



Análise da eficiência energética nos países do BRICS: um estudo envolvendo a Análise por Envoltória de Dados

Energy efficiency analysis of BRICS countries: a study using Data Envelopment Analysis

Flávia de Castro Camioto¹
Daisy Aparecida do Nascimento Rebelatto²
Roberta Teixeira Rocha²

Resumo: Num período de mudanças climáticas e restrições a emissões cada vez maiores, é importante focar o desenvolvimento das nações na direção de uma economia de baixo carbono. Neste contexto, o crescimento do consumo de energia tornou-se um problema grave; logo, medidas que garantam a eficiência energética tornaram-se prioritárias para qualquer nação que esteja disposta a desenvolver sua economia. Considerando que o grupo do BRICS tem apresentado rápido desenvolvimento econômico e desempenhado importante papel na economia mundial, este trabalho teve como principal objetivo medir e analisar a eficiência energética total de fatores nos países que compõem o BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul), propiciando informações sobre países *benchmark* dentro desse grupo e sobre como o Brasil se encontra nesse cenário. Para isso, foi utilizada a Análise Envoltória de Dados (DEA), modelo SBM variante e análise de janela, e, a partir das folgas fornecidas por esta ferramenta, foi calculado o índice de eficiência energética total de fatores (EETF) para os países analisados. Como *inputs* foram utilizados a formação bruta de capital fixo, trabalho e consumo energético e como *outputs*, a emissão de CO₂ (*output* indesejável) e o Produto Interno Bruto – PIB (*output* desejável). A partir dos resultados, observou-se que o Brasil é o país com melhor índice de EETF dentro do BRICS, seguido por África do Sul, China, Índia e Rússia.

Palavras-chave: DEA; BRICS; Eficiência energética total de fatores.

Abstract: *In a period of climate change and increased restriction of emissions, it is pivotal to focus on the development of countries towards an economy revolved on low carbon dioxide levels. The increase of energy consumption has become a serious problem; consequently, measures to ensure energy efficiency became a priority for any nation willing to develop their economy. Whereas the BRICS group has shown rapid economic development and played an important role in the world economy, this work aimed to measure and analyze total factor energy efficiency in BRICS countries (Brazil, Russia, India, China and South Africa), providing information on benchmark countries within this group and on how Brazil is situated in this scenario. To this end, Data Envelopment Analysis (DEA), Slack-based Measure (SBM) and variant analysis window were used; from the slacks provided by this tool, the total factor of energy efficiency index (TFEE) was calculated. The inputs used were gross fixed capital formation, labor and energy consumption; the outputs were CO₂ emissions (undesirable output) and Gross Domestic Product - GDP (desired output). From the results, it was possible to observe that Brazil is the country with the highest rate of TFEE, followed by South Africa, China, India and Russia.*

Keywords: DEA; BRICS; Total factor energy efficiency.

1 Introdução

Ao longo da história, os seres humanos tiveram uma postura puramente extrativista em relação aos recursos naturais. Devido aos problemas gerados por essa exploração, a Organização das Nações Unidas (ONU) criou, na década de 1980, a Comissão

Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED), conhecida como Comissão *Brundtland*. A comissão critica o risco do uso excessivo dos recursos naturais sem considerar a capacidade de suporte dos ecossistemas, apontando a incompatibilidade entre

¹ Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Triângulo Mineiro – UFTM, Av. Doutor Randolpho Borges Júnior, 1250, CEP 38064-200, Uberaba, MG, Brasil, e-mail: flaviacamioto@yahoo.com.br

² Departamento de Engenharia de Produção, Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Universidade de São Paulo – USP, Av. Trabalhador São-carlense, 400, CEP 13566-590, São Carlos, SP, Brasil, e-mail: daisy@sc.usp.br; tr.roberta@gmail.com

Recebido em Ago. 13, 2014 - Aceito em Mar. 27, 2015

Suporte financeiro: CNPq.

desenvolvimento sustentável e os padrões de produção e consumo vigentes (Braga, 2007).

Anualmente cresce a necessidade de energia para sustentar o desenvolvimento dos países. Paralelamente, aumenta a concentração de Gases do Efeito Estufa (GEE), principalmente o dióxido de carbono (CO_2), na atmosfera, intensificando o efeito estufa natural e o aquecimento decorrente deste. Os resultados apresentados no relatório do IPCC (2007) confirmam que as causas do aquecimento global são atribuídas, em grande parte, às atividades humanas, sobretudo àquelas relacionadas à emissão de CO_2 .

Neste contexto, o crescimento do consumo de energia tornou-se um problema grave, uma vez que, de acordo com Lucon & Goldemberg (2007), os padrões atuais de produção e consumo de energia, no mundo, são baseados nas fontes fósseis, o que gera emissões de poluentes locais, gases de efeito estufa e põem em risco o suprimento de longo prazo no planeta, por ser uma fonte não renovável. De acordo com o IPCC (2007), as queimas de combustíveis fósseis são responsáveis por cerca de 90% das emissões antropogênicas de CO_2 produzidas anualmente.

Segundo Narayan et al. (2007), com a pressão sobre as grandes economias mundiais para melhorar a eficiência energética, cabe ao homem estudar formas de reduzir a necessidade de consumo de energia, de modo a evitar o desperdício energético e a poluição, contribuindo para que haja desenvolvimento com sustentabilidade.

Vale mencionar, no entanto, o estudo de Belke et al. (2011), que analisou a relação de longo prazo entre o consumo de energia e o PIB real de 25 países da OCDE. Os autores sugerem que o consumo de energia e o crescimento econômico são diretamente relacionados. Assim, é importante que o planejamento de políticas eficientes de conservação de energia considere os impactos diretos do consumo de energia sobre o crescimento econômico e das consequências do crescimento econômico no consumo de energia.

Deste modo, como um esforço para avançar em direção à construção de uma economia mundial eficiente na utilização de recursos, vale avaliar e estimar o potencial dos países com relação à economia de energia e redução de emissões, considerando ainda o seu crescimento econômico. Tal análise pode fornecer informações úteis para políticas energéticas e ambientais, além de contribuir para o desenvolvimento sustentável de países com grande influência econômica no mundo.

Comumente, a macroeconomia utiliza uma base monetária para medir o nível de eficiência energética, referindo-se ao consumo de energia por unidade de produção corrente. Recentemente, um número crescente de estudos, que vem sendo desenvolvido em economias como USA (Mukherjee, 2008), Japão (Honma & Hu, 2008), China (Wang et al., 2012,

2013; Wu et al., 2012; Watanabe & Tanaka, 2007; Hu & Wang, 2006) e Índia (Mukherjee, 2010), tem contribuído para a medição da eficiência de energia concentrando-se em questões de análise de eficiência total de fatores, em que qualquer processo de produção da economia pode ser visto como um processo de produção conjunta no qual múltiplas entradas de energia e outros materiais e recursos são utilizados para a produção de múltiplas saídas desejáveis (por exemplo, PIB) e saídas indesejáveis (por exemplo, emissões de CO_2) como subprodutos.

Partindo deste contexto, o objetivo do presente trabalho é medir e analisar o índice de eficiência energética total de fatores (EETF) nos países que compõem o BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul), de modo a propiciar informações sobre países *benchmark* dentro do grupo BRICS e sobre como o Brasil se encontra nesse cenário.

O BRICS foi escolhido devido a sua importância econômica e influência na política mundial. De acordo com Amorim (2010), os BRICS, além do acelerado crescimento econômico, são detentores de expressiva extensão territorial, recursos naturais e energéticos em diversidade e quantidade consideráveis e grande desenvolvimento tecnológico.

Neste trabalho, a ferramenta de análise adotada é a análise envoltória de dados (DEA), por meio do modelo SCM variante e da análise de janelas, considerando a maximização dos *outputs* e minimização dos *inputs* simultaneamente. Posteriormente, a partir das folgas fornecidas pelo DEA, foi calculado o índice de Eficiência Energética total de fatores (EETF). Vale salientar que a maior parte dos estudos que avalia a eficiência energética no nível macroeconômico e que utiliza uma estrutura total de fatores adota a DEA como método, uma vez que fornece um mecanismo apropriado para lidar com múltiplas entradas e saídas para medir a relação de eficiência de cada unidade tomadora de decisão (DMU) sob avaliação.

2 Revisão de literatura

2.1 Eficiência energética e BRICS

Considerando que quanto maior o nível de atividade econômica, maior o uso da energia e maiores os impactos ambientais deste uso, a eficiência energética pode proporcionar segurança e benefícios adicionais, como mitigação da emissão de CO_2 e diminuição da importação de energia (Selvakkumaran & Limmeechokchai, 2013). Esses benefícios se complementam, o que implica a redução da energia necessária por unidade de produto econômico, aumentando a eficiência da economia e garantindo que a mesma produção possa ser obtida com menos energia e, portanto, com menor uso de recursos naturais e menores danos ambientais.

Historicamente, os países desenvolvidos que compõem a OCDE são os maiores consumidores mundiais de energia. O estudo de Niu et al. (2011), realizado para avaliar a causalidade entre o consumo de energia, o crescimento do PIB e as emissões de carbono para oito países da Ásia-Pacífico, entre 1971 a 2005, concluiu que as emissões de carbono, o consumo per capita de energia e a eficiência do uso de energia nos países em desenvolvimento são muito mais baixos que os dos países desenvolvidos. Porém, a participação dos países desenvolvidos no consumo total mundial de energia tem recuado ao longo do tempo. Já nos países em desenvolvimento, a participação relativa registrou aumento acumulado superior a 100% nas últimas três décadas.

Entre os países em desenvolvimento, o grupo BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul) vem ganhando destaque. Os países do BRICS constituem uma aliança que abrange os quatro continentes e é formada somente por países emergentes, com ações que já ultrapassam a pura diplomacia.

Os cinco países que formam o bloco, geralmente, são agrupados por suas semelhanças. Porém, separadamente, possuem características econômicas, sociais, políticas e culturais bem distintas, uma vez que possuem história, religião e clima diferentes (Almeida, 2009). Ademais, Leonova et al. (2007) argumentaram que cada país possui suas particularidades no que diz respeito aos clientes, indústrias, tendências de crescimento, governança ambiental e de recursos. Assim, Armijo (2007) chegou a concluir que esse grupo de países não forma um conjunto homogêneo.

Por outro lado, há aspectos econômicos que envolvem estes países que não devem ser desconsiderados. Juntos, os países do BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul) somam um quinto da economia do planeta e correspondem a 43% da população mundial (Duarte, 2014). Vale mencionar, que a África do Sul passou a fazer parte do grupo de países com maior potencial de crescimento apenas a partir de 2011, sendo a letra “S” incorporada à sigla BRIC, que se modificou para BRICS.

Além da sua importância econômica, o grupo terá grande influência na política mundial. De acordo com Amorim (2010), os BRICS, além do acelerado crescimento econômico, são detentores de expressiva extensão territorial, recursos naturais e energéticos em diversidade e quantidade consideráveis e grande desenvolvimento tecnológico.

Surge, portanto, uma preocupação em relação ao modo como esses países se desenvolverão, já que, segundo Meadows et al. (1972), de acordo com seu trabalho intitulado *The Limits to Growth*, caso esses países consumam o mesmo nível de recursos que as atuais potências econômicas, o planeta alcançará uma situação catastrófica.

Segundo o estudo de Pao & Tsai (2010), para reduzir as emissões e não prejudicar o crescimento econômico, os países do BRIC deveriam aumentar o investimento tanto no fornecimento de energia como em eficiência energética, além de intensificar as políticas de conservação para reduzir o desperdício energético.

De acordo com os dados do Banco Mundial (2013), em 2010, os cinco países do BRICS, conjuntamente, consumiram mais energia que os sete países do G7; 4.213,8*10³ Ktep contra 3.927,5*10³ Ktep, respectivamente. Deste modo, cabe verificar a natureza e as características deste elevado consumo. Para isso, esse trabalho utilizará a análise envoltória de dados e, a partir das folgas de energia fornecidas por essa ferramenta, será calculado o índice de eficiência energética total de fatores para cada um dos países do BRICS.

2.2 Análise Envoltória de Dados

A técnica Análise Envoltória de Dados (DEA) tem sido empregada com sucesso para avaliar o desempenho relativo de um conjunto de firmas, usualmente conhecidas como Decision Making Units (DMUs), que utilizam as mesmas entradas para produzir as mesmas saídas (Ramanathan, 2006). A DEA teve origem nos trabalhos de Charnes et al. (1978) e de Banker et al. (1984), sendo ambos baseados em Farrell (1957), que propôs um modelo empírico para medir a eficiência relativa. Segundo Farrell (1957), é mais recomendável determinar a eficiência de uma firma, ou de uma unidade administrativa, comparando-a com o melhor nível de eficiência até então observado, do que compará-la com algum ideal inatingível.

Sendo assim, a DEA avalia a eficiência relativa de um conjunto de DMUs, neste trabalho representado pelos países do BRICS. Esta abordagem tem a vantagem de considerar, simultaneamente, múltiplas entradas e saídas que caracterizam um determinado processo produtivo. Além disso, a DEA permite às DMUs terem informação imediata sobre os seus respectivos *status* de eficiência ou ineficiência, que dependerão, por sua vez, do modelo DEA adotado (Oggioni et al., 2011). Cada modelo, dependendo do tipo de retorno à escala, do formato da fronteira e da orientação escolhida, irá conduzir a eficiência a um valor diferente, que deve ser interpretado de acordo com as hipóteses referentes ao modelo utilizado (Mariano, 2008).

Charnes et al. (1978), desenvolveram o primeiro modelo matemático para a DEA, chamado CCR, que adotava a hipótese de Retornos Constantes de Escala (CRS) ao longo de toda a fronteira de produção. Ter retornos constantes de escala significa adotar a hipótese de que *os inputs e outputs* são proporcionais entre si, o que faz com que o formato da fronteira de

eficiência do modelo CCR seja uma reta com um ângulo de 45°. O modelo CCR calcula a eficiência de uma DMU dividindo sua produtividade pela produtividade da DMU mais produtiva de um determinado conjunto, sem se preocupar com a escala.

A extensão do modelo CCR, proposta por Banker, Charnes e Cooper, em 1984, formulou o chamado modelo BCC, que apresenta Retornos Variáveis de Escala (VRS). O modelo BCC propõe comparar apenas DMUs que operem em uma escala semelhante. Assim, neste modelo, a eficiência de uma DMU é obtida dividindo-se sua produtividade pela maior produtividade entre as DMUs que têm o mesmo tipo de retorno de escala que ela. A fronteira do modelo BCC é composta de um conjunto de retas de ângulos variados, o que caracteriza uma fronteira linear por partes.

De acordo com Coelli et al. (1998), os modelos CCR e BCC podem apresentar duas orientações: para a maximização dos *outputs* ou para a minimização dos *inputs*. Quando se trabalha com modelos Aditivos, que foram desenvolvidos por Charnes et al. (1985), não é necessário escolher uma orientação, pois o próprio modelo original já considera, simultaneamente, a maximização dos *outputs* e a minimização dos *inputs*, sendo que o modelo Aditivo proporcionará a situação em que a DMU deverá fazer menos esforço, em termos de redução de *inputs* e aumento de *outputs*, para atingir a eficiência. Vale ressaltar que os modelos aditivos podem ser do tipo Variante, com Retornos Variáveis de Escala, ou Invariante, com Retornos Constantes de Escala.

No entanto, o modelo Aditivo não permite calcular o índice de eficiência das DMUs que estão sendo comparadas; permite apenas indicar as DMUs eficientes e as metas das DMUs ineficientes. Logo, a interpretação dos resultados do modelo Aditivo deve ser realizada de forma um pouco diferente dos modelos BCC e CCR, em que 100% indicam uma DMU eficiente. No modelo Aditivo, o valor da função objetivo representa a distância da DMU à fronteira eficiente. Logo, a DMU em análise é eficiente quando o resultado da função objetivo é igual a zero, de modo que quanto mais afastado de zero for o resultado, mais ineficiente é a DMU.

Devido a essa limitação do modelo Aditivo, foram propostos alguns aprimoramentos, dos quais se destaca o modelo SBM (*Slacks-Based Measure*). Este modelo, que foi introduzido por Tone (2001), é bastante semelhante ao modelo aditivo, já que também considera uma orientação simultânea aos *inputs* e aos *outputs*, mas fornece, como resultado, um valor de eficiência que varia de zero até 100%. Deste modo, os resultados deste modelo, apesar de partirem dos mesmos pressupostos do modelo aditivo, podem ser interpretados de maneira semelhante aos resultados dos modelos CCR e BCC.

É importante mencionar que, além de permitir mensurar o desempenho relativo dos países selecionados, este método também permite obter as folgas, que expressam o quanto cada país deve aumentar ou diminuir de cada variável, para atingir a eficiência em relação aos outros países. A folga expressa o quanto o desempenho atual da DMU se encontra afastado, em cada variável, de seu desempenho ideal, que pode ser simbolizado por uma DMU virtual que se encontra sobre a fronteira de eficiência (também chamada de *benchmark*). Esse desempenho ideal pode ser considerado uma meta para as DMUs ineficientes, que pode ser calculada conforme as Expressões 1 e 2:

$$\text{Meta input} = x_{j0} - S_j, \text{ para } j = 1, 2, 3 \dots n \quad (1)$$

$$\text{Meta output} = y_{i0} + S_i, \text{ para } i = 1, 2, 3 \dots m \quad (2)$$

A partir do desempenho atual e da meta, é possível determinar a folga relativa, que expressa percentualmente o nível de melhoria necessário para cada variável de cada país. A folga relativa pode ser determinada a partir da Expressão 3:

$$\text{Folga Relativa} = (\text{Meta} - \text{Atual}) / \text{Atual} \quad (3)$$

3 Método

Neste trabalho, foram selecionados os países emergentes (que constituem o grupo dos BRICS) com o objetivo de analisar a eficiência energética com base no ponto de vista da produtividade total de fatores. Desse modo, as unidades analisadas para a realização do presente trabalho foram Brasil, Rússia, Índia, China, África do Sul.

Para atingir o objetivo proposto neste trabalho, foi utilizado um método de programação matemática conhecido como Análise Envoltória de Dados (DEA). Por meio deste método, uma função de produção econômica foi construída para analisar a eficiência energética considerando uma estrutura total de fatores. Deste modo, a energia é considerada em conjunto com os *inputs* convencionais: trabalho e capital. Esses últimos são normalmente utilizados em análises da produtividade econômica como os *inputs* para produzir um *output* econômico (PIB). Para uma economia ou uma região, é preferível que ocorra o aumento do PIB e, simultaneamente, a diminuição do consumo de energia, a fim de que se atinja a eficiência da produção. Portanto, as metas para o crescimento do PIB e para a eficiência no consumo de energia devem ser colocadas juntas, a fim de sustentar o desenvolvimento econômico (Hu & Wang, 2006).

Wu et al. (2012), Mandal (2010) e Watanabe & Tanaka (2007) indicam que analisar a eficiência energética sem considerar a eficiência ambiental pode conduzir a resultados enviesados da avaliação da eficiência energética. Wang et al. (2012), quando

realizou uma análise comparativa entre a avaliação da eficiência ambiental e a eficiência energética, confirmou que tal viés existia se fosse omitido o *output* indesejável (CO₂), da avaliação. Deste modo, este trabalho, também, considerou o nível de emissão de CO₂ dos países do BRICS, que consiste em um dos *outputs* indesejáveis mais importantes do consumo de energia. Vale mencionar que as emissões de CO₂ consideradas são as decorrentes da queima de combustíveis fósseis.

Portanto, para esta análise, foram utilizadas três variáveis de *input*: força de trabalho, formação bruta de capital fixo e consumo energético; e duas variáveis de *output*: PIB (*output* desejável) e emissão de CO₂ (*output* indesejável). Todas as variáveis foram coletadas do *website* do Banco Mundial, para o período de 1993 a 2010, período para o qual havia a disponibilidade de dados para todos os países. Vale salientar que, ao medir a eficiência energética e ambiental, busca-se reduzir o consumo de energia, o trabalho e o capital utilizados tanto quanto possível, e, simultaneamente, aumentar o *output* desejável (PIB). Já com relação ao *output* indesejável (emissão de CO₂), quanto menos for gerado desta saída, melhor. Portanto, neste trabalho, o *output* indesejável foi modelado como sendo um *input*, que consiste em uma das estratégias da DEA para o tratamento dos *outputs* indesejáveis.

Considerando isso, para a realização deste trabalho, observa-se que a orientação simultânea, para minimização dos *inputs* e maximização dos *outputs* é a mais adequada. Logo, para este estudo, foi adotado o modelo SBM variante. Vale mencionar que este método, também, fornece os valores que os países devem aumentar ou diminuir, de cada variável, para obterem maior eficiência. Estes valores, como já mencionado, também são conhecidos como folgas. Além disso, esse modelo, permite comparar países que operam em escalas diferentes, o que implica que reduções ou aumentos nos *inputs* não necessariamente geram alterações na mesma proporção, nos *outputs*. As Expressões de 4 a 9 apresentam o modelo SBM variante, de acordo com Tone (2001):

$$\text{Min } \tau = t - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_j / x_{j0} \tag{4}$$

Sujeito a:

$$1 = t + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i / y_{i0} \tag{5}$$

$$\sum_{k=1}^z x_{jk} \cdot \lambda_k + S_j = t \cdot x_{j0}, \text{ para } j=1,2,\dots,n \tag{6}$$

$$\sum_{k=1}^z y_{ik} \cdot \lambda_k - S_i = t \cdot y_{i0}, \text{ para } i=1,2,\dots,m \tag{7}$$

$$\sum_{k=1}^z \lambda_k = t \tag{8}$$

$$\lambda_k, S_j \text{ e } S_i \geq 0 \text{ e } t > 0 \tag{9}$$

Em que:

λ_k : Participação da DMU *k* na meta da DMU em análise;

x_{jk} : Quantidade do *input* *j* da DMU *k*;

y_{ik} : Quantidade do *output* *i* da DMU *k*;

x_{j0} : Quantidade do *input* *j* da DMU em análise;

y_{i0} : Quantidade do *output* *i* da DMU em análise;

z: Número de unidade em avaliação;

m: Número de *outputs*;

n: Número de *inputs*;

S_i : Variável de folga do *output* *i*;

S_j : Variável de folga do *input* *j*;

t: Variável de ajuste linear.

De acordo com Honma & Hu (2008) e Hu & Wang (2006), a eficiência é geralmente definida em termos da relação na qual a melhor prática é comparada com a operação real. O indicador de eficiência energética deve ser a relação entre a energia agregada que deve ser consumida idealmente e o consumo de energia real. A quantidade de ajustes totais do *input* “consumo energético” é considerada como a porção ineficaz de consumo real. Assim, com base nos ajustes de folga de energia obtidos a partir da DEA, é possível calcular a porcentagem de energia que deve ser economizada, considerando outros fatores simultaneamente. Se a folga é igual a zero, ou seja, se não existe uma quantidade de ajuste para o *input* “consumo energético”, então o país apresenta a eficiência ótima para o consumo de energia, quando o seu *output* é maximizado. Portanto, a eficiência energética de um país é definida pela Expressão 10, e é chamada de eficiência energética total de fatores (EETF) para o país *i*, no tempo *t*, uma vez que o índice é estabelecido do ponto de vista da produtividade total de fatores.

$$EETF(i,t) = 1 - \frac{\text{folga}_{input_energia}(i,t)}{\text{Consumo_energia_atual}(i,t)} \tag{10}$$

O índice de EETF representa o nível de eficiência do consumo de energia em um país. Como a folga da variável “consumo energético” é o quanto o país deve diminuir do consumo de energia para atingir o melhor nível prático desta variável para este país, o consumo de energia atual é sempre maior ou igual à folga. Isso faz com que o índice EETF esteja sempre entre zero e 1. Este índice, neste estudo, é mostrado em formato percentual.

Como se trata de dados em painel, julgou-se interessante a realização de uma análise de janela, que é uma das formas de se incluir o fator tempo dentro da técnica DEA, de acordo com Cooper et al. (2000). A análise

de janela consiste em um método estruturado para se misturar, em uma mesma aplicação, dados de DMUs referentes a diversos anos diferentes, sendo que isso é feito por meio da realização de múltiplas aplicações da DEA, considerando diferentes combinações de anos (janela). Sendo assim, pode-se concluir que a análise de janela é também um importante meio para se contornar o problema da baixa quantidade de DMUs, que, segundo Cooper et al. (2000), deve ser, no mínimo, o triplo da soma da quantidade de *inputs* com a quantidade de *outputs*.

A análise de janela compreende, assim, a separação dos anos que estão sendo analisados em diferentes grupos (janelas), sendo que, a partir dos dados disponíveis, é determinado o tamanho de cada janela e o número de janelas a ser construído. Essas duas informações podem ser obtidas por meio das Expressões 11 e 12, em que k representa o número de períodos e p o tamanho da janela, que é arredondado para cima, se necessário.

$$\text{Tamanho_da_janela_}(p) = (K+1)/2 \quad (11)$$

$$\text{Quantidade_de_janela} = k - p + 1 \quad (12)$$

Para ilustrar a utilização dessas fórmulas e a subsequente construção de janelas, para esta análise, que avalia dados disponíveis 1993-2010 ($k = 18$), o tamanho da janela deve ser de 10 e a quantidade de janelas deve ser de 9, compreendendo, respectivamente, os dados a partir de: (a) 1993-2002 (b) 1994-2003, (c) 1995-2004, (d) 1996-2005, (e) 1997-2006, (f) 1998-2007, (g) 1999-2008, (h) 2000-2009, (i) 2001-2010.

Depois de construir todas as janelas, o DEA deve ser aplicado para cada uma delas, de modo que uma tabela, que inclua todos os resultados para cada unidade em cada janela, possa ser preparada posteriormente. Deve ser notado que, nesta abordagem, o resultado final da eficiência de cada DMU deve ser a média das eficiências obtidas em todos os anos e em todas as janelas, e o desvio padrão de cada DMU também pode ser calculado para verificar a estabilidade da sua eficiência no tempo.

Neste trabalho, além das tabelas incorporando os resultados da eficiência dos países obtidos em cada janela, também, foram elaboradas tabelas

que incorporaram os resultados das folgas, de cada variável, para cada DMU em cada janela. Da mesma forma, o resultado final da folga de cada variável para cada DMU foi a média das folgas obtidas em todos os anos e em todas as janelas.

4 Análise e discussão dos resultados

Primeiramente, foi realizada uma análise por meio do gráfico chamado *boxplot* a fim de determinar se as unidades utilizadas nesse trabalho são homogêneas. De acordo com os resultados, o único *outlier* encontrado foi a China. No entanto, como não há restrições quanto à utilização de *outliers* no DEA, uma vez que um *outlier* pode atuar nas mesmas condições das outras DMUs, mesmo tendo um desempenho diferente, optou-se por manter a China na análise a fim de incluir no trabalho todos os países que fazem parte do BRICS.

A partir da aplicação do Modelo SBM variante da DEA e da Análise de Janela, foi possível verificar o comportamento dos países que compõem o BRICS, durante os anos de 1993 a 2010, considerando os *inputs* força de trabalho, formação bruta de capital fixo e consumo energético e os *outputs* PIB (*output* desejável) e emissão de CO₂ (*output* indesejável). O *ranking* obtido é apresentado na Tabela 1.

A partir da análise envoltória de dados, foi possível verificar que o Brasil é o mais eficiente em diminuir os *inputs* e *output* indesejável e aumentar o PIB. Logo, é possível supor que aumentando os *inputs*, será possível gerar mais *output* PIB e crescimento sustentável.

Em segundo lugar no *ranking*, encontra-se a África do Sul. Apesar de esse país apresentar as menores entradas e saídas, ainda ocupa uma das melhores posições em relação ao índice de eficiência, além de baixo desvio padrão. Embora venha ganhando espaço internacionalmente, os problemas nacionais como as doenças e a violência ainda atrasam tal crescimento.

A China, além de ter apresentado um bom nível de eficiência média, terceira no *ranking*, obteve um desvio padrão bastante elevado, o que pode ser explicado pelo fato de ter ocorrido melhorias expressivas e rápidas de um ano para o outro, que culminaram em garantir que o ano mais recente de cada janela se apresentasse

Tabela 1. *Ranking* de Eficiência Total de Fatores e média das janelas do BRICS.

País	janela 1	janela 2	janela 3	janela 4	janela 5	janela 6	janela 7	janela 8	janela 9	MÉDIA	Desvio Padrão
Brasil	99,1%	98,9%	98,7%	98,7%	99,3%	99,8%	99,9%	99,9%	99,9%	99,4%	1,2%
África do Sul	97,5%	98,2%	98,7%	99,5%	99,7%	99,6%	99,6%	99,1%	98,8%	99,0%	1,4%
China	74,6%	78,9%	81,0%	81,3%	81,5%	80,5%	81,1%	84,5%	86,5%	81,1%	14,2%
Rússia	58,3%	58,3%	61,0%	62,8%	62,7%	61,9%	60,5%	58,9%	58,0%	60,3%	6,2%
Índia	41,8%	40,3%	40,4%	40,7%	41,4%	42,3%	43,5%	44,4%	46,1%	42,3%	4,0%

com 100% no desempenho, em relação aos demais, fazendo aumentar a variabilidade.

A Rússia, penúltima no *ranking*, mostrou variáveis de entrada medianas. Porém, para um país que deixou de ser uma economia globalmente isolada, nessas últimas décadas, encontra-se em um bom cenário.

Finalmente, a Índia, último país no *ranking*, não demonstrou melhoras nem pioras ao longo dos anos analisados. Assim, foi possível concluir que o país não tem melhorado sua eficiência no uso de suas entradas para a formação de PIB.

A fim de melhor entender esse resultado, foi realizada uma análise das folgas apresentadas pelos países de cada uma das variáveis consideradas na análise.

4.1 Análise das folgas das variáveis

Esse tópico permite analisar a classificação dos países no *ranking* da estrutura total de fatores, de acordo com a análise de cada variável por meio das folgas. Para tanto, foi construído um *ranking* (de 1 a 5) das médias das folgas para cada variável, indicando qual país precisaria alterar mais a variável analisada para melhorar a eficiência relativa (5) e qual precisaria alterar menos a variável (1) para aumentar a eficiência em relação aos demais países, apresentando-se, nesse caso, como *benchmarking* dessa variável para os demais integrantes do BRICS.

Ao analisar a média geral das eficiências das folgas de cada variável, é possível observar que o *ranking* das variáveis para análise das folgas foram: emissões de CO₂ (36,15%), consumo energético (32,13%), força de trabalho (30,05%), PIB (14,51%) e formação bruta de capital fixo (5,16%), respectivamente.

A Tabela 2 apresenta a média das folgas para cada variável em cada país.

Como é possível observar, a variável emissão de CO₂, ao apresentar-se, de uma forma geral, com as maiores folgas para os países, deve receber, prioritariamente, atenção a fim de que medidas sejam tomadas para reverter a tendência atual. Tal resultado pode indicar, entre outras coisas, que o BRICS precisaria investir mais em fontes renováveis de energia ou medidas que melhorem a eficiência energética, como processos ou tecnologias mais eficientes.

Medidas de eficiência energética justificam-se, pois as emissões de CO₂ consideradas neste trabalho são decorrentes de combustíveis fósseis. Portanto, ações que tenham o objetivo de melhorar a eficiência energética dos países também acarretariam uma diminuição das emissões. Desse modo, ressalta-se a importância do foco deste trabalho no consumo energético de cada país do BRICS. Além disso, a variável consumo energético apresentou elevadas folgas, sendo a segunda no *ranking* das folgas.

Ao analisar os dados coletados de emissão de CO₂, nota-se que o nível de emissões de CO₂ do BRICS aumenta ao longo dos anos. Considerando as folgas fornecidas pela DEA em relação a essa variável, é possível apresentar um *ranking* de países do BRICS, conforme Tabela 3, que indica o quanto cada país deveria diminuir percentualmente essa variável, para alcançar a fronteira de eficiência.

Os mais eficientes nas emissões de CO₂, de acordo com a média das folgas, são Brasil e África do Sul, com médias de 1,10% e 2,58%, respectivamente. Ambos mantêm a folga de 0% na maior parte dos anos analisados, principalmente nos anos mais recentes de cada janela.

Tabela 2. Média das Folgas.

País	Força de trabalho	Formação Bruta de Capital Fixo	Consumo Energético	CO2	PIB
África do Sul	0,03%	1,89%	2,73%	2,58%	0,55%
Brasil	0,04%	1,36%	0,05%	1,10%	0,30%
Rússia	32,95%	0,02%	76,46%	78,33%	28,35%
China	38,72%	8,09%	25,76%	26,20%	4,03%
Índia	78,49%	14,42%	55,67%	72,53%	39,35%
Média Geral	30,05%	5,16%	32,13%	36,15%	14,51%

Tabela 3. *Ranking* Emissão de CO₂.

<i>Ranking</i>	País	janela 1	janela 2	janela 3	janela 4	janela 5	janela 6	janela 7	janela 8	janela 9	Média	Desvio Padrão
1	Brasil	0,7%	1,8%	2,6%	2,4%	1,5%	0,3%	0,3%	0,3%	0,0%	1,10%	0,0218
2	África do Sul	4,4%	2,3%	2,8%	2,2%	1,6%	1,9%	1,9%	3,0%	3,1%	2,58%	0,0366
3	China	45,0%	35,2%	29,3%	24,6%	21,2%	22,2%	21,7%	15,1%	21,6%	26,20%	0,2501
4	Índia	73,0%	71,8%	70,5%	71,2%	72,2%	72,7%	73,3%	73,9%	74,1%	72,53%	0,0322
5	Rússia	79,1%	78,3%	78,4%	77,7%	77,9%	78,0%	78,3%	78,4%	78,9%	78,33%	0,0112
	Média Geral										36,15%	

Apesar desses resultados, de acordo com o Banco Mundial (2014), embora o Brasil tenha apresentado progresso na diminuição de desmatamentos e tenha se tornado um dos líderes em negociações sobre o clima, se comprometendo de modo voluntário a reduzir cada vez mais essas emissões, tem enfrentado desafios na combinação dos benefícios de crescimento agrícola, proteção ambiental e desenvolvimento sustentável.

Já a Índia, assim como a Rússia, penúltima e última no *ranking* de folgas dessa variável, respectivamente, apresentou elevadas folgas médias. Além disso, analisando cada janela, é possível observar que a porcentagem da média das folgas aumenta nos anos mais recentes de cada janela. Considerando isso, pode-se concluir que, em uma época que se busca a sustentabilidade, Rússia e Índia não estão melhorando a sua eficiência ao longo do tempo, buscando reduzir as emissões de gás carbônico, mantendo ou aumentando o PIB, por meio do maior uso de fontes alternativas de energia ou medidas de eficiência energética.

May (2008) afirma que as emissões são preocupantes no desenvolvimento da Índia, uma vez que há excessiva dependência do setor produtivo indiano com relação ao carvão mineral. Nassif (2006) alega que não há evidências de que esse país busque assegurar o crescimento sustentável, que, segundo o Banco Mundial (2014), apresenta-se como o terceiro em emissão de gás carbono mundial.

Por outro lado, na busca da redução das emissões e visando a economia dos respectivos países, em meio ao debate sobre o futuro das vendas de gás russo para a Ucrânia e para a União Europeia, Rússia e China fecharam um contrato bilionário de fornecimento de gás. O acordo, com vigência de 30 anos, prevê que o grupo russo Gazprom forneça, a partir de 2018, anualmente até 38 bilhões de metros cúbicos de gás natural ao país vizinho, segundo informações da Corporação Nacional de Petróleo da China (CNPC). O negócio teria valor total de 400 bilhões de dólares (G1, 2014).

A China, por sua vez, apresenta-se em terceiro lugar no *ranking* de médias das folgas de emissão de CO₂ com média de 26,20%. Um dos aspectos mais importantes referentes ao crescimento econômico da China é a dependência de termoeletricas a carvão mineral. Surgiu daí a constatação feita pela Agência

Internacional de Energia de que as emissões de CO₂ ultrapassariam as dos EUA em 2010, e isso de fato ocorreu muito antes do previsto, em 2007 (Instituto Carbono Brasil, 2007).

Todavia, melhorias estão ocorrendo, o que se reflete no alto desvio padrão, de 0,2501. Segundo a análise, há uma diminuição considerável da porcentagem da folga dessa variável ao longo dos anos, principalmente nos anos mais recentes. Com a média da folga dessa variável passando de 45% na primeira janela para 21,6% na última.

A partir da Tabela 4, é possível observar que o *ranking* das folgas da variável consumo de energia é o mesmo que o da variável emissão de CO₂. Isso se explica pela esperada correlação positiva existente entre estas variáveis, dado que as queimas de combustíveis fósseis são responsáveis pela maior parte das emissões anuais de CO₂.

Assim, Brasil e África do Sul lideram o *ranking* das folgas para o consumo energético, com médias 0,05% e 2,73%, respectivamente. Ao longo dos anos, o consumo energético nesses países foi majoritariamente eficiente, talvez pela larga utilização de energias alternativas e/ou a conscientização por parte das pessoas.

A China vem melhorando tal aspecto conseguindo diminuir sua folga média. No entanto, no início do período estudado, nota-se que seu consumo era exacerbado, por isso, ainda ocupa o terceiro lugar no *ranking*, com média de 25,76%. Porém, o último ano de cada janela se mostrou eficiente em relação a essa variável, com folga de 0%. Essa mudança no consumo energético chinês é refletida no desvio padrão, de 0,218, sendo o maior entre os BRICS para essa variável.

Já a Índia, em contrapartida, vem aumentando a sua folga para essa variável nos anos mais recentes de cada janela, justificando o quarto lugar no *ranking* com média das folgas de 55,67% e desvio padrão de 0,0209.

Por fim, na Rússia, as folgas para o consumo energético vêm diminuindo. Contudo, em uma taxa muito baixa, uma vez que a diferença entre os primeiros e os últimos anos de cada janela não se distinguem de forma considerável. Portanto, esse país

Tabela 4. *Ranking* consumo energético.

<i>Ranking</i>	País	janela 1	janela 2	janela 3	janela 4	janela 5	janela 6	janela 7	janela 8	janela 9	Média	Desvio Padrão
1	Brasil	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,2%	0,05%	0,0020
2	África do Sul	6,1%	4,4%	1,9%	1,8%	1,5%	1,8%	1,8%	2,2%	3,1%	2,73%	0,0336
3	China	39,9%	33,2%	28,8%	25,7%	22,7%	23,0%	21,8%	15,9%	20,9%	25,76%	0,2184
4	Índia	58,4%	55,5%	54,7%	54,8%	55,1%	55,1%	55,5%	55,8%	56,0%	55,67%	0,0290
5	Rússia	78,9%	78,2%	77,8%	76,7%	77,3%	76,0%	75,2%	74,3%	73,7%	76,46%	0,0266
Média Geral											32,13%	

encontra-se como o último no *ranking* com média de 76,46% e desvio padrão de 0,0260.

O PIB representa a soma, em valores monetários, de todos os bens e serviços finais produzidos numa determinada região, durante um período determinado. Tem o objetivo principal de mensurar a atividade econômica de uma região. Na contagem do PIB, consideram-se apenas bens e serviços finais, excluindo da conta todos os bens de consumo intermediários.

Ao analisar os dados coletados, no período de 1993 a 2010, há um aumento do PIB por parte de todos os países, exceto a Rússia, devido à extinção da União Soviética. Segundo os dados, a Rússia consegue recuperar o progresso no ano de 1998.

O *ranking* da média das folgas para a variável PIB encontrado a partir da análise DEA, encontra-se na Tabela 5.

Em relação ao PIB, Brasil e África do Sul se mostram quase eficientes, sendo considerável o número de folgas zero ao longo dos períodos analisados. Portanto, ocupam o primeiro e segundo lugar com média das folgas de 0,30% e 0,55%, respectivamente, e com desvio padrão de 0,0083.

Já a China encontra-se em terceiro lugar no *ranking* com média das folgas de 4,03% e desvio padrão de 0,0481. Vale mencionar que, para o ano mais recente de cada janela, a folga do PIB, para esse país, é 0. Tal constatação vai ao encontro da análise das demais variáveis, o que mostra que esse país vem buscando a eficiência no que diz respeito à conversão de formação bruta de capital fixo, força de trabalho e consumo energético em PIB, sem aumentar as emissões de CO₂.

A Rússia ocupa o quarto lugar, com média das folgas de 28,35% e desvio padrão de 0,1689. Percebe-se

que sua posição poderia ser melhor, caso esse país continuasse com o desempenho observado nas três primeiras janelas, nas quais as folgas para essa variável diminuíram ao longo do tempo. Contudo, a partir da quarta janela (1996-2005), notou-se que a Rússia vem se afastando da eficiência da variável PIB, uma vez que a folga aumenta a cada ano mais recente de cada janela.

Para finalizar, a Índia, diferente do que vem mostrando nas outras variáveis, apresenta melhorias na média das folgas com relação ao PIB, sendo observada uma diminuição nos anos mais recentes de cada janela, chegando a folga zero nos últimos anos, nas janelas 8 (2000-2009) e 9 (2001-2010). Esse país encontra-se em quinto lugar no *ranking* da folga dessa variável com média de 39,35% e com a maior variabilidade (0,1862) entre os países analisados.

4.2 Índice de eficiência energética total de fatores

Uma vez rodado o DEA, foi calculado o índice de eficiência energética total de fatores (EETF), a partir da folga do consumo energético e do consumo atual de energia, para cada país do BRICS, em cada janela, apresentado na Tabela 6.

De acordo com os resultados apresentados, a Rússia, considerando as variáveis analisadas neste trabalho, apresenta-se como o último país no *ranking* do índice de EETF. Contudo, condizente com o que foi observado na análise de folgas da variável consumo energético, a partir da Tabela 4, é possível verificar que, apesar disso, apresentou um crescimento ao longo dos períodos analisados, com a média dos índices

Tabela 5. *Ranking* PIB.

<i>Ranking</i>	País	janela 1	janela 2	janela 3	janela 4	janela 5	janela 6	janela 7	janela 8	janela 9	Média	Desvio Padrão
1	Brasil	0,4%	0,3%	0,9%	0,7%	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,30%	0,0083
2	África do Sul	0,7%	0,7%	0,7%	0,1%	0,3%	0,4%	0,4%	0,6%	1,0%	0,55%	0,0083
3	China	1,6%	0,9%	0,8%	2,3%	4,2%	6,6%	7,9%	8,4%	3,6%	4,03%	0,0481
4	Rússia	29,4%	27,8%	22,9%	20,5%	22,9%	26,4%	30,7%	35,6%	38,9%	28,35%	0,1689
5	Índia	43,0%	46,8%	47,9%	45,3%	42,0%	38,3%	33,4%	31,2%	26,2%	39,35%	0,1862
Média Geral											14,51%	

Tabela 6. *Ranking* EETF.

<i>Ranking</i>	País	janela 1	janela 2	janela 3	janela 4	janela 5	janela 6	janela 7	janela 8	janela 9	Média Folga	Desvio Padrão
1	Brasil	99,9%	99,9%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	99,9%	99,8%	99,95%	0,0020
2	África do Sul	93,9%	95,6%	98,1%	98,2%	98,5%	98,2%	98,2%	97,8%	96,9%	97,27%	0,0336
3	China	60,1%	66,8%	71,2%	74,3%	77,3%	77,0%	78,2%	84,1%	79,1%	74,24%	0,2184
4	Índia	41,6%	44,5%	45,3%	45,2%	44,9%	44,9%	44,5%	44,2%	44,0%	44,33%	0,0290
5	Rússia	21,1%	21,8%	22,2%	22,7%	23,3%	24,0%	24,8%	25,7%	26,3%	23,54%	0,0266

de EETF passando de 21,1%, na primeira janela (1993-2002), para 26,3%, na última (2001-2010).

Como penúltimo no *ranking* de EETF está a Índia, sendo que é possível observar que, apesar de este país ter o desempenho superior ao da Rússia, não demonstra grandes variabilidades, indicando que não apresentou significativas melhoras ou piores, mantendo níveis parecidos do índice EETF ao longo dos anos analisados. Nota-se que a primeira janela é a única com maior diferença percentual em comparação com as outras janelas.

O terceiro no *ranking* de desempenho é a China, que apresentou um crescimento no índice de EETF conforme os períodos mais recentes foram sendo contemplados nas janelas. A média dos desempenhos passou de 60,11%, na janela 1, para 79,14%, na janela 9. Percebe-se que o crescimento ao longo dos anos é significativo. Vale ressaltar que a variabilidade desse país foi relativamente grande quando comparado com as dos demais países, sendo que o desvio padrão foi de 21,84%. Logo, conclui-se que a China tem apresentado relativas melhoras nos últimos anos, em relação à sua capacidade de transformar energia, trabalho e capital em PIB, sem aumentar as emissões de CO₂. Todavia, deve-se ressaltar que é o país que mais consome energia de combustíveis fósseis e que mais emite gás carbônico. Desse modo, seu crescimento de forma sustentável mostra-se possível, porém desafiador.

A África do Sul, conforme a Tabela 6, apresentou a segunda maior variabilidade em relação ao desempenho médio (desvio padrão de 3,36%). Entretanto, apesar de ainda bastante inferior, se comparado à China, aumentou o índice EETF, passando de 93,9%, na primeira janela, para 96,9%, na última janela.

Já o bom posicionamento do Brasil, quando comparado aos países do BRICS, pode ser resultado de mecanismos de fomento à eficiência energética promovidos pelo governo federal. Dos programas nacionais implementados nas décadas anteriores e ainda em operação, os mais importantes são o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL (desde 1985), o Programa Nacional de Racionalização do Uso de Derivados de Petróleo e Gás Natural - CONPET (desde 1991) e os programas de eficiência energética mandatórios geridos pelas empresas concessionárias distribuidoras e supervisionados pela ANEEL.

Hoje, há ainda dois outros instrumentos para promover tecnologias mais eficientes. Um deles é a Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000, que estabelece que as concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica ficam obrigadas a aplicar, anualmente, o montante de, no mínimo, 0,75% de sua receita operacional líquida em pesquisa e desenvolvimento do setor elétrico e de, no mínimo, 0,25% em programas de eficiência energética no uso final (Brasil, 2013).

Outro instrumento é a Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, que determina que o Poder Executivo estabelecerá níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos fabricados ou comercializados no País, com base em indicadores técnicos pertinentes (Brasil, 2013).

Assim, embora nesse país os investimentos em programas de eficiência energética tenham sido marginais diante dos investimentos alocados nas opções disponíveis de aumento da oferta de energia (produção/importação, transporte e distribuição), o Brasil mostra potencial para inverter esse quadro no futuro, dependendo de iniciativas, como a inserção de novos programas de eficiência energética no planejamento energético nacional, competindo com as opções de aumento da oferta de energia (Brasil, 2007).

Salienta-se, ainda, que o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2012-2021) prevê um forte avanço das medidas de eficiência energética neste país nos próximos anos. A previsão da EPE (2012) é que sejam conservadas 24.693×10^3 tep de energia total, até 2021. As projeções relativas especificamente ao consumo de eletricidade indicam que serão conservados 48 TWh por ano ao fim deste período, o que corresponde a uma usina hidroelétrica com potência instalada de 10.000MW, ou três usinas de Xingó.

5 Conclusão

A energia é um dos componentes essenciais para o desenvolvimento social e econômico de uma nação e deve estar intimamente ligado ao uso sustentável, eficiente e seguro de energia com base em abordagens ecológica e economicamente mais viáveis para o futuro da sociedade a curto e longo prazo.

No entanto, existem numerosos problemas que a sociedade moderna deve enfrentar na busca por assegurar um provisão energético sustentável, ao mesmo tempo que busca reduzir o uso energético. O rápido aumento do consumo de energia global torna o problema ainda mais complicado. As crises energéticas vivenciadas têm mostrado como as sociedades são vulneráveis à geopolítica e às influências climatológicas para o seu abastecimento.

No presente trabalho, a comparação entre os países que compõem os BRICS foi realizada por meio da construção, com a ajuda da DEA, de um índice de eficiência, que mensurou a eficiência dos países em transformar formação bruta de capital fixo, força de trabalho e consumo de energia em crescimento econômico, sem prejudicar o meio ambiente com o aumento de emissões de CO₂. Como resultado, este estudo mostrou que o Brasil apresentou a maior eficiência total de fatores (99,36%), considerando as variáveis utilizadas, seguido pelos países: África do Sul, China, Rússia e Índia.

Além disso, para melhor entender os resultados da análise de eficiência, foi feita uma análise das folgas de cada variável. A partir dessa análise, foi possível observar que o Brasil apresentou-se como *benchmarking* para os demais países nas variáveis: PIB, energia e emissões de CO₂. Outro destaque foi a África do Sul, apresentando-se sempre entre as primeiras posições no *ranking* das folgas das variáveis analisadas.

Ressalta-se que a folga não pode ser interpretada como uma meta rígida, sendo apenas um indicativo de qual variável está sendo mais prejudicial para a eficiência dos países em relação aos demais, do ponto de vista de produtividade. Logo, pode acontecer, por exemplo, de não haver possibilidades de aumentar ou diminuir as variáveis, nas proporções indicadas pelas folgas, considerando a atual estrutura do país e o cenário econômico que apresenta.

Além de analisar as folgas, fornecidas pela DEA, das variáveis consideradas neste trabalho, também foi calculado um índice de eficiência energética total de fatores (EETF). O Brasil foi o país que se apresentou com o maior índice dentro do bloco BRICS, seguido da África do Sul, China, Índia e Rússia.

Desta forma, atinge-se o objetivo de pesquisa, mostrando quais países do BRICS possuem o maior índice EETF, que considera uma estrutura total de fatores, propiciando informações sobre países *benchmark* dentro do grupo BRICS e como o Brasil se encontra nesse cenário.

Ressalta-se, no entanto, que o índice proposto neste trabalho apresenta limitações relacionadas, principalmente, com a heterogeneidade dos países comparados. Deste modo, a interpretação desse índice exige que sejam consideradas particularidades de cada país, nas dimensões sociais, econômicas e ambientais.

Assim, de acordo com os resultados apresentados, enquanto o Brasil pode ser uma referência de boas práticas sustentáveis, devendo ser mais bem examinado, a Índia pode ser merecedora de maior atenção, no que diz respeito a melhorias.

Além disso, com base no que foi analisado, pode-se dizer que há uma possibilidade de orientar a alocação de atenção e de recursos governamentais, em políticas de incentivo para adoção de medidas de eficiência energética nos países do bloco analisado que se mostraram com uma baixa colocação no *ranking*.

O presente trabalho buscou contribuir com informações qualitativas e quantitativas sobre o desenvolvimento dos países do BRICS de forma que o crescimento econômico seja alcançado sem prejudicar o meio ambiente e com a menor quantidade de fatores de produção possível. Os resultados podem ser de valia, também, para orientar o estabelecimento de políticas públicas com estratégias adequadas para melhorar a eficiência dos países considerando o contexto da sustentabilidade.

Referências

- Almeida, P.R. (2009). O papel dos BRICS na economia mundial. In Cebri-Icône-Embaixada Britânica Brasília. *Comércio e Negociações Internacionais para Jornalistas* (pp. 57-65). Rio de Janeiro: Cebri.
- Amorim, C. (2010). ¿Existe realmente el BRIC?. *Economía Exterior*, (52), 23-28.
- Armijo, L. E. (2007). The BRICS countries (Brazil, China, Russia and China) as analytical category: mirage or insight? *Asian Perspective*, 31(4), 7-42.
- Banco Mundial. (2013). *Apresenta diversas informações relativas aos países*. Recuperado em 17 de janeiro de 2013, de <http://www.worldbank.org/>.
- Banco Mundial. (2014). Recuperado em 16 de abril de 2014, de www.worldbank.org.
- Banker, R. D., Charnes, A., & Cooper, W. W. (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, 30(9), 1078-1092. <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.30.9.1078>.
- Belke, A., Dobnik, F., & Dreger, C. (2011). Energy consumption and economic growth: New insights into the cointegration relationship. *Energy Economics*, 33(5), 782-789. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2011.02.005>.
- Braga, C. (2007). *Contabilidade ambiental: ferramenta para a gestão da sustentabilidade*. São Paulo: Atlas.
- Brasil. Ministério de Minas e Energia - MME. (2007). *Matriz Energética Nacional 2030*. Brasília: EPE. Recuperado em 22 de março de 2013, de <http://www.mme.gov.br>.
- Brasil. Palácio do Planalto. Presidência da República. (2013). *Apresenta todo o material legislativo produzido na história do Brasil*. Recuperado em 21 de agosto de 2013, de <http://www2.planalto.gov.br/presidencia/legislacao>.
- Charnes, A., Cooper, W. W., Golany, B., Seiford, L., & Stutz, J. (1985). Foundations of data envelopment analysis for Pareto-Koopmans efficient empirical production functions. *Journal of Econometrics*, 30(1-2), 91-107. [http://dx.doi.org/10.1016/0304-4076\(85\)90133-2](http://dx.doi.org/10.1016/0304-4076(85)90133-2).
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429-444. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8).
- Coelli, T., Prazada, R. D. S., & Battese, G. E. (1998). *An introduction to efficiency and productivity analysis*. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers.
- Cooper, W. W., Seiford, L. M., & Tone, K. (2000). *Data Envelopment Analysis: a comprehensive Text with models, applications, reference and DEA-Solver software*. Norwell: Kluwer Academic Publishers.
- Duarte, L. (2014). *Banco dos BRICS pode ser veículo para ampliar influência da China no mundo*. Recuperado em 27 de janeiro de 2015, de http://www.bbc.co.uk/portuguese/noticias/2014/07/140713_brics_china_id.

- Empresa de Pesquisa Energética - EPE. (2012). *Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2021*. Recuperado em 13 de setembro de 2011, de <http://www.epe.gov.br>.
- Farrell, M. J. (1957). The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, 120(3), 253-281. <http://dx.doi.org/10.2307/2343100>.
- G1. (2014). *China e Rússia assinam acordo histórico de gás natural*. Recuperado em maio de 2014, de <http://g1.globo.com/mundo/noticia/2014/05/china-e-russia-assinam-acordo-historico-de-gas-natural.html>.
- Honma, S., & Hu, J. L. (2008). Total-factor energy efficiency of regions in Japan. *Energy Policy*, 36(2), 821-833. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2007.10.026>.
- Hu, J. L., & Wang, S. C. (2006). Total-factor energy efficiency of regions in China. *Energy Policy*, 34(17), 3206-3217. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2005.06.015>.
- Instituto Carbono Brasil. (2007). *China ultrapassa EUA como maior emissor de CO2*. Recuperado em abril de 2014, de http://www.institutocarbonobrasil.org.br/reportagens_carbonobrasil/noticia=197643.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (Eds). Cambridge: Cambridge University Press.
- Leonova, T., Eigel, M., & Nataliya, M. (2007). Bric countries: chalanges of decade. In 2007 International conference of Management Science & Engineering (pp. 20-22). Harbin, China.
- Lucon, J., & Goldemberg, O. (2007). Energia e meio ambiente no Brasil. *Estudos Avançados*, 21(59), 7-20.
- Mandal, S. K. (2010). Do undesirable output and environmental regulation matter in energy efficiency analysis? Evidence from Indian Cement Industry. *Energy Policy*, 38(10), 6076-6083. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.063>.
- Mariano, E. B. (2008). *Sistematização e Comparação de Técnicas, Modelos e Perspectivas não paramétricas de análise de Eficiência Produtiva* (Dissertação de mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- May, P. H. (2008). Como superar as condições entre crescimento e sustentabilidade? Inovações institucionais nos BRICS. In G. Dupas. *Meio ambiente e crescimento econômico: tensões estruturais*. São Paulo: Ed. UNESP.
- Meadows, D. H., et al. (1972). *The limits to growth*. New York: Universe Books.
- Mukherjee, K. (2008). Energy use efficiency in US manufacturing: a nonparametric analysis. *Energy Economics*, 30(1), 76-96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2006.11.004>.
- Mukherjee, K. (2010). Measuring energy efficiency in the context of an emerging economy: the case of Indian manufacturing. *European Journal of Operational Research*, 201(3), 933-941. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2009.04.012>.
- Narayan, P. K., Smyth, R., & Prasad, A. (2007). Electricity consumption in G7 countries: a panel cointegration analysis of residential demand elasticities. *Energy Policy*, 35(9), 4485-4494. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2007.03.018>.
- Nassif, A. (2006). *A economia indiana no período 1950-2004. Da estagnação ao crescimento acelerado: lições para o Brasil?* (Texto para Discussão, No. 107). Rio de Janeiro: BNDES.
- Niu, S., Ding, Y., Niu, Y., Li, Y., & Luo, G. (2011). Economic growth, energy conservation and emissions reduction: A comparative analysis based on panel data for 8 Asian-Pacific countries. *Energy Policy*, 39(4), 2121-2131. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.02.003>.
- Oggioni, G., Riccardi, R., & Toninelli, R. (2011). Eco-efficiency of the world cement industry: A data envelopment analysis. *Energy Policy*, 39(5), 2842-2854. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.02.057>.
- Pao, H. T., & Tsai, C. M. (2010). CO2 emissions, energy consumption and economic growth in BRIC countries. *Energy Policy*, 38(12), 7850-7860. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.08.045>.
- Ramanathan, R. (2006). A multi-factor efficiency perspective to the relationships among world GDP, energy consumption and carbon dioxide emissions. *Technological Forecasting and Social Change*, 73(5), 483-494. <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2005.06.012>.
- Selvakkumaran, S., & Limmeechokchai, B. (2013). Energy security and co-benefits of energy efficiency improvement in three Asian countries. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 20, 491-503. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.004>.
- Tone, K. (2001). A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 130(3), 498-509. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00407-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00407-5).
- Wang, K., Wei, Y. M., & Zhang, X. (2012). A comparative analysis of China's regional energy and emission performance. Which is the better way to deal with undesirable outputs? *Energy Policy*, 46, 574-584. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.04.038>.
- Wang, K., Wei, Y. M., & Zhang, X. (2013). Energy and emissions efficiency patterns of Chinese regions: A multi-directional efficiency analysis. *Applied Energy*, 104, 105-116. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.039>.
- Watanabe, M., & Tanaka, K. (2007). Efficiency analysis of Chinese industry: a directional distance function approach. *Energy Policy*, 35(12), 6323-6331. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2007.07.013>.
- Wu, F., Fan, L. W., Zhou, P., & Zhou, D. Q. (2012). Industrial energy efficiency with CO2 emissions in China: a nonparametric analysis. *Energy Policy*, 49, 164-172. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.05.035>.