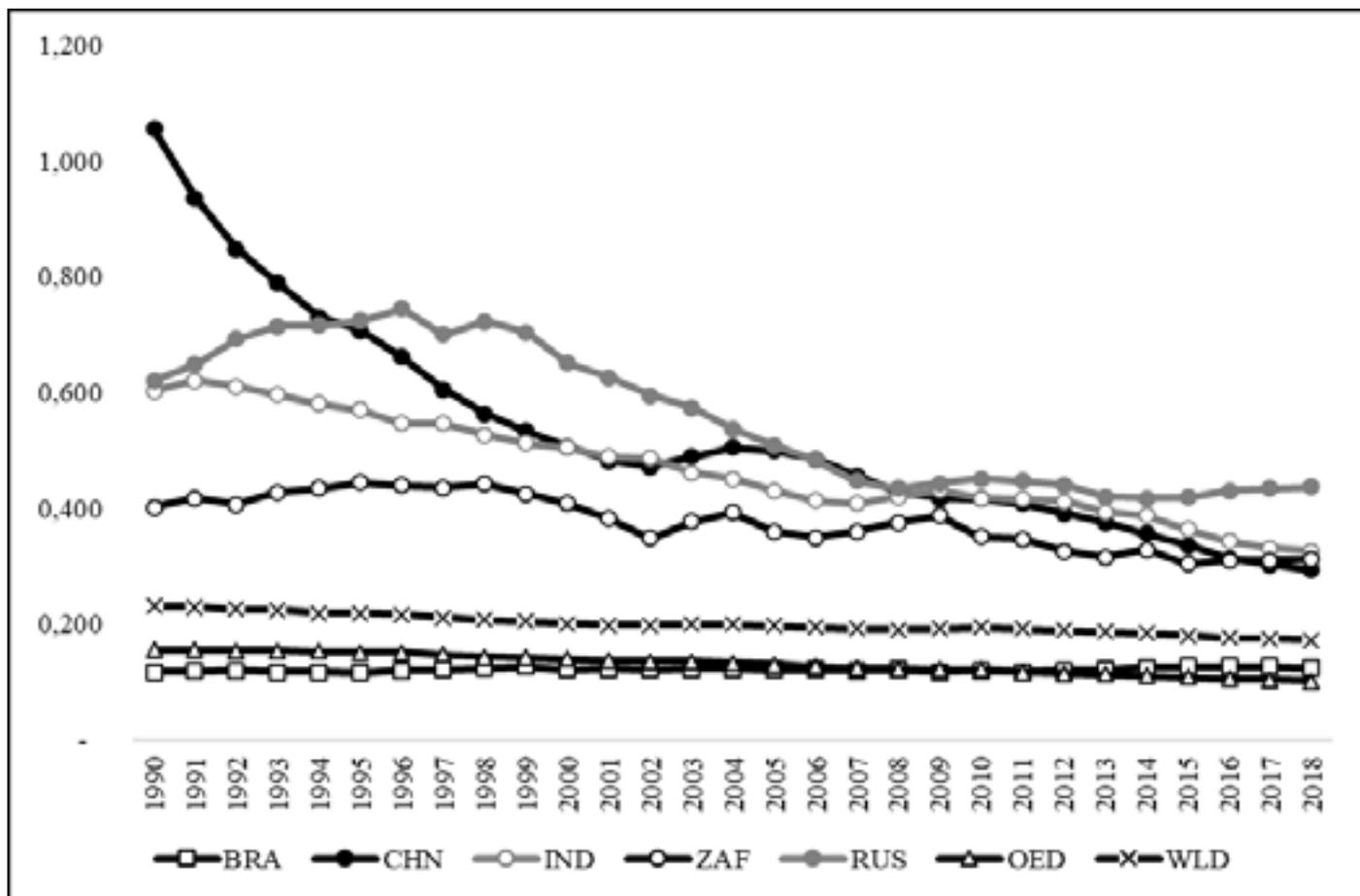
LINHA DE PESQUISA EM SAÚDE

UNIVERSIDADE CANDIDO MENDES

destaque é para o seu PIB per capita, que aumento em 10 vezes de 1990 para 2018. Já a África do Sul mostra muitas instabilidades e descontinuidades, com exceção da população, que cresceu em um ritmo constante. Juntamente com a Rússia, foi o único país que conseguiu diminuir consideravelmente a intensidade energética.

A Figura 6 apresenta a variação da intensidade energética em função do tempo, de 1990 a 2018, para os países estudados, OCDE e mundo.

Figura 6: Intensidade energética (tep/US\$) em função do tempo



Fonte: IEA, 2020.

O país mais destacado é a China, que conseguiu diminuir sua intensidade energética de 1,055 tep/tri US\$ para 0,294 tep/tri US\$, uma queda de 72%. Foi seguido por Rússia e Índia, que também obtiveram êxito na diminuição, de 0,621 tep/tri US\$ para 0,437 tep/tri US\$ (-30%), e de 0,602 tep/tri US\$ para 0,326 tep/tri US\$ (-46%), respectivamente. Os outros grupos e países, apesar de mostrarem variações para cima e para baixo ao longo do tempo, de 1990 para 2018, não tiveram muita diferença no valor da intensidade energética. O Brasil foi o único que apresentou aumento, saindo de 0,118 tep/tri US\$ para 0,124 tep/tri US\$ (+5%). A média mundial saiu de 0,231 tep/tri US\$ para 0,172 tep/tri US\$ (-26%). A OCDE apresentou o menor valor (0,102 tep/tri US\$), enquanto a Rússia, o maior (0,437 tep/tri US\$) ao final da análise.

Considerações finais ou conclusões

Este trabalho buscou fazer um estudo da participação da energia renovável em relação ao desenvolvimento e à sustentabilidade energética para os países dos BRICS. Para isso, foram utilizados dados disponíveis no portal da Agência Internacional de Energia e o Relatório de Trilema de Energia, elaborado pelo WEC. Aqui, vale destacar que o conceito de sustentabilidade energética não envolve apenas a questão ambiental em si, como pode-se pensar num primeiro momento, mas também seguridade e equidade energética.

Foi visto que existem diferenças entre os países dos BRICS no que se refere a emissões per capita, matriz energética e emissões por PIB. Vale destacar

a participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira. Ou seja, o percentual brasileiro foi de 43% para 2018, bem maior que para os outros países dos BRICS, OCDE e mundo. Apesar da piora ao longo do período analisado, o Brasil ainda é, de longe, o país com melhores indicadores de participação de energia limpa.

Podem-se observar também as diferenças nos indicadores dos países desenvolvidos para os países em desenvolvimento. Os primeiros, aqui representados pelo grupo da OCDE, apresentam diminuição de intensidade energética, intensidade de CO₂ e, nos últimos anos, também queda nas emissões de CO₂, o que é ótimo do ponto de vista ambiental. Entretanto, os países em desenvolvimento mostram aumento das emissões de CO₂, apesar da melhoria nos indicadores de intensidade energética e PIB per capita. Apesar da importância da segurança e equidade energética, pode-se argumentar que a redução das emissões de carbono é a prioridade global da política energética no momento.

Aparentemente, não existe um padrão entre desenvolvimento e participação de energia renovável nas matrizes energéticas dos países. Como exemplo, temos o Brasil que, com alto uso de energia renovável, não tem um IDH alto. Além disso, nações com alto índice

de desenvolvimento não possuem, necessariamente, alto uso de fontes renováveis, como Holanda, Reino Unido, Eslovênia, Alemanha e França.

Assim, este trabalho mostrou que países com alto IDH apresentam um sistema de suprimento de energia mais bem avaliado, representado aqui pela nota do Trilema de Energia, apesar de não terem, surpreendentemente, alta participação de energias renováveis. Como foi dito, a avaliação do Trilema de Energia não passa somente pela sustentabilidade ambiental, mas também pela equidade e segurança 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 não tem um impacto muito forte no Trilema de Energia. Até mesmo porque outros indicadores, como intensidade energética, que está relacionada com eficiência e tecnologia, são usados para avaliar a sustentabilidade ambiental.

Portanto, em um mundo onde a energia renovável é frequentemente considerada uma solução-chave para as mudanças climáticas, a pergunta que fica é: como temos nos saído na redução das emissões de gases poluentes? A resposta é: precisa melhorar, e logo.



VAGAS LIMITADAS

DOUTORADO

COM LINHA DE PESQUISA EM PLANEJAMENTO
E DESENVOLVIMENTO REGIONAL



UNIVERSIDADE
CANDIDO
MENDES

Referências

- 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**, [s.l.], v. 53, p. 1132–1136, 2016.
- ANGELO, C.; RITTL, C. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas do Brasil**. [s.l.]: SEEG, 2019.
- 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**, [s.l.], v. 5, p. 704–713, nov. 2019.
- BROWN, M. A. *et al.* Forty years of energy security trends: A comparative assessment of 22 industrialized countries. **Energy Research & Social Science**, [s.l.], v. 4, p. 64–77, dez. 2014.
- CERVANTES BRAVO, R. J. *et al.* A Sustainable Future Under Energy Intensity Scenarios-Peru's Compliance with COP24 in an Energy Trilemma Environment. *In: SPE LATIN AMERICAN AND CARIBBEAN PETROLEUM ENGINEERING CONFERENCE*, 2020, Virtual.
- DAI, S.; ZHANG, M.; HUANG, W. Decomposing the decoupling of CO₂ emission from economic growth in BRICS countries. **Natural Hazards**, [s.l.], n. 84, p. 1055 – 1073, 2016.
- 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**, [s.l.], v. 13, n. 4, p. 311–319, 1 dez. 2018.
- GENT, D.; TOMEI, J. Electricity in Central America: Paradigms, reforms and the energy trilemma. **Progress in Development Studies**, [s.l.], v. 17, n. 2, p. 116–130, abr. 2017.
- HARJANNE, A.; KORHONEN, J. M. Abandoning the concept of renewable energy. **Energy Policy**, [s.l.], v. 127, p. 330–340, abr. 2019.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy efficiency indicators**. France: [IEA], 2019.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Data and statistics**. France: [IEA], 2020.
- KAYA, Y.; YOKOBORI K. **Environment, energy, and economy: strategies for sustainability**. Tokio: United Nations University Press, 1998.
- LIMA, F. *et al.* Analysis of energy security and sustainability in future low carbon scenarios for Brazil. **Natural Resources Forum**, [s.l.], v. 39, n. 3–4, p. 175–190, ago. 2015.
- PUI, K. L.; OTHMAN, J. The influence of economic, technical, and social aspects on energy-associated CO₂ emissions in Malaysia: An extended Kaya identity approach. **Energy**, [s.l.], v. 181, p. 468–493, ago. 2019.
- SETYOWATI, A. B. Mitigating Energy Poverty: Mobilizing Climate Finance to Manage the Energy Trilemma in Indonesia. **Sustainability**, [s.l.], v. 12, n. 4, p. 1603, 20 fev. 2020.
- SHEN, W. *et al.* Multi-objective Urban Electricity Network Transition Considering Generation Retirement. 2019 *In: IEEE POWER & ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING*, 2019, Atlanta, GA, USA. Disponível em: <https://www.pes-gm.org/2019/>. Acesso em: 15 jun. 2021.
- ŠPRAJC, P.; BJEGOVIĆ, M.; VASIĆ, B. Energy security in decision making and governance - Methodological analysis of energy trilemma index. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 114, p. 109341, out. 2019.
- TARKO, A.; KURBATOVA, A.; LLERENA, S. Effect of CO₂ increase on ecological parameters of plant ecosystems of Central and South America countries. **E3S Web of Conferences**, [s.l.], v. 116, p. 00090, 2019.
- WORLD ENERGY COUNCIL. **World Energy Trilemma Index 2018**. England: World Energy Council, 2018.
- 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**, [s.l.], 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**, [s.l.], v. 41, p. 378–391, ago. 2018.