

Determinantes de la eficiencia energética: evidencia del grupo Brics (1990-2018)*

Recibido: 12 de marzo de 2022 • Aprobado: 28 de mayo de 2022

<https://doi.org/10.22395/seec.v24n57a14>

Digna Ortega**
José Contreras***

RESUMEN

Este artículo tiene como objetivo presentar evidencias de las estimaciones del nivel de eficiencia energética y sus determinantes socioeconómicos de los países Brasil, Rusia, India, China y Sudáfrica en el periodo 1990-2018. Se estimó la función de distancia insumo para obtener los niveles de eficiencia energética bajo el enfoque del análisis de frontera estocástica con panel de datos, a través de diferentes especificaciones econométricas. Los resultados sugieren que el modelo propuesto por Kumbhakar et al. (2012) es el más adecuado debido a que permite la estimación de la eficiencia transitoria y persistente, así como también, la heterogeneidad no observada y del término de error idiosincrático. Se encontró que un incremento del precio agregado de la energía y valor agregado industrial afectan negativamente a la variabilidad de la ineficiencia transitoria. Además, China e India presentaron los mayores ahorros potenciales en el consumo de energía y en las emisiones de CO₂ asociadas en el largo plazo, mientras que en el corto plazo China y Rusia tienen el mayor ahorro potencial; siendo China el país que presenta uno de los menores promedios de eficiencia persistente y transitoria entre la muestra de países.

PALABRAS CLAVE

Eficiencia energética; función de distancia insumo; economía ambiental; energía; energía y macroeconomía; Brics.

CLASIFICACIÓN JEL

Q4, Q43, Q5

CONTENIDO

Introducción; 1. Análisis de la eficiencia energética; 2. Descripción metodológica; 3. Resultados empíricos; 4. Conclusiones y recomendaciones; Referencias; Anexos

* Este artículo de investigación es el producto de la tesis de grado "Determinantes de la eficiencia energética: evidencia del grupo BRICS (1990-2018)" presentada por Digna Ortega, con la tutoría del profesor José Contreras, para optar el título de magister en Economía Aplicada en la Universidad Católica Andrés Bello en Caracas, Venezuela. La investigación fue financiada con recursos propios y su ejecución se llevó a cabo entre enero y agosto de 2021.

** Economista, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. Magister en Economía Aplicada, Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, Venezuela. Teléfono +58 414-9237675. Correo electrónico: digna.ortegag@gmail.com

*** Matemático y Magister en Matemáticas, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. PhD en Economía, Universidad de Texas A&M, Texas, Estados Unidos. Profesor en la Universidad Metropolitana de Caracas, Venezuela. Teléfono +58 414-1809522. Correo electrónico: jcontreras@unimet.edu.ve.

Determinants of Energy Efficiency: Evidence from the Brics Group (1990-2018)

ABSTRACT

This study aims to estimate the level of energy efficiency and its socioeconomic determinants in Brazil, Russia, India, China and South Africa during the period 1990-2018. The Input Distance Function is estimated to obtain energy efficiency levels under the approach of Stochastic Frontier Analysis with data panel, through different econometric specifications. Results suggest that the model proposed by Kumbhakar et al. (2012) is the most appropriate because it allows the estimation of transitory and persistent efficiency, as well as unobserved heterogeneity and the term of the idiosyncratic error. An increase in the aggregate price of energy and industrial value added was found to adversely affect the variability of the transitory inefficiency. In addition, China and India presented the greatest potential savings in energy consumption and associated emissions CO₂ in the long term, while in the short term, China and Russia have the greatest potential savings; China is on average, among the lowest efficient country in the sample.

KEY WORDS

Energy Efficiency; Input Distance Function; Environmental Economics; Energy; Energy and Macroeconomy; Brics.

JEL CLASIFICACION

Q4, Q43, Q5.

CONTENT

Introduction; 1. Analysis of energy efficiency; 2. Methodological description; 3. Empirical results; 4. Conclusions and recommendations; References; Annexes.

Determinantes da eficiência energética: provas do grupo Brics (1990-2018)

RESUMO

Este artigo visa apresentar provas sobre as estimativas do nível de eficiência energética e os seus determinantes socioeconómicos para os países Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul durante o período 1990-2018. A função de distância de entrada para obter níveis de eficiência energética foi estimada sob a abordagem de análise de fronteira estocástica com dados de painel, utilizando especificações econométricas diferentes. Os resultados sugerem que o modelo proposto por Kumbhakar et al. (2012) é o mais apropriado porque permite a estimativa de eficiência transitória e persistente, bem como a heterogeneidade não observada e o termo de erro idiosincrático. Verificou-se que um aumento do preço agregado da energia e do valor acrescentado industrial afecta negativamente a variabilidade da ineficiência transitória. Além disso, a China e a Índia apresentaram o maior potencial de poupança no consumo de energia e as emissões associadas CO₂ a longo prazo, enquanto a curto prazo a China e a Rússia apresentam o maior potencial de poupança; com a China a apresentar uma das mais baixas médias de eficiência persistente e transitória entre a amostra de países.

PALAVRAS-CHAVE

Eficiência energética; função de distância de entrada; economia ambiental; energia; energia e macroeconomia; Brics.

CLASSIFICAÇÃO JEL

Q4, Q43, Q5.

CONTEÚDO

Introdução; 1. Análise da eficiência energética; 2. descrição metodológica; 3. Resultados empíricos; 4. conclusões e recomendações; Referências; Anexos.

INTRODUCCIÓN

La reducción del consumo de energía y las externalidades negativas asociadas, tales como las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), ha sido un objetivo principal en la mayoría de los Gobiernos y *policy makers* en el ámbito global (International Energy Agency [IEA], 2016). La eficiencia energética está ocupando su lugar en el contexto de los esfuerzos nacionales e internacionales por alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible, incluida la iniciativa de las Naciones Unidas "Energía sostenible para todos" (IEA, 2015).

La eficiencia energética revela la capacidad operativa de un país para utilizar y asignar la energía en un proceso de producción. El uso eficiente de la energía es importante para mejorar la competitividad de los países-empresas: ayuda a reducir el consumo de energía y los costos energéticos, y a contraer las emisiones de CO₂ (Zhang, 2016). No solo ofrece un potencial significativo en la mitigación de las emisiones de carbono, sino que también es reconocida por la IEA (2016) como una de las vías de menor costo e inmediatas para hacer frente al calentamiento global, ofreciendo múltiples beneficios en diferentes esferas: ambientales, sociales y económicos. Por lo tanto, ha crecido el interés por desarrollar indicadores de desempeño adecuados para hacer seguimiento a la tendencia de la eficiencia energética durante el tiempo en un país o región, o comparar el desempeño de la eficiencia energética en toda la economía entre países o regiones (Zhou et al., 2012).

Una variable *proxy* generalmente utilizada como un indicador para medir la eficiencia energética es la intensidad energética, calculada como el *ratio* simple entre el consumo final de energía y el producto interno bruto (PIB); sin embargo, la IEA (2009) considera que este no es una buena *proxy* dado que los cambios en la intensidad energética dependen de diversos factores, tales como la organización y estructura de la economía y el nivel real de la eficiencia energética. Diferentes enfoques han sido propuestos en la literatura económica de energía para solventar este inconveniente, tales como el Índice de Análisis de Descomposición (IDA) y el Análisis de Frontera (FA).

La energía es esencial para la sociedad humana y la actividad económica; es un insumo fundamental para el proceso de producción, almacenamiento y transportación de bienes y servicios, así como también en actividades de calefacción e iluminación. De acuerdo con la IEA (2018), la energía proporciona acceso a servicios energéticos modernos y asequibles, lo cual es un requisito previo para mitigar la pobreza y reducir las desigualdades.

Entre las diversas fuentes de energía, el uso de los combustibles fósiles contribuye en gran parte al incremento de las emisiones de CO₂ que afectan a los GEI, generando así una externalidad negativa al medio ambiente e impactos directos e indirectos en el bienestar social.

Según los datos de la IEA (2019), las emisiones globales de CO₂ se han incrementado en 63,4 % desde el nivel registrado en 1990 de 20.510 millones de toneladas (mt) hasta alcanzar en 2018 un nivel de 33.513,3 mt. A partir de 2005, la región de los países No pertenecientes a la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (No-OCDE), es decir, los países en desarrollo, se convirtió en la mayor responsable de la tendencia creciente de las emisiones de CO₂, con una participación relativa promedio de 56,7 % en las emisiones globales y un aumento de 132,8 % entre 1990 y 2018, alcanzando un nivel de 20.556,3 mt en 2018; lo que representó una brecha de 76,5 % con respecto al nivel observado de la región OCDE que resultó en 11.645,0 mt.

Los países miembros del grupo Brics (Brasil, Rusia, India, China y Sudáfrica) han registrado una tendencia creciente en las emisiones de CO₂ entre los años 1990 y 2018, representando en conjunto un promedio de 64,7 % de las emisiones del grupo No-OCDE, siendo los responsables del 80 % del consumo mundial de carbón en 2018, una de las principales fuentes de energía que influyen en las emisiones de dióxido de carbono.

Partiendo de los datos anteriores, las preocupaciones sobre el cambio climático se han adoptado como un aspecto integral de las políticas en las agendas de los países en el ámbito mundial por lo que se han hecho grandes esfuerzos para la mitigación de las emisiones de CO₂. Entre estas iniciativas se pueden mencionar la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Unfccc) adoptada en 1992, que fue el primer intento de estabilizar la concentración de gases invernaderos; el protocolo de Kyoto de 1997, el cual fue el primer acuerdo internacional relacionado con la Unfccc, con el objetivo de comprometer a sus países miembros —países desarrollados en su mayoría— en la reducción de emisiones de GEI, en línea con el desarrollo sostenible. Luego de años de negociaciones globales sobre el cambio climático, se firmó el Acuerdo de París en diciembre de 2015, que tenía como objetivo proseguir los esfuerzos para limitar el aumento de la temperatura global a 1,5°C con respecto a los niveles preindustriales en el contexto del desarrollo sostenible.

Estos grandes compromisos globales requieren el uso de una combinación de instrumentos; es aquí donde entra en juego el rol de la eficiencia energética. Según Evans et al. (2013), se ha identificado a la mejora de la eficiencia energética como una

de las vías más rentables para reducir las emisiones de CO₂, aumentar la seguridad del suministro energético y mejorar la competitividad de la industria.

En este sentido, algunos organismos multilaterales han dirigido grandes esfuerzos en la medición y seguimiento de la eficiencia energética, definida en términos generales como la disminución del uso de energía para producir un nivel dado de producto o servicios de energía: calefacción, iluminación, transporte, entre otros (Organización Latinoamericana de Energía [Olade], 2016).

Por consiguiente, es de interés estimar el nivel de eficiencia técnica en el uso del *input* (energía) de los países miembros del grupo Brics en el período 1990-2018 mediante la estimación de una Función de Distancia de Insumo (IDF) en el marco del Análisis de Fronteras Estocásticas (SFA) con panel de datos, a través de diferentes especificaciones econométricas que permite obtener la eficiencia persistente y transitoria de cada país.

De igual manera, se requiere determinar la relación entre un conjunto de variables socio-económicas y los cambios en la ineficiencia energética de los países Brics. Con interés particular en calcular las contribuciones potenciales a corto y largo plazo de las mejoras de eficiencia energética en la mitigación de CO₂, lo que podría brindar un panorama claro de los beneficios generados por implementar políticas de eficiencia energética.

1. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

En la literatura de economía energética algunos enfoques han sido propuestos con el objetivo de evitar dificultades conceptuales al definir y medir la eficiencia energética de un grupo de países, regiones, sectores o industrias. El primer enfoque utiliza la intensidad energética —medida como el consumo final de energía total por unidad de PIB— como una *proxy* de la eficiencia energética y emplea el Análisis de Descomposición del Índice (IDA), propuesto inicialmente por Myers y Nakamura (1978), que sirve para descomponer los cambios en la intensidad energética agregada de una economía entre los impactos del cambio estructural y los cambios en la eficiencia energética sectorial.

El segundo enfoque utiliza el Análisis de Frontera (FA), el cual se basa en la estimación de una frontera de mejores prácticas de producción, ya sea paramétrica o no-paramétrica, para el uso de energía donde el nivel de eficiencia energética es calculado como la diferencia entre el uso de energía actual y el uso óptimo-previsto de energía (Filippini y Hunt, 2011).

A diferencia del enfoque IDA, el Análisis de Frontera está fundamentado en la teoría microeconómica de producción. Para entender este enfoque, es necesario resaltar que la demanda de energía es obtenida de la demanda de *outputs* que pueden ser productos, servicios o servicios de energía —calefacción, refrigeración, iluminación, transporte, entre otros—. Por lo tanto, los hogares y las firmas utilizan energía, trabajo y capital que son considerados como *inputs* en la producción de varios *outputs* (Filippini y Hunt, 2015).

Siguiendo la teoría de producción neoclásica, la ineficiencia productiva en la producción de *outputs* puede ser discutida con el uso de isocuantas e isocostos. En este sentido, para entender el concepto de eficiencia energética puede ser útil la definición radial de la eficiencia técnica, asignativa y general introducida por Farrell (1957) y el concepto no-radial de la eficiencia técnica de *input* específico introducida por Kopp (1981).

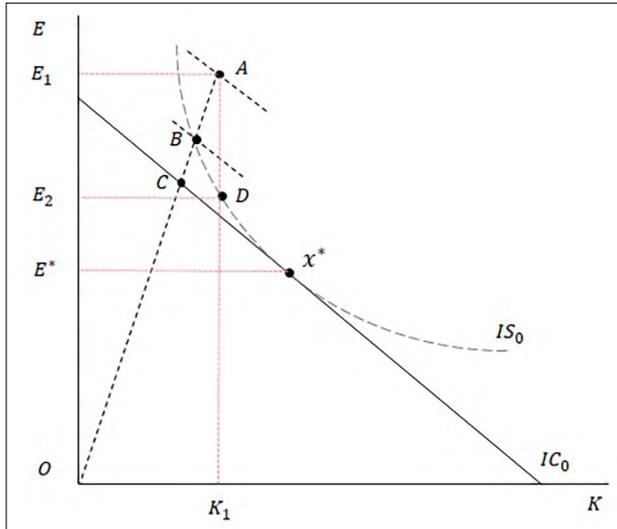
Huntington (1994) ilustra la situación en la cual un agente económico utiliza capital y energía para producir, en este caso, un servicio de energía o un *output*¹. En la figura 1 se muestra la línea de isocuanta (IS_0) e isocosto (IC_0), una unidad económica eficiente técnicamente utiliza las combinaciones de E y K que permanecen en la isocuanta (IS_0).

La combinación de *input* que minimiza los costos es descrita en el punto x^* , donde la línea de isocosto es tangente a la isocuanta. Si un agente económico utiliza una combinación de insumo definida en el punto A de la figura 1 para producir el mismo nivel de servicios de energía, es ineficiente forma técnica y en la asignación —nótese que el punto A se encuentra por encima de la isocuanta—.

Cambios en la cantidad y combinación de *inputs* mejorarían el nivel de eficiencia técnica y/o en la asignación, reduciendo el uso de ambos insumos es posible que el agente económico produzca en el nivel dado de servicios de energía empleando la combinación descrita en el punto B ; tal combinación es eficiente técnicamente, dado que se encuentra en la línea de la isocuanta, pero es ineficiente en la asignación debido a que implica con un costo mayor. Al incrementar el uso del *input* capital y al disminuir el uso de energía, el agente económico es capaz de alcanzar la combinación óptima de insumos x^* . Según Filippini y Hunt (2015), esto puede ser el caso donde un hogar o una firma deciden reemplazar aparatos electrónicos por unos más eficientes en términos energéticos o mejorar el aislamiento de un edificio.

¹ Filippini y Hunt (2015) señalan que la figura 1 podría representar la función de producción agregada de la economía para un país o región.

Figura 1. Eficiencia productiva



Fuente: elaboración propia.

Cualquier mejora en la eficiencia técnica, propuesto por Farrell (1957) y discutida por Huntington (1994), es considerada una medición radial la cual requiere una reducción proporcional de todos los *inputs* —en la energía y en los otros insumos—. Sin embargo, si el interés es obtener una medición de eficiencia técnica específica de *input* (energía), el análisis debe ser basado en una noción no-radial introducida por Kopp (1981), la cual puede ser expresada como el ratio entre la distancia del vector de *input* eficiente técnicamente D y el vector *input* A en la figura 1. Este es un caso especial de eficiencia técnica, y puede ser definida como el ratio del mínimo factible de energía (E_2) y el uso observado (E_1), condicionado a la tecnología de producción y los niveles observados del *output* y otros *inputs*.

2. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

Los estudios relacionados a la medición de la eficiencia se han enfocado frecuentemente en el Análisis de Frontera. De acuerdo con Kumbhakar y Hjalmarrsson (1995), la noción de una frontera es consistente con la teoría económica subyacente del comportamiento optimizador y las desviaciones de una frontera tienen una interpretación natural como una medida de la eficiencia con la que los agentes económicos persiguen sus objetivos técnicos o de comportamiento. Además, la información sobre la estructura de la frontera y sobre la eficiencia relativa de las unidades económicas tiene muchas aplicaciones políticas.

Existen dos enfoques fundamentales en el FA: el Análisis Envolvente de Datos (DEA) que es un enfoque no paramétrico propuesto por Charnes et al. (1978) y el Análisis de Frontera Estocástica (SFA) que es un enfoque paramétrico propuesto por Aigner et al. (1977) y Meeusen y Van den Broeck (1977).

Los modelos de fronteras estocásticas proponen que la frontera admite una cierta variabilidad aleatoria entre los distintos individuos, es decir, posee un carácter estocástico y no determinista. Permiten un término de error compuesto (ϵ) conformado por un término de error asimétrico para medir la ineficiencia (u) y el término de error simétrico idiosincrático el cual captura el ruido blanco (v).

Existen tres enfoques de estudios empíricos que se han utilizado para medir la eficiencia energética usando la metodología SFA: la función de requerimiento de energía (ERF) propuesta por Kumbhakary Hjalmarsson (1995), la función de distancia de energía Shephard (SEDF) propuesta por Zhou et al. (2012), y una función de demanda de energía (EDF) propuesta por Filippini y Hunt (2011).

Aunque en esta investigación se emplea el SFA, este estudio difiere de los mencionados anteriormente al estimar una tecnología de producción utilizando una función de distancia de insumo (IDF), en lugar de una ERF. La ERF tiene como objetivo reducir el uso de la energía en un vector de insumos para un nivel determinado de producción, condicionado a los precios de la energía y otros factores exógenos. Por lo tanto, se supone implícitamente que los demás *inputs* son fijos; de ahí que los estudios que se basan en una ERF estiman la eficiencia energética a corto plazo.

La IDF busca contraer radialmente la energía y los otros factores del vector de insumos para un determinado nivel de producción. Según Adetutu et al. (2015), este enfoque es coherente con la estimación de la eficiencia energética a largo plazo, dado que cabría esperar que los aumentos de eficiencia modifiquen los precios relativos-efectivos de los insumos; lo que daría lugar a una sustitución de factores a medida que las empresas ajustaran las combinaciones de *inputs* para aprovechar las mejoras de la eficiencia energética.

La IDF ha sido aplicada en diferentes trabajos relacionados a la medición de la eficiencia energética. Adetutu et al. (2015) realizaron un estudio para una muestra de cincuenta y cinco países, avanzados y en desarrollo, durante el periodo 1980-2010. Por su parte, Kipouros (2017) aplicó un estudio a treinta y nueve países en desarrollo durante el periodo 1989-2008. Entre la literatura revisada no hay un estudio específico del grupo Brics utilizando la IDF, siendo uno de los principales motivos para la realización de la esta investigación.

2.1 Función de distancia insumo

Partiendo de la tecnología de producción que puede ser representada por el conjunto de requerimiento de *input* $L(y) = \{K, L, E \in \mathbb{R}^+ \mid (K, L, E) \text{ puede producir } y\}$, donde K representa el insumo capital, L el insumo trabajo, E el insumo energía y y el vector de *output*, que satisface las condiciones regulares de monotonicidad, cercanía y convexidad², la IDF que caracteriza un conjunto de *input* x es definida por Kumbhakar y Lovell (2000) de la siguiente manera:

$$D^1(y, x) = \max\{\lambda: (K, L, E)/\lambda \in L(y)\}, \lambda \geq 1 \quad (1)$$

Y satisface las siguientes propiedades:

- i. Es no-decreciente en *inputs* x y no-creciente en *outputs* y .
- ii. Es linealmente homogénea en *inputs* x .
- iii. Es cóncava en *inputs*.
- iv. Es igual a la unidad si x se encuentra dentro de la frontera del conjunto de *input* (en la isocuanta).

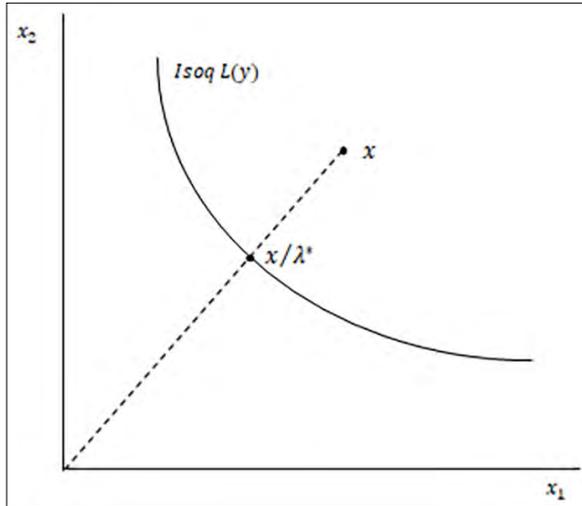
Dado un nivel de *output*, la IDF brinda el máximo nivel por el cual el vector de insumo de un individuo-país puede ser radialmente contraído y seguir siendo factible para el vector de *output* (Kumbhakar y Lovell, 2000). En la figura 2 se muestra una IDF con dos insumos, donde la isocuanta de insumo $L(y)$ representa todas las combinaciones mínimas de *inputs* x_1 y x_2 que pueden producir un nivel dado de *output*. Asimismo, se observa que el vector de *input* x es factible para el *output* y , pero y puede ser producido con el vector de *input* radialmente contraído x/λ^* así $D^1(y, x) = \lambda^* \geq 1$. Si el individuo es técnicamente eficiente, entonces $D^1(y, x) = 1$.

La IDF en el tiempo t puede ser reescrita como $D^1(y, x, t) = D^1(Y, K, L, E, t)$. Siendo igual a la unidad si un país es eficiente, es decir, si se encuentra en la frontera y mayor a 1 cuando un país es ineficiente, por lo tanto:

$$D^1(Y, K, L, E, t) - u_{it} = 0 \quad (2)$$

² Véase Kumbhakar y Lovell (2000) para más detalles sobre las propiedades de un conjunto de insumo o producción.

Figura 2. Función de Distancia Insumo



Fuente: Kumbhakar y Lovell (2000).

Donde u_{it} es el término no negativo que se refiere a la ineficiencia. Asumiendo una forma funcional *translog* en un contexto de panel de datos $i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T$ y aplicando la propiedad de homogeneidad lineal, en la cual se normaliza todos los insumos con el *input* de energía E , la ecuación (2) puede ser redefinida como:

$$-\ln E_{it} \approx T(Y, K/E, L/E, t) + v_{it} - u_{it} \quad (3)$$

Donde $T(Y, K/E, L/E, t)$ representa la tecnología como una aproximación *translog* de la función distancia; v_{it} representa el término de error simétrico idiosincrático y u_{it} el componente no-negativo de ineficiencia del término de error compuesto $\varepsilon_{it} = v_{it} - u_{it}$.

Partiendo del supuesto que el capital (K), trabajo (L) y energía (E) son los inputs utilizados para la producción del output (Y) y aplicando una aproximación *translog* de la IDF³, la ecuación (3) puede ser representada:

$$-\ln E = \alpha_o + \beta_y \ln Y + \beta_k \ln K^* + \beta_l \ln L^* + \frac{1}{2} \beta_{yy} (\ln Y)^2 + \frac{1}{2} \beta_{kk} (\ln K^*)^2 + \frac{1}{2} \beta_{ll} (\ln L^*)^2 + \beta_{yk} (\ln Y)(\ln K^*) + \beta_{yl} (\ln Y)(\ln L^*) + \beta_{kl} (\ln K^*)(\ln L^*) + \sum_{t=1991}^{t=2018} \gamma_t d_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{it} = v_{it} - u_{it}; v_{it} \sim N(0, \sigma_v^2); u_{it} \sim N^+(0, \sigma_u^2)$$

³ Las variables de los *inputs* y el *output*, así como también las variables socio-económicas, se expresan en logaritmos corregidos por la media, de manera que los coeficientes de primer orden estimados pueden ser interpretados como elasticidades en la media muestral.

Donde $K^* = K/E$ y $L^* = L/E$ son los *inputs* normalizados y d_t son las *dummies* de tiempo incluidas para capturar el cambio tecnológico⁴. Adicionalmente, las restricciones de simetría han sido impuestas en los parámetros de los términos de interacción de los *inputs* tal que $\beta_{kl} = \beta_{lk}$ en orden de asegurar la continuidad de la IDF (Kipourous, 2017).

Una vez estimada la ecuación (4), la eficiencia técnica orientada al *input* (energía)⁵ de la economía de cada país en cada periodo (EF_{it}) puede ser obtenida siguiendo el método de predicción de Battese y Coelli (1988), que estima EF_{it} como la expectativa condicional del término de error asimétrico u_{it} dado el error compuesto ε_{it} :

$$EF_{it} = E[\exp(-u_{it} | \varepsilon_{it})] \quad (5)$$

De esta manera, la eficiencia estimada evalúa el grado en el cual los países podrían disminuir su nivel de uso de energía relativo a la frontera, manteniendo el *output* constante.

Una puntuación de eficiencia energética igual a uno indica que el país se encuentra en la frontera —100 % eficiente—, mientras que los países que no están en la frontera, por ejemplo, los que se caracterizan por un nivel de eficiencia energética inferior al 100 %, reciben puntuaciones inferiores a uno.

2.2 Estimación de la función de distancia insumo: métodos econométricos con panel de datos

Este estudio considera un panel de datos balanceado de cinco países ($i=5$) durante el periodo 1990-2018 ($t=29$), cuyo nivel de eficiencia energética de la economía será comparado, asumiendo un marco neo-clásico de producción agregada, en el cual E , K y L serán tratados como *inputs* y Y como el *output*.

(E) es el consumo final de energía total expresado en millones de toneladas de petróleo equivalente (mtoe) obtenido de la base de datos de la IEA (2020); (K) es la formación bruta de capital fijo utilizada como variable *proxy* del *stock* de capital⁶

⁴ Según Kumbhakar y Lovell (2000), incluir una tendencia de tiempo como una variable regresora en un modelo de frontera como *proxy* del progreso técnico podría traer problemas en la estimación, debido a que dificulta distinguir entre los cambios técnicos y los cambios en la eficiencia técnica cuando ambos varían en el tiempo; una alternativa sugerida es incluir variables *dummies* de tiempo. Se incluyen t-1 *dummies* de tiempo para evitar multicolinealidad.

⁵ Debido a que se estima una IDF, el término de eficiencia técnica orientada al *input* (energía) se considera que es el adecuado para referirse a la eficiencia energética de un individuo-país; sin embargo, a lo largo de esta investigación se hace uso del término de eficiencia energética que es el utilizado frecuentemente en los diferentes estudios relacionados al análisis de eficiencia en el uso de energía.

⁶ Es importante aclarar que el flujo de capital fijo se consideró como la variable que explica mejor el modelo a diferencia del *stock* de capital, debido a que el flujo contiene nuevas máquinas de tecnologías ahorradoras de energía.

y (Y) es el producto interno bruto (PIB), ambas variables expresadas en millones de USD a precios constantes de 2010 extraídas de los Indicadores de Desarrollo del Banco Mundial; y la variable (L) es el número de personas empleadas (millones) obtenidas de Penn World Table (Versión 10.0). En la tabla A1 del anexo se presenta la estadística descriptiva de las variables utilizadas en la IDF.

Bajo la perspectiva econométrica, se pueden utilizar diferentes especificaciones para la estimación de la IDF bajo el enfoque del SFA. Existen modelos que sirven para distinguir entre los efectos de la heterogeneidad no observada de los individuos y el término de ineficiencia, y cómo este último puede ser tratado, de tiempo-invariante —persistente— y/o tiempo-variante —transitorio—.

Según Filippini y Greene (2016), la ineficiencia persistente está relacionada a la presencia de problemas estructurales en la organización del proceso de producción de una firma o la presencia de deficiencias sistemáticas en las capacidades de gestión. Por otro lado, la ineficiencia transitoria se relaciona a la presencia de problemas de gestión no sistemáticos que pueden ser resueltos en el corto plazo. La estimación de ambos tipos de ineficiencias es importante para el diseño de políticas públicas de corto y largo plazo.

El modelo de efectos fijos (FEM) propuesto por Schmidt y Sickles (1984), captura el término de ineficiencia invariante con un panel de datos de efectos fijos, en el cual cualquier efecto de heterogeneidad no observada permanente en el tiempo es considerado como ineficiencia. En este caso, no se requiere ningún supuesto especial sobre la distribución de u_i y es permitido que esté correlacionado con las variables regresoras y con v_{it} , que es asumido $iid(0, \sigma_v^2)$; y puede ser estimado a través de la "transformación dentro".

El modelo de efecto fijo "verdadero" (TFEM) propuesto por Greene (2005) mide la ineficiencia transitoria a través del método de máxima verosimilitud con variables dicótomas. Captura todos los efectos no observados de tiempo-invariante usando efectos individuales fijos y genera valores separados de los términos de ineficiencia de tiempo-variante. Sin embargo, cualquier componente permanente en el tiempo del término de ineficiencia que pueda aparecer, por ejemplo, sujeto a la presencia en un país de casas antiguas o un sistema de planificación urbano que no se minimiza a través del tiempo, es absorbido en el término de efectos individuales (α_i).

Trabajos más recientes, como el de Kumbhakar et al. (2012) y Colombi et al. (2014) introducen un modelo de SFA que separa la ineficiencia de tiempo-variante (transitoria) de la persistente, y los efectos de heterogeneidad no observada del término de ruido blanco. El modelo de Kumbhakar et al. (2012), denominado

modelo KLH, puede ser estimado bajo un procedimiento simple de multi-etapas⁷, el cual puede ser extendido en las etapas 2 y 3 al incluir una media no-cero del componente de ineficiencia transitoria y persistente, también al tomar en cuenta la heterocedasticidad en uno o ambos componentes⁸.

Siguiendo la metodología planteada por el modelo KLH, la ecuación (4) puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 -\ln E &= \alpha_o + \beta_y \ln Y + \beta_k \ln K^* + \beta_l \ln L^* + \frac{1}{2} \beta_{yy} (\ln Y)^2 + \\
 &\frac{1}{2} \beta_{kk} (\ln K^*)^2 + \frac{1}{2} \beta_{ll} (\ln L^*)^2 + \beta_{yk} (\ln Y)(\ln K^*) + \beta_{yl} (\ln Y)(\ln L^*) + \beta_{lk} (\ln K^*)(\ln L^*) + \sum_{i=1991}^{t=2018} \gamma_i d_i + \varepsilon_{it} \tag{6} \\
 \varepsilon_{it} &= \tau_i + v_{it} - \mu_i - u_{it}; \\
 \tau_i &\sim N(0, \sigma_\tau^2); v_{it} \sim N(0, \sigma_v^2); \mu_i \sim N^+(0, \sigma_\mu^2); u_{it} \sim N^+(0, \sigma_u^2)
 \end{aligned}$$

Tabla 1. Especificaciones econométricas de la IDF

	FEM	TFEM	KLH
Efectos específicos	Fijos	Fijos	$iid N(0, \sigma_\tau^2)$ $\varepsilon_{it} = \tau_i + \mu_i + u_{it} + v_{it}$
Error aleatorio compuesto (ε_{it})	$iid N(0, \sigma_\varepsilon^2)$	$u_{it} \sim N^+(0, \sigma_u^2)$ $v_{it} \sim N(0, \sigma_v^2)$	$\mu_i \sim N^+(0, \sigma_\mu^2)$ $\tau_i \sim N(0, \sigma_\tau^2)$ $u_{it} \sim N^+(0, \sigma_u^2)$
Método de estimación	DG	MVVD	MM
Estimador de ineficiencia persistente/largo plazo	$\max(\hat{\alpha}_i) - \hat{\alpha}_i$	-	$E(\mu_i \varepsilon_{it})$
Estimador de ineficiencia transitoria/corto plazo	-	$E(u_{it} \varepsilon_{it})$	$E(u_{it} \varepsilon_{it})$

Fuente: elaboración propia.

Notas:

En el FEM el término de error aleatorio (ε_{it}) no es compuesto

DG: estimador dentro del grupo

MVVD: máxima verosimilitud con variables dicótomas

MM: estimador del método de los momentos

μ_i : componente de ineficiencia persistente; u_{it} : componente de ineficiencia transitoria

τ_i : heterogeneidad individual no observada; v_{it} : término de ruido blanco

⁷ La estimación del modelo KLH también puede ser bajo el método de Máxima Verosimilitud de una etapa basado en supuestos sobre la distribución en los cuatros componentes (Colombi et al., 2014).

⁸ La media no-cero hace referencia a la media condicional, es decir, a la parametrización de la media de ambos componentes de ineficiencia. Véase Kumbhakar et al. (2012) para más detalle sobre el procedimiento de multi-etapas.

Donde μ_i y u_{it} son los términos no negativos de ineficiencia persistente y transitoria, respectivamente. Mientras que τ_i y v_{it} son los efectos no observados de los países y el ruido blanco, respectivamente.

A partir del modelo KLH, se estimó la IDF para obtener los niveles de eficiencia energética persistente y transitoria. De igual manera, se utilizaron las dos especificaciones mencionadas anteriormente (FEM y TFEM) para aportar mayor robustez al análisis de resultados. La tabla 1 provee detalladamente un resumen de las especificaciones econométricas de los modelos.

2.3 Estimación de los determinantes socioeconómicos de la ineficiencia energética

Bajo el enfoque de las fronteras estocásticas, una función de frontera de producción típica asume homogeneidad en los individuos y homocedasticidad en los errores; sin embargo, estos supuestos pueden ser flexibilizados a través de la introducción de variables exógenas que son diferentes de los factores de producción, pero afectan o influyen la ineficiencia técnica de una muestra de firmas/países en las diferentes partes del modelo SFA (Adetutu et al., 2015).

Siguiendo el argumento de Kumbhakar y Lovell (2000), estimar el impacto de factores exógenos observables específicos del país en la ineficiencia resulta conveniente debido a que tales factores reflejan el entorno operativo y probablemente son responsables de forma parcial en el desempeño de la eficiencia energética entre los países.

Por lo tanto, con este enfoque es posible examinar las influencias exógenas en ambos componentes de la ineficiencia transitoria y persistente, obtenidos por el modelo KLH, al parametrizar la varianza de ambos términos⁹; lo que permitiría capturar el impacto de la estructura de la economía, demografía, geografía y clima en la ineficiencia energética del grupo Brics.

Las varianzas de los componentes de ineficiencia pueden ser parametrizadas siguiendo a Caudill et al. (1995) de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\mu_i &\sim N^+(0, \sigma_{\mu_i}^2); \sigma_{\mu_i}^2 = \exp(\psi' z_{it}) \\ u_{it} &\sim N^+(0, \sigma_{u_{it}}^2); \sigma_{u_{it}}^2 = \exp(\delta' z_{it})\end{aligned}\tag{7}$$

⁹ La parametrización de la varianza dirige a lo que se denomina "heterocedasticidad condicional". Según Kumbhakar y Lovell (2000), ignorar la heterocedasticidad en el término de ineficiencia podría arrojar estimaciones de parámetros inconsistentes en el modelo.

Donde z_{it} es el vector que contiene las variables socioeconómicas de tiempo-variante e invariante que representan el conjunto de características observables entre los países. ψ' y δ' son los vectores de los parámetros a ser estimados (denominados efectos de ineficiencia).

Siguiendo a Hadri (1999), se puede comprobar la especificación de doble heterocedasticidad (DCH), la cual permite que las variables exógenas afecten a ambos componentes, la ineficiencia y el término de error idiosincrático, por lo tanto, en la ecuación (6) se puede definir el término idiosincrático como:

$$v_{it} \sim N(0, \sigma_{v_{it}}^2); \sigma_{v_{it}}^2 = \exp(h'z_{it}) \quad (8)$$

Donde h' es el vector de parámetros a ser estimados.

En este contexto, la especificación para estimar los niveles de ineficiencia energética —transitoria y persistente— y sus influencias subyacentes combina las ecuaciones (6), (7) y (8). Es importante destacar que permitir que el componente de ineficiencia sea afectado por características específicas de los países, facilita a los *policy makers* examinar los determinantes de la ineficiencia y, por lo tanto, sugerir políticas de intervención para mejorar la eficiencia energética (Kipourous, 2017).

Las variables socio-económicas utilizadas en este estudio fueron consideradas siguiendo la literatura revisada. En primer lugar, se incluyen los precios de la energía (*PE*), que, según la teoría a mayores precios de la energía, se forzará la adopción de tecnologías de mayor eficiencia energética. Según Adom (2015), en un mercado competitivo, mayores precios de la energía causará la adopción de tecnologías que utilizan una mayor proporción de capital y trabajo, así la productividad marginal del trabajo y capital decrecerán, pero la productividad marginal de la energía se incrementará¹⁰.

La cuota industrial del valor agregado (*VAI*) ha sido relacionada con la eficiencia energética en los trabajos de Adom (2015) y Adetutu et al. (2015). El impacto de *VAI* en la *EF* puede ocurrir de dos maneras: a mayores niveles de actividades industriales podría incrementar la demanda de energía, así reduciendo la eficiencia energética. Por otro lado, un aumento en las actividades industriales podría atraer desarrollo tecnológico que puede incrementar la eficiencia energética (Adebisi, 2017).

¹⁰ Adom (2015) señala que los resultados de Fisher-Vaden et al. (2004) mostraron que un incremento en el precio relativo de los diferentes tipos de energía aumenta la eficiencia energética en China. Por su parte, indica que Cornillie y Fankhanser (2004), Hang y Tu (2007) y Lin y Moubarak (2014) provienen un fuerte apoyo al efecto ahorro-energía del precio de la energía.

Las entradas de inversión extranjera directa (*IED*) pueden introducir tecnologías avanzadas y habilidades gerenciales en los países anfitriones, causando un incremento del *output* con menores requerimientos de energía (Mielnik y Goldemberg, 2002)¹¹.

La intensidad de intercambio (*II*) usualmente es utilizada para medir la apertura comercial, según Adom (2015), podría inducir en la eficiencia energética en dos maneras: el efecto de atracción —*the pull effect*—, argumenta que a mayor grado de apertura comercial, mejora las oportunidades del país anfitrión en aprender a imitar a los países extranjeros (Grossman y Helpman, 1991). Por su parte, el efecto de empuje —*the push effect*— establece que una economía que está bien integrada con el resto del mundo puede crear un ambiente competitivo que podría hacer que las empresas nacionales adopten nuevas tecnologías, para así mejorar su eficiencia energética y su adaptación al intenso mercado internacional (Holmes y Schmidt, 2001)¹².

En sintonía con las últimas tres variables mencionadas previamente, se puede considerar el impacto de las siguientes interacciones: (*IED*×*II*) y (*IED*×*VAI*). Según Adebisi (2017), en la primera se espera que países que están más integrados con el resto del mundo tengan mayor probabilidad de tener mayor acceso a la IED y así una mayor eficiencia energética. De igual manera, en la segunda interacción se espera que países con mayores actividades industriales puedan tener mayor capacidades tecnológicas, y con IED pueden tener mayor acceso a la tecnología extranjera, y así una mayor eficiencia energética.

Entre las variables sociales se incluye el tamaño del área de cada país (*AREA*) que podría jugar un rol importante en el nivel de la eficiencia energética. El tamaño de la población (*POB*) podría tener un efecto positivo o negativo en la eficiencia energética: los países con mayor población podrían agregar más infraestructuras eficientes en el uso de energía, con el fin de compensar las necesidades de energía a diferencia de los países con una menor población. Por otra parte, si la infraestructura no se mantiene acorde con el tamaño de la población, los países podrían tener una

¹¹ Adom (2015) señala los resultados de algunos trabajos relacionados con la IED y la eficiencia energética o intensidad energética. En el análisis de Eskeland y Harrison (2003) se explica que las plantas de propiedad extranjera son asociadas con menores emisiones en comparación con las plantas de propiedad nacional. Esto en la medida de que el uso de energía sea una buena *proxy* de emisiones de la contaminación del aire. Hubler (2009) concluye que la IED puede ser un incentivo para implementar tecnologías de energía eficiente, mientras que Cole (2006) indica que existe ciertas condiciones económicas o características del país que mejoran el impacto de la IED en la intensidad energética.

¹² Según Fisher-Vanden et al. (2004), Cole (2006) y Shen (2007) la apertura comercial reduce la intensidad energética en China, debido a que la energía ahorrada por las importaciones supera la energía consumida por las exportaciones (Adom, 2015).

menor eficiencia energética debido a la mayor utilización de instalaciones antiguas y la congestión del tráfico (Moshiri y Duah, 2016)¹³.

La temperatura media anual (*TEMP*) puede ser utilizada como una *proxy* de la condición climática del país e influye en el uso de energía a través del incremento de la demanda por calefacción y refrigeración en hogares y negocios; por lo tanto, en el nivel de eficiencia energética (Metcalf, 2008). Otra variable a considerar es la tendencia del tiempo (*t*) que captura el progreso técnico y otros factores exógenos no-económicos, tales como el comportamiento de los consumidores y el estilo de vida. Sin embargo, la medición de los factores no-económicos no es fácil de obtener, según Chitnis y Hunt (2012) podrían tener un efecto no lineal en la eficiencia energética, por lo tanto, se incluye la tendencia del tiempo al cuadrado (t^2).

Los datos de las variables socio-económicas son extraídos de los Indicadores de Desarrollo del Banco Mundial, a excepción de los precios de la energía que fueron tomados del Sistema de Precio de Commodity Primario (PCPS) del Fondo Monetario Internacional y para la variable temperatura media anual, se utilizó la serie de datos del Portal de Cambio Climático del Banco Mundial. En la tabla A1 del anexo se presenta la estadística descriptiva de las variables utilizadas en el análisis.

3. RESULTADOS EMPÍRICOS

3.1 Estimación de la eficiencia energética del grupo Brics

En aras de evitar el error de especificación funcional, se realiza el Test de Razón de Verosimilitud (LR test)¹⁴ para probar si la forma funcional de la IDF es de tipo Cobb-Douglas (hipótesis nula) contra la hipótesis alternativa que considera una forma funcional tipo translogarítmica.

En la tabla 2 se muestra los resultados del LR test, el cual arrojó un valor de chi-cuadrado significativo al 1% y que permite rechazar la hipótesis nula

¹³ Adetutu et al. (2015) indican que una variable explicativa más apropiada para el tamaño de área y población es la densidad de población residencial, ya que un país grande puede tener muchas áreas no residenciales y actividades de bajo consumo de energía. Esto aplicaría para los países del Brics, pero es complejo acceder a los datos de sus "áreas residenciales". Por su parte, señalan que la significancia estadística de las variables *AREA* y *POB* en sus resultados indican que estas influyen en el desempeño del uso de la energía, además consideran que este enfoque es consistente con los trabajos previos sobre el impacto del tamaño del país (vía tamaño de área o población) en el desempeño macroeconómico (Milner y Westtaway, 1994; Weyman-Jones y Milner, 2003).

¹⁴ El *ratio* de verosimilitud (λ) viene dado por:

$$\lambda = -2 \left[\ln \{L(H_0)\} - \ln \{L(H_1)\} \right]$$

Donde $L(H_0)$ y $L(H_1)$ denotan el valor de la función de verosimilitud bajo la hipótesis nula (H_0) y alternativa (H_1). Tiene una distribución aproximada de χ^2 con grados de libertad igual al número de restricciones independientes.

($H_0 : \beta_{yy} = \beta_{kk} = \beta_{ll} = \beta_{yk} = \beta_{yl} = \beta_{kl} = 0$); por lo tanto, la función tipo *translog* no se reduce a un modelo Cobb-Douglas, implicando ser la forma funcional ideal de la IDF.

De igual manera, se realizó la prueba de Hausman para comprobar si los efectos no observados de los individuos son fijos (FEM) o aleatorios (REM)¹⁵. Los resultados indican que para un nivel de significancia de 1%, se rechaza la hipótesis nula que considera un REM, en favor del FEM (tabla 2).

El test de asimetría resultó con un valor de -0,33 y con un p-value de 0,09; indicando que la hipótesis nula de no asimetría en los residuos puede ser rechazada¹⁶. El signo negativo sugiere que la distribución de la simetría de los residuos está hacia la izquierda lo cual es consistente a una especificación de la frontera de producción; por lo tanto, la hipótesis nula de una especificación de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) es rechazada a un nivel de 10 % de significancia (tabla 2)¹⁷.

Tabla 2. Tests de correcta forma funcional de la IDF

	Hipótesis nula	χ^2	gl	p-value	Regla de decisión
Tecnología CD	$H_0 : \text{términos de interacción} = 0$	113,50	33	0,00	Rechazo H_0
Test de Hausman	$H_0 : \text{REM}$	63,98	3	0,00	Rechazo H_0
Test de asimetría de los residuos	$H_0 : \text{No asimetría}$	-	-	0,09	Rechazo H_0

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 3 se muestra los resultados de las estimaciones de la IDF mediante las diferentes especificaciones econométricas, como se esperaba, los modelos presentan elasticidades positivas para los *inputs* y negativa para el *output* dadas por los coeficientes de primer orden, siendo estadísticamente significativos al nivel de 1%,

¹⁵ La hipótesis nula en la que se basa el test de Hausman es que la diferencia entre los coeficientes del FEM y REM no es sistemática o no difieren considerablemente. Si se rechaza la hipótesis nula, se concluye que el REM no es apropiado debido a que es probable que los efectos aleatorios estén correlacionados con una o más regresoras, en ese caso, el FEM se prefiere al REM. El estadístico de prueba que se desarrolla tiene una distribución asintótica χ^2 .

¹⁶ Una prueba de la hipótesis nula de ausencia de asimetría frente a la hipótesis alternativa puede construirse utilizando los residuos de MCO (Kumbhakar et al., 2015). Si la asimetría estimada tiene el signo esperado, el rechazo de la hipótesis nula apoya la existencia del error unilateral (ineficiencia). Schmidt y Lin (1984) sugieren un estadístico basado en el momento de la muestra para el test de asimetría.

¹⁷ Es importante señalar que, aunque la derivación de la ecuación (6) parte desde la IDF, es de hecho un modelo SFA orientado al *output* (después de una transformación), tal como lo señalan Zhou et al. (2012) con la SEDF, en el sentido de que hay un signo menos antes del término de ineficiencia. A simple vista, la ecuación (6) parece un modelo de frontera de producción de un solo *output*, en el cual el recíproco del uso de energía es tomado como el indicador "output".

sugiriendo que la tecnología de producción subyacente es monotónica en la media muestral, lo que significa que es no-decreciente en *inputs* y no-creciente en el *output*.

En el FEM, los resultados indican que la fracción de la varianza del término de error compuesto sujeta al componente de ineficiencia de tiempo invariante (u_i), es decir, $\rho = \sigma_u^2 / \sigma_\varepsilon^2$ resultó de 99,9 %.

De igual manera, en el TFEM el indicador de la variabilidad relativa (λ) entre el componente de ineficiencia de tiempo-variante (u_{it}) y el ruido blanco (v_{it}) resultó significativo y señala que σ_u es la fuente dominante en la variación aleatoria en el modelo¹⁸. Por su parte, la mayoría de los coeficientes de las dummies temporales que fueron incluidas como una *proxy* del progreso técnico, resultaron significativas de manera individual y en conjunto en ambos modelos (FEM y TFEM)¹⁹.

En el caso del modelo de Kumbhakar et al. (2012) ajustado al enfoque FEM (denominado KLH), todos los coeficientes de las variables regresoras son significativos a un nivel de 1 %; de igual manera, las *dummies* anuales resultaron significativas en conjunto.

Tabla 3. Coeficientes estimados de la IDF

Variable	Parámetro	FEM	TFEM	KLH
Constante	α_0	0,3447*** (0,0810)	-	0,5212*** (0,0553)
$\ln(K)/(E)$	β_k	0,2280*** (0,0399)	0,2392*** (0,0840)	0,6955*** (0,0449)
$\ln(L)/(E)$	β_l	0,7130*** (0,0524)	0,6475*** (0,0940)	-0,6331*** (0,0312)
$\ln Y$	β_y	-0,6571*** (0,0691)	-0,7235*** (0,0606)	-1,4967*** (0,0227)
$(\ln(K/E))^2/2$	β_{kk}	0,0982** (0,0425)	0,0624 (0,0671)	-0,4559*** (0,0898)
$(\ln(L/E))^2/2$	β_{ll}	-0,4353*** (0,0479)	-0,3579*** (0,0395)	-1,4806*** (0,0808)
$(\ln Y)^2/2$	β_{yy}	0,5616*** (0,0569)	0,5727*** (0,0986)	-0,4283*** (0,0504)
$\ln(K/E)*\ln(L/E)$	β_{kl}	-0,0871*** (0,0270)	-0,0928*** (0,0255)	0,1379*** (0,0445)

¹⁸ El parámetro λ proporciona información de la contribución relativa de u_{it} y v_{it} en el término de error descompuesto ε_{it} . Cuando $\lambda \rightarrow 0$ implica que $\sigma_v \rightarrow 0$ y/o $\sigma_u \rightarrow \infty$, es decir, el término de error asimétrico es la fuente dominante en la variación aleatoria en el modelo.

¹⁹ La IDF también fue estimada incluyendo una tendencia de tiempo; sin embargo, los resultados no fueron adecuados.

Variáble	Parámetro	FEM	TFEM	KLH
$\ln (K/E)*\ln Y$	β_{ky}	-0,3069*** (0,0422)	-0,3061*** (0,0899)	0,3259*** (0,0580)
$\ln (L/E)*\ln Y$	β_{ly}	0,1404*** (0,0345)	0,1670*** (0,0459)	-0,3116*** (0,0451)
Dummies anuales (omitidas)				
d_2	φ_1	-	0,4865*** (0,1584)	-
d_3	φ_2	-	-1,0604*** (0,0495)	-
d_4	φ_3	-	-1,3158*** (0,0663)	-
d_5	φ_4	-	-0,0795 (0,2652)	-
	σ_u	0,9070	0,0394*** (0,0021)	0,9070
	σ_v	-	0,0000* (0,0000)	-
	σ_e	0,0298	-	0,0298
	ρ	0,9989	-	0,9989
	λ	-	1488,7190*** (0,0021)	-
Log likelihood		-	363,48	-
		0,4214	-	0,9920
Wald test		299,32***	442000***	17007,83***

Fuente: elaboración propia.

Notas:

Los valores entre paréntesis representan la desviación estándar.

* Coeficiente significativo al 10 %

** Coeficiente significativo al 5 %

*** Coeficiente significativo al 1 %.

1) Los resultados son obtenidos con Stata 15

2) El modelo KLH es estimado asumiendo heterocedasticidad en la estructura del error. En la sección 3.2 se explica con más detalles sobre este punto

3) Parámetros de los componentes de error:

σ_u representa la desviación estándar del componente de ineficiencia

σ_v representa la desviación estándar del componente de ruido blanco

σ_e representa la desviación estándar del componente de error compuesto

La estadística descriptiva de los niveles de eficiencia energética estimados se muestra en la tabla 4. Los resultados sugieren que los valores promedios de la eficiencia energética transitoria varían entre 97,3 % en el TFEM y 98,6 % en la parte transitoria del modelo KLH (KLH-T), mientras que los valores de la eficiencia persistente en el FEM y en la parte persistente del modelo KLH (KLH-P) son relativamente iguales (53,6 %). En promedio, el nivel de la eficiencia energética transitoria del grupo de los Brics resultó mayor que la eficiencia persistente, reflejando posiblemente debilidad en las regulaciones de eficiencia en el uso de energía en los países en desarrollo, problemas estructurales en la producción de servicios de energía y cualquier otra permanencia en fallas de comportamiento y gerencia (Kipouros, 2017).

Tabla 4. Resumen estadístico de los niveles de eficiencia energética del Brics

<i>Modelo</i>	<i>Media</i>	<i>Desv. Est.</i>	<i>Máx.</i>	<i>Mín.</i>
FEM	0,5362	0,3357	1,0000	0,1328
TFEM	0,9731	0,0270	0,9999	0,8833
KLH-P	0,5362	0,3357	1,0000	0,1328
KLH-T	0,9865	0,0134	0,9997	0,9298
KLH-O	0,5288	0,3314	0,9980	0,1235

Fuente: elaboración propia.

En términos de la ineficiencia energética persistente, el uso de energía del grupo Brics incurre en un consumo final de energía promedio que está aproximadamente 86,6 % $((1/0,536)-1)$ por encima del consumo mínimo definido por la frontera; esto implica que el consumo medio final de energía observado podría reducirse en 86,6 % sin disminuir la producción, si se pudiera eliminar la ineficiencia de tiempo-invariante. Mientras que, el consumo final de energía promedio podría reducirse en 1,4 % $((1/0,986)-1)$ si se elimina la ineficiencia transitoria.

Por su parte, la eficiencia general²⁰ promedio obtenida por el modelo KLH (KLH-O), la cual es la interacción de la eficiencia persistente y transitoria, resultó en 52,8 %: lo que significa que el consumo medio final de energía podría disminuirse en 89,4 %; permaneciendo la producción constante, si ambas ineficiencias se eliminan en el uso de energía del grupo Brics. El coeficiente de correlación señalado en la tabla 5 entre los valores estimados de la eficiencia persistente obtenidos del FEM y KLH-P es notablemente alto y significativo al ubicarse en 1; lo que indica que ambos modelos proveen información suficiente con respecto a la eficiencia energética persistente del Brics, mientras que el coeficiente de correlación entre los valores

²⁰ La eficiencia general es obtenida del producto de la eficiencia persistente y la eficiencia transitoria.

estimados de la eficiencia transitoria a partir del TFEM y KLH-T es relativamente bajo y significativo al ubicarse en 0,64.

Tabla 5. Correlación entre los niveles de EF obtenidos de los diferentes métodos

	FEM	TFEM	KLH-P	KLH-T	IE
FEM	1				
TFEM	0,0075	1			
KLH-P	1,0000	0,0075	1		
KLH-T	-0,1149	0,6433	-0,1149	1	
IE	-0,2214	0,0309	-0,2214	-0,1827	1

Fuente: elaboración propia.

Nota: Los coeficientes de correlación están basados en el rango de Spearman.

Por su parte, los niveles estimados de eficiencia energética obtenidos a través de los diferentes métodos, están correlacionados negativamente con la intensidad energética (IE), tal como se esperaba, a excepción de la EF transitoria obtenida por el TFEM, cuya relación con la IE parece ser positiva pero débil ($\rho= 0,03$). Considerando el argumento señalado por Fillippini y Hunt (2011, 2012), la técnica utilizada en este estudio podría ser una herramienta importante para los *policy makers* al proveer información útil; siempre y cuando las eficiencias estimadas no tengan una correlación negativa perfecta o casi perfecta con la intensidad energética, debido a que, en ese caso, toda la información necesaria se obtendría a partir de esta última variable²¹. Los resultados sugieren que la IE es una *proxy* débil de la eficiencia energética para el grupo Brics, principalmente de la EF persistente y transitoria estimada por KLH-P y KLH-T, respectivamente.

Los resultados de la tabla 6 muestran que para los años seleccionados 1992, 2005 y 2018 la eficiencia energética transitoria estimada por KLH-T es mayor que la eficiencia energética persistente (KLH-P), tal como se esperaba, excepto en el caso de Rusia, cuyo nivel de EF persistente es de 100 %²². En 2018, China y Rusia fueron los países con mayores niveles de eficiencia transitoria del grupo Brics al registrar un nivel de 99,9 % y 99,8 %, respectivamente.

²¹ Fillippini y Hunt (2011, 2012) estimaron una función de demanda de energía aplicado a los países de la OCDE y al sector residencial de Estados Unidos, respectivamente, bajo el enfoque de frontera de demanda estocástica.

²² Los niveles de eficiencia transitoria obtenidos del modelo KLH se presentan a partir de 1992 debido a la disponibilidad de los datos de las variables socioeconómicas que son incluidas en el modelo asumiendo heterocedasticidad en la estructura del error. En la sección 3.2 se explica con más detalles sobre este punto.

Tabla 6. Resumen de los niveles individuales estimados de la eficiencia energética del Brics

País	FEM	Enfoque TFEM de Greene (2005)					
	Eficiencia persistente	Eficiencia transitoria			Eficiencia general		
		1990	2005	2018	1990	2005	2018
Brasil	0,7549	0,9999	0,9571	0,8870	0,7548	0,7225	0,6696
Rusia	1,0000	0,8833	0,9570	0,9999	0,8833	0,9570	0,9999
India	0,1787	0,9531	0,9497	0,9652	0,1703	0,1697	0,1725
China	0,1328	0,9999	0,9117	0,9318	0,1328	0,1211	0,1238
Sudáfrica	0,6144	0,9999	0,9999	0,9391	0,6144	0,6144	0,5770

País	Kumbhakar et al. (2012) ajustado al enfoque de FEM						
	Eficiencia persistente	Eficiencia transitoria			Eficiencia general		
		1992	2005	2018	1992	2005	2018
Brasil	0,7549	0,9966	0,9931	0,9396	0,7523	0,7497	0,7093
Rusia	1,0000	0,9891	0,9848	0,9980	0,9891	0,9848	0,9980
India	0,1787	0,9731	0,9909	0,9957	0,1739	0,1771	0,1779
China	0,1328	0,9873	0,9397	0,9996	0,1311	0,1248	0,1328
Sudáfrica	0,6144	0,9881	0,9945	0,9782	0,6071	0,6111	0,6011

Fuente: elaboración propia.

Notas:

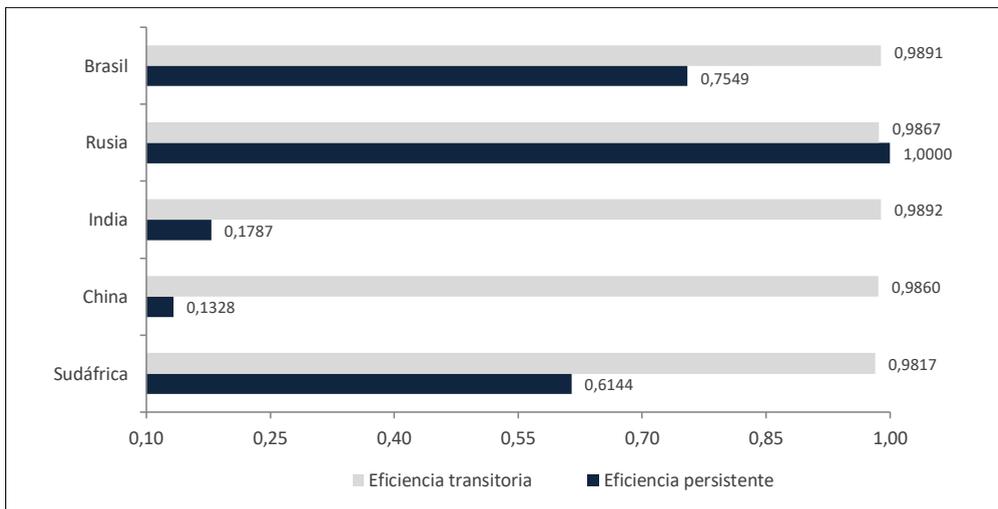
La eficiencia general es derivada de $EF_{persistente} * EF_{transitoria}$. En el FEM se utilizó el estimador "dentro del grupo" el cual requiere que al menos un individuo sea 100 % eficiente técnicamente, con las eficiencias técnicas de los individuos restantes siendo medidas en relación al individuo más eficiente.

En relación con la eficiencia energética persistente, Rusia, Brasil y Sudáfrica son los países con los mayores niveles de eficiencia entre la muestra, y, por lo tanto, tienen el nivel más alto de eficiencia general en los años seleccionados. En el caso de India y China, a pesar de mostrar una ligera mejora en la eficiencia del uso de energía de tiempo-variante, pareciera que sus niveles de ineficiencia persistente presionan a la baja a sus niveles de eficiencia general durante el periodo de estudio; esto podría ser causado por la presencia de la antigüedad en edificios, máquinas de producción y sistemas de carreteras o fallas sistemáticas de comportamiento, tales como el no ajuste de la temperatura ambiente (Filippini y Hunt, 2015).

Los resultados obtenidos mediante los métodos de estimación alternativos, en el FEM y el en el TFEM, para la eficiencia persistente y transitoria, respectivamente, son consistentes y siguen un patrón relativamente similar²³.

Entre 1990 y 2018, India y Brasil encabezan los mayores niveles promedio de la eficiencia de tiempo-variante al ubicarse en aproximadamente 98,9 %. Mientras que Rusia y Brasil son los países que presentan un mayor nivel de eficiencia persistente entre la muestra al ubicarse en 100 % y 75,5 %, respectivamente (gráfico 1). Lo anterior puede ser debido, parcialmente, al fortalecimiento de las regulaciones en el ámbito energético a través de las diferentes políticas implementadas en ambos países desde antes de 1990, dirigidas a la conservación de la energía y a las mejoras de la eficiencia energética²⁴.

Gráfico 1. Eficiencia transitoria promedio y eficiencia persistente de los Brics, 1990-2018



Fuente: elaboración propia.

3.2 Determinantes de la ineficiencia energética del Brics

Diferentes modelos de SFA han sido desarrollados para permitir la inclusión de factores exógenos los cuales difieren de los factores de producción (*inputs*) e influyen en el componente de ineficiencia técnica con el método de una sola etapa escalando

²³ La diferencia entre los resultados del FEM-TFEM y el modelo KLH, es que India es el segundo país con mayor nivel de eficiencia transitoria (96,5 %) en 2018.

²⁴ En la base de datos de las políticas publicadas por la IEA (2021) se muestran las medidas relevantes en el ámbito de la eficiencia energética para cada uno de los países miembros del grupo Brics.

la distribución de u_{it} y/o v_{it} en la ecuación (6). Bajo este enfoque se puede examinar las influencias exógenas en ambos componentes de la ineficiencia transitoria y persistente, obtenidos por el modelo KLH con un enfoque de FEM, considerando la heterocedasticidad condicional.

El modelo KLH es examinado usando el test de *ratio* de verosimilitud y el test de Wald, los cuales siguen una distribución de χ^2 . En orden a evitar supuestos arbitrarios, se estimó el test de Wald modificado siguiendo a Greene (2000), el cual permite comprobar la existencia de una estructura de error heterocedástica en un FEM. Los resultados se muestran en la tabla 7, el valor estadístico del $\chi^2=15,09$ (p -value=0,01) permite rechazar la hipótesis nula de homocedasticidad, indicando la presencia de heterocedasticidad en el modelo.

Tabla 7. Tests de robustez del modelo KLH

	LR	Valor crítico ($\alpha=1\%$)	Wald	p -value	Regla de decisión
Presencia de heterocedasticidad en la estructura del error H_0 : homocedasticidad	-	-	15,09	0,01	Rechazo H_0
Presencia de DCH H_0 : $\sigma_v = \text{homocedástico}$	31,83	24,72	12,67	0,00	Rechazo H_0

Fuente: elaboración propia.

Notas:

El valor estadístico de chi-cuadrado arrojado por el test de Wald modificado para comprobar la presencia de heterocedasticidad en la estructura del error está dado en la cuarta columna. La DCH es evaluada en el componente de ineficiencia transitoria.

Lo anterior permite abordar el problema de la heterocedasticidad condicional y estimar las influencias subyacentes en la ineficiencia energética utilizando el modelo de DCH propuesto por Hadri (1999). Como se explicó anteriormente, la DCH considera variables exógenas que son diferentes de los factores de producción pero que afectan tanto al componente de ineficiencia como al término idiosincrático de ruido blanco.

Bajo la hipótesis nula que especifica un modelo alternativo de heterocedasticidad de una sola condición (SCH), cuyas variables exógenas afectan solo al componente de ineficiencia, los resultados del LR estadístico de 31,83 excede al valor crítico de chi-cuadrado once grados de libertad de 24,72; esto apoyado por el Wald estadístico de 12,67 con un p -value de 0,00. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se indica que el conjunto de datos favorecen a la especificación de DCH para el componente

de ineficiencia transitoria obtenido del modelo de Kumbhakar et al. (2012) con un enfoque de FEM²⁵.

Tabla 8. Resultados de los determinantes de la ineficiencia energética (transitoria)

Variable dependiente:		Modelo KLH (2012)	Heterocedasticidad en v	Heterocedasticidad en u
Variable	Parámetro	$\ln(1/E)$	$\ln\sigma_v^2$	$\ln\sigma_u^2$
Constante	α_o	0,5212 (0,0553)		
$\ln(K/E)$	β_k	0,6955*** (0,0449)		
$\ln(L/E)$	β_l	-0,6331*** (0,0312)		
$\ln Y$	β_y	-1,4967*** (0,0227)		
$(\ln(K/E))^2/2$	β_{kk}	-0,4559*** (0,0898)		
$(\ln(L/E))^2/2$	β_{ll}	-1,4806*** (0,0808)		
$(\ln Y)^2/2$	β_{yy}	-0,4283*** (0,0504)		
$\ln(K/E)*\ln(L/E)$	β_{kl}	0,1379*** (0,0445)		
$\ln(K/E)*\ln Y$	β_{ky}	0,3259*** (0,0580)		
$\ln(L/E)*\ln Y$	β_{ly}	-0,3116*** (0,0451)		
Dummies anuales (omitidas)				
Parámetros en σ_v^2 y σ_u^2				
$\ln PE$	δ_{PE}	-	0,9263 (0,7597)	-2,2971* (1,335)
$\ln II$	δ_{II}	-	-6,6544 (1,8240)***	11,0427** (4,4159)
$\ln IED$	δ_{IED}	-	-0,7168 (0,5573)	2,4986** (0,9658)

²⁵ Es importante mencionar que el modelo fue estimado con la media condicional en los componentes de ineficiencia transitoria y persistente; sin embargo, no se logró convergencia. De igual forma, se estimó el modelo incluyendo las variables exógenas en la varianza del componente de ineficiencia persistente que específica la heterocedasticidad condicional pero los coeficientes no resultaron estadísticamente significativos. Por esta razón, el análisis de los determinantes de la ineficiencia energética del grupo Brics considera la especificación DCH en el término de ineficiencia energética transitoria.

Variable dependiente:		Modelo KLH (2012)	Heterocedasticidad en v	Heterocedasticidad en u
		$\ln(1/E)$	$\ln\sigma_v^2$	$\ln\sigma_u^2$
$\ln VAI$	δ_{VAI}	-	0,4388 (1,2712)	-6,9935*** (2,0916)
$\ln IED * \ln II$	δ_{IED*II}	-	-1,8913*** (0,4571)	1,1867 (0,8057)
$\ln IED * \ln VAI$	$\delta_{(IED*VAI)}$	-	-0,2596 (0,2451)	1,0852*** (0,4037)
$\ln POB$	δ_{POB}	-	0,3905 (0,5067)	1,5542** (0,7322)
$\ln AREA$	δ_{AREA}	-	-2,3319** (1,1153)	6,3109*** (1,8372)
TEMP	δ_{TEMP}	-	-2,8076*** (0,8314)	4,6511*** (1,6255)
t	δ_t	-	0,1130 (0,1907)	-0,0275 (0,2911)
t^2	δ_{t^2}	-	-0,0019 (0,0050)	0,0037 (0,0083)
constante	δ_0	-	-7,5103*** (1,9191)	-14,1866*** (2,9934)
Log likelihood		-		337,78
R^2		0,9920***		-
LR stat		-		31,83***
Wald test		17007,83***		12,67***

Fuente: elaboración propia.

Notas:

Los valores entre paréntesis representan la desviación estándar.

*Coeficiente significativo al 10 %

**Coeficiente significativo al 5%

***Coeficiente significativo al 1%

1) Las estimaciones fueron obtenidas con Stata 15.

2) Una estimación negativa (positiva) del parámetro muestra que la variable tiene un efecto positivo (negativo) sobre la eficiencia, mientras que la lectura sobre la ineficiencia es directa.

La mayoría de los coeficientes de las variables socio-económicas que influyen en la varianza del componente de ineficiencia energética transitoria resultaron estadísticamente significativos. El precio agregado de la energía y el valor agregado industrial tienen un efecto negativo en la ineficiencia transitoria a un nivel de 10 % de significancia (tabla 8). Esto quiere decir que, por ejemplo, un incremento en el precio de la energía provoca una disminución en la ineficiencia energética transitoria del Brics.

Entre las variables que influyen de forma positiva en la ineficiencia energética, se encuentran la intensidad de intercambio, las entradas de inversión extranjera directa (y su interacción con el VAI), la temperatura media anual, el tamaño de la población y el área territorial, a un nivel de 5 % de significancia en su mayoría. Esto implica que, por ejemplo, a mayor población la ineficiencia energética transitoria del Brics se incrementa; esto puede ser porque la infraestructura no se mantiene acorde con el tamaño de la población.

Con respecto a la tendencia de tiempo, la cual es utilizada como una *proxy* para capturar el progreso técnico y otros factores no-económicos, no se observa un efecto lineal, ni no-lineal, significativo.

Lo anterior permitiría diseñar políticas macroeconómicas orientadas hacia la mejora de la eficiencia energética, en línea con el desarrollo sostenible. De acuerdo con los resultados, los países del Brics podrían dirigir sus economías a aumentar las actividades industriales que podría atraer desarrollo tecnológico y contribuiría al ahorro de energía; además ayudaría en la construcción de infraestructuras que sean acordes con el tamaño de la población, y así evitaría una mayor utilización de instalaciones antiguas.

3.3 Contribución de la eficiencia energética en la reducción de las emisiones de CO₂

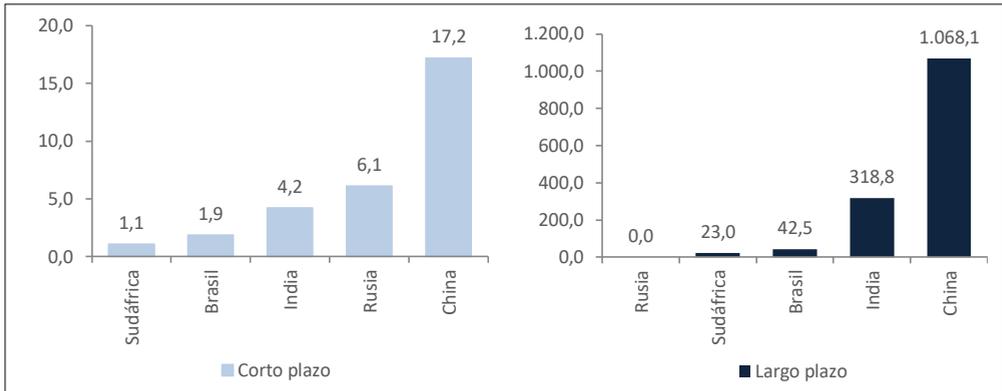
Siguiendo la metodología propuesta por Evans et al. (2013), los niveles de EF persistente y transitoria obtenidos del modelo KLH permiten evaluar la contribución de las mejoras de la eficiencia energética en la mitigación de las emisiones de CO₂ de los países miembros del Brics en el corto y largo plazo, lo que podría brindar un panorama claro de los beneficios de implementar políticas de eficiencia energética.

La tabla A2 de los anexos muestra los resultados de los cálculos del ahorro potencial de corto y largo plazo de energía y emisiones de CO₂, respectivamente, si los países fueran eficientes. Es importante señalar que las reducciones de las emisiones de CO₂ calculadas individualmente para cada país, no deben ser consideradas como los valores precisos dada la técnica estocástica usada en la estimación de los niveles de eficiencia; no obstante, proveen una buena aproximación de la magnitud potencial del cambio de un país en la eficiencia y en las emisiones de CO₂ durante el tiempo (Evans et al., 2013).

Como es de esperarse, los países con el menor nivel relativo de eficiencia energética parecen tener el mayor potencial de ahorro. En el gráfico 2, se observa que China, India y Brasil, de los cuales los dos primeros países pertenecen al top cinco de emisores de CO₂ en el mundo (IEA, 2016), son aquellos que poseen un mayor

potencial estimado a largo plazo para consumir menos energía si fueran eficientes energéticamente, cuyo ahorro en conjunto se ubica en 1.429,4 mtoe. En el corto plazo, China, Rusia e India son los que presentan un mayor ahorro potencial de energía promedio en cada uno de los sub-periodos, al registrar en conjunto un nivel de 27,5 mtoe durante 1990-2018.

Gráfico 2. Ahorro potencial de energía (mtoe) de los países del Brics: 1990-2018

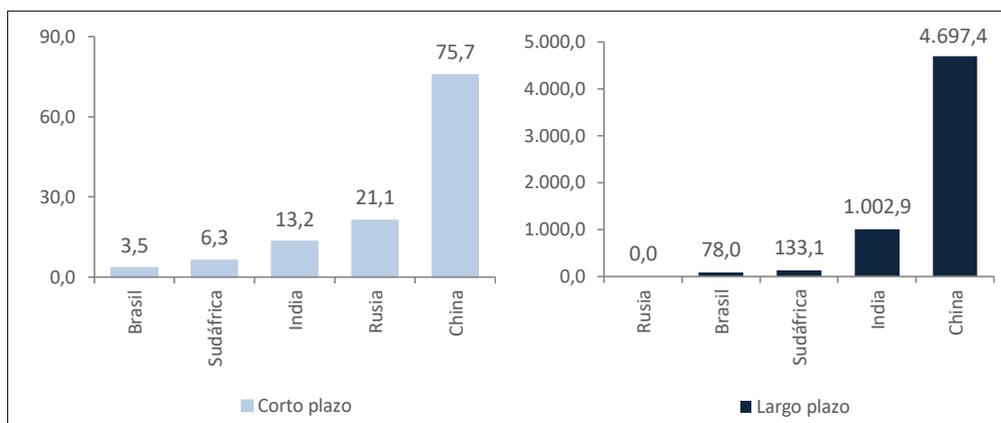


Fuente: elaboración propia.

Resultados similares en el ahorro potencial de las emisiones de CO₂ se muestran en el gráfico 3. En el largo plazo, China, India y Sudáfrica presentan un ahorro agregado de emisiones de 5.833,5 mt si fueran eficientes energéticamente; representando el mayor peso relativo de 80,5 % el ahorro potencial de China. Mientras que en el corto plazo, China, Rusia e India registran un ahorro de 110,0 mt.

De las observaciones anteriores, se evidencia que China es el país miembro del grupo Brics que registra un mayor consumo de energía, y, en consecuencia, emite mayores emisiones de CO₂ en promedio; además, tiene uno de los menores niveles relativos en promedio de eficiencia energética transitoria entre la muestra de países.

Gráfico 3. Ahorro potencial de emisiones de CO₂ (mt) de los países del Brics: 1990-2018



Fuente: elaboración propia.

Nota:

El ahorro potencial a corto plazo es calculado con base en los niveles de eficiencia transitoria, mientras que el ahorro potencial a largo plazo es basado en los niveles de eficiencia persistente, ambos obtenidos del modelo KLH ajustado al enfoque de FEM.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Entre la literatura revisada, la mayoría de los trabajos relacionados a la medición de la eficiencia energética se han aplicado principalmente a países del grupo OCDE; por lo tanto, este estudio aporta un análisis reciente de los niveles de eficiencia energética de una muestra de países emergentes, que constituyen un subgrupo de países en desarrollo caracterizados por una trayectoria creciente en el consumo final de energía y en las emisiones de CO₂ asociadas en el ámbito mundial.

De acuerdo con los resultados, el modelo de preferencia para estimar el nivel de eficiencia técnica orientada a la energía del Brics al corto y largo plazo, es el KLH con un enfoque de efectos fijos. Este permite la estimación de ambos tipos de eficiencia, así como también de la heterogeneidad no observada y del término de error idiosincrático; mientras que el FEM permite estimar solo el nivel de eficiencia energética persistente y el TFEM provee estimaciones de la eficiencia energética transitoria.

Los niveles promedios de la eficiencia transitoria obtenidos a través de KLH-T tienen una correlación débil negativa con la intensidad energética, demostrando que esta es una *proxy* débil de la medición de la EF del grupo Brics durante el periodo de estudio. Filippini y Hunt (2011), en sintonía con la IEA (2009), señalan que la

intensidad energética, siendo el indicador de eficiencia energética más utilizado en el análisis macroeconómico, no es un indicador preciso.

A partir de la estimación del modelo KLH, considerando la heterocedasticidad doble condicional, se encontró que un incremento del precio agregado de la energía y valor agregado industrial afectan negativamente a la ineficiencia transitoria, mientras que un incremento en la intensidad de intercambio, las entradas de inversión extranjera directa (y su interacción con el VAI), la temperatura media anual, el tamaño de la población y el área territorial aumenta la ineficiencia transitoria.

Los resultados sugieren ahorros potenciales significativos en el consumo de energía y en las emisiones de CO₂ asociadas, si los países miembros del Brics fueran eficientes. China e India presentan los mayores ahorros potenciales en el largo plazo, mientras que en el corto plazo China y Rusia tienen el mayor ahorro de emisiones de CO₂. Lo anterior indica que China es el país con mayor contribución de las mejoras de eficiencia energética en la mitigación de las emisiones de CO₂, siendo el país que registra uno de los menores promedios de EF persistente y transitoria entre la muestra de países.

En línea con el Acuerdo de París, el cual considera que países desarrollados y en desarrollo son igualmente responsables en diseñar e implementar estrategias nacionales en el ámbito energético en dirección a reducir el consumo de energía y las emisiones de CO₂ asociadas, estos resultados son importantes a considerar en una perspectiva de diseño de políticas.

Se debe reconocer que este estudio, como en la mayoría de los trabajos analíticos-econométricos, tiene sus propias limitaciones. En el análisis de los determinantes de la ineficiencia energética, los datos no favorecieron a estimar de manera satisfactoria los efectos del conjunto de variables socio-económicas en el componente de ineficiencia persistente. Por su parte, no es posible capturar los efectos heterogéneos de estas variables en la ineficiencia transitoria de forma individual, debido a que el modelo es un panel de datos, es decir, el hecho que un cambio en el precio agregado de la energía afecta negativamente a la ineficiencia transitoria del grupo Brics no implica necesariamente un cambio en el mismo sentido en el nivel de ineficiencia transitoria para cada país de la muestra.

Siguiendo la metodología propuesta por Kumbhakar et al. (2012), dirigida a la estimación de una Función de Distancia Insumo, provee mediciones de la eficiencia técnica orientada al insumo (energía) al corto y largo plazo que podrían servir como un instrumento auxiliar para los *policy makers*, en orden a diseñar y ejecutar políticas

energéticas tomando en cuenta las características y necesidades específicas de cada país, con el fin de evitar cualquier posible conclusión errónea.

REFERENCIAS

- Adebisi, I. (2017). *Essays on Energy Efficiency and Fuel Subsidy Reforms* [tesis de doctorado, Universidad de Manchester]. https://www.research.manchester.ac.uk/portal/files/84031478/FULL_TEXT.PDF.
- Adetutu, M., Glass, A. y Weyman-Jones, T. (2015). Economy-wide Estimates of Rebound Effects: Evidence from Panel Data. *The Energy Journal*, 37(3), 251-269. <https://ideas.repec.org/p/prapa/mprapa/65409.html>.
- Adom, P. (2015). Asymmetric Impacts of the Determinants of Energy Intensity in Nigeria. *Energy Economics*, 49, 570-580. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.03.027>.
- Aigner, D., Lovell, C. A. K. y Schmidt, P. (1977). Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production Function Models. *Journal of Econometrics*, 6(1), 21-37. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(77\)90052-5](https://doi.org/10.1016/0304-4076(77)90052-5).
- Battese, G. y Coelli, T. (1988). Prediction of Firm-Level Technical Efficiencies with a Generalized Frontier Production Function Models. *Journal of Econometrics*, 6(1), 21-37. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/030440768890053X>.
- Caudill, S. B., Ford, J. M. y Gropper, D. M. (1995). Frontier Estimation and Firm Specific Inefficiency Measures in the Presence of Heteroscedasticity. *Journal of Business & Economic Statistics*, 13(1), 105-111. <https://ideas.repec.org/a/bes/jnlbes/v13y1995i1p105-11.html>.
- Charnes, A., Cooper, W.W. y Rhodes, E. (1978). Measuring the Efficiency of Decision Making Units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429-444. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8).
- Chitnis, M., y Hunt, L. C. (2012). *What drives the change in UK household energy expenditure and associated CO2 emissions? Implication and forecast to 2020*. *Applied Energy* 94, 202-214. <https://ideas.repec.org/p/sur/seedps/134.html>.
- Cole, M.A. (2006). Does Trade Liberalization Increase National Energy Use? *Economics Letters*, 92(1), 108-112. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2006.01.018>.
- Colombi, R., Kumbhakar, S. C., Martini, G. y Vittadini, G. (2014). Closed-Skew Normality in Stochastic Frontiers with Individual Effects and Long/Short-Run Efficiency. *Journal of Productivity Analysis*, 42(2), 123-136. <https://link.springer.com/article/10.1007/s1123-014-0386-y>.
- Cornillie, J. y Fankhauser, S. (2004). *The Energy Intensity of Transition Countries*. *Energy Economics*, 26(3), 283-295. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2004.04.015>.
- Eskeland, G. y Harrison, A. (2003). Moving to Greener Pastures? Multinacional and the Pollution Haven Hypothesis. *Journal of Development Economics*, 70(1), 1-23. [https://doi.org/10.1016/S0304-3878\(02\)00084-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3878(02)00084-6).
- Evans, J., Filippini, M. y Hunt, L. C. (2013). *The Contribution of Energy Efficiency Towards Meeting Co₂ Targets*. En R. Fouquet (ed.), *Handbook on Energy and Climate Change* (pp. 175-223). Edward Elgar

- Publishing. <https://www.elgaronline.com/view/edcoll/9780857933683/9780857933683.00016.xml>.
- Farrell, M. J. (1957). The Measurement of Productive Efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society*, 120(3), 253-290. <https://www.jstor.org/stable/2343100>.
- Fisher-Vanden, K., Jefferson, G. H., Liu, H. y Tao, Q. (2004). What is Driving China's Decline in Energy Intensity? *Resource and Energy Economics*, 26(1), 77-97. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2003.07.002>.
- Filippini, M. y Greene, W. (2016). *Persistent and Transient Productive Inefficiency: A Maximum Simulated Likelihood Approach*. *Journal of Productivity Analysis*, 45(2), 187-196. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11123-015-0446-y>.
- Filippini, M. y Hunt, L. C. (2011). Energy demand and Energy Efficiency in the OECD Countries: A Stochastic Demand Frontier Approach. *Energy Journal*, 32(2), 59-80. <http://www.iaee.org/en/publications/ejarticle.aspx?id=2417>.
- Filippini, M. y Hunt, L. C. (2012). US residential energy demand and energy efficiency: A stochastic demand frontier approach. *Energy Economics*, 34(5), 1484-1491. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.06.013>
- Filippini, M. y Hunt, L. C. (2015). Measurement of Energy Efficiency Based on Economic Foundations. *Energy Economics*, 52(1) S5-S16. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.08.023>.
- Greene, W. H. (2000). *Econometric Analysis*. Prentices Hall. <https://spu.fem.uniag.sk/cvicenia/ksov/obtulovic/Mana%C5%BE.%20%C5%A1tatistika%20a%20ekonometria/EconometricsGREENE.pdf>.
- Greene, W. (2005). Fixed and Random Effects in Stochastic Frontier Models. *Journal of Productivity Analysis*, 23(1), 7-32. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11123-004-8545-1#:~:text=A%20fixed%20effects%20model%20is,of%20the%20random%20parameters%20model>.
- Grossman, G. y Helpman, E. (1991). *Innovation and Growth in the Global Economy*. MIT Press. <https://mitpress.mit.edu/books/innovation-and-growth-global-economy>.
- Hadri, K. (1999). Estimation of a Doubly Heteroscedastic Stochastic Frontier Cost Function. *Journal of Business & Economic Statistics*, 17(3), 359-363. https://econpapers.repec.org/article/besjnlbes/v_3a17_3ay_3a1999_3ai_3a3_3ap_3a359-63.htm.
- Hang, L. y Tu, M. (2007). The impacts of Energy Prices on Energy Intensity: Evidence from China. *Energy Policy*, 35(5), 2978-2988. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.10.022>.
- Holmes, T.J. y Schmidt, J.A. (2001). Competition at Work: Railroads vs. Monopoly in the U.S. Shipping Industry. *Quarterly Review*, 25, 3-9. <https://ideas.repec.org/a/fip/fedmqr/y2001isprp3-29nv.25no.2.html>.
- Hubler, M. (2009). Energy Saving Technology Diffusion via FDI and Trade: a CGE of China. *Kiel Working Paper*, (1479). <https://ideas.repec.org/p/zbw/ifwkwp/1479.html>.
- Huntington, H. G. (1994). Been top down so long it looks Like Bottom up to me. *Energy Policy*, 22(10), 833-839. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(94\)90142-2](https://doi.org/10.1016/0301-4215(94)90142-2).
- International Energy Agency (IEA). (2009). *Progress with Implementing Energy Efficiency Policies in the g8*. <https://www.iea.org/reports/progress-with-implementing-energy-efficiency-policies-in-the-g8>.

- International Energy Agency (IEA). (2015). *Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency*. <https://www.iea.org/reports/capturing-the-multiple-benefits-of-energy-efficiency>.
- International Energy Agency (IEA). (2016). *Energy efficiency Market Report 2016*. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2016>.
- International Energy Agency (IEA). (2018). *WEO 2018- Energy, water and Sustainable Development Goals*. <https://www.iea.org/reports/energy-water-and-the-sustainable-development-goals>.
- International Energy Agency (IEA). (2019). *IEA Headline Global Energy Data (2019 edition)*. https://vipo.iea.org/media/statistics/IEA_HeadlineEnergyData.xlsx#.
- International Energy Agency (IEA). (2020). *World Energy Balances Highlights (2020 edition)*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances-highlights>.
- International Energy Agency (IEA). (2021). *Policies Database, Efficiency Energy*. <https://www.iea.org/policies>.
- Kipouros, P. (2017). *Energy Efficiency and the Rebound Effect in Developing Countries* [tesis de doctorado, Universidad de Surrey]. <https://seec.surrey.ac.uk/wp-content/uploads/2018/10/2018ParaskvasKipourosThesis.pdf>.
- Kopp, R. J. (1981). The Measurement Of Productive Efficiency: A reconsideration. *The Quarterly Journal of Economics*, 96(3), 477–503. <https://doi.org/10.2307/1882683>.
- Kumbhakar, S. C. y Hjalmarrsson, L. (1995). Labour-Use Efficiency in Swedish Social Insurance Offices. *Journal of Applied Econometrics*, 10(1), 33–47. <https://ideas.repec.org/a/jae/japmet/v10y1995i1p33-47.html>.
- Kumbhakar, S. C., Lien, G. y Hardaker, J. B. (2012). Technical Efficiency Incompeting Panel Data Models: A Study of Norwegian Grain Farming. *Journal of Productivity Analysis*, 41(2), 321-37. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11123-012-0303-1>.
- Kumbhakar, S. y Lovell, C. (2000). *Stochastic Frontier Analysis*. Cambridge University Press. <http://catdir.loc.gov/catdir/samples/cam032/99031297.pdf>.
- Kumbhakar, S. C., Wang, H. y Horncastle, A. (2015). *A Practitioner's Guide to Stochastic Frontier Analysis Using Stata*. Cambridge University Press. https://assets.cambridge.org/9781107029514/frontmatter/9781107029514_frontmatter.pdf.
- Meeusen, W. y van den Broeck, J. (1977). Efficiency Estimation from Cobb-Douglas Production Functions with Composed Error. *International economic review*, 18(2), 435-444. https://econpapers.repec.org/article/ieriecrev/v_3a18_3ay_3a1977_3ai_3a2_3ap_3a435-44.htm.
- Metcalf, G. E (2008). An Empirical Analysis of Energy Intensity and its Determinants at the State Level. *The Energy Journal*, 29(3), 1-26. https://globalchange.mit.edu/sites/default/files/MITJSPGCG_Reprint08-8.pdf.
- Mielnik, O. y Goldemberg, J. (2002). *Foreign direct investment and decoupling between energy and gross domestic product in developing countries*. *Energy Policy* 30, 87-89. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(01\)00080-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00080-5).

- Milner, C. y Westaway, T. (1994). The Effect of Size on Sources of Medium-term Growth in Developing Countries. *Scottish Journal of Political Economy*, 41(2): 128-141. <https://ideas.repec.org/a/bla/scotjpv41y1994i2p128-41.html>.
- Moshiri, S. y Duah, N. (2016). Changes in Energy Intensity in Canada. *The Energy Journal*, 37(4), 315-342. <https://ideas.repec.org/a/aen/journal/ej37-4-moshiri.html>.
- Myers, J. G. y Nakamura, L. (1978). *Saving Energy in Manufacturing: The Post-embargo Record*. Universidad de California.
- Lin, B. y Moubarak, M. (2014). Estimation of energy saving potential in China's paper industry. *Energy, Elsevier*, 65(C), 182-189. <https://ideas.repec.org/a/eee/energy/v65y2014icp182-189.html>.
- Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). (2016). *Planeta Eficiente, Planeta Consciente: Eficiencia Energética y Desarrollo Sostenible*. <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0356.pdf>.
- Schmidt, P. y Lin, T.-F. (1984). Simple Tests of Alternative Specifications in Stochastic Frontier Models. *Journal of Econometrics*, 24(3), 349-61. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(84\)90058-7](https://doi.org/10.1016/0304-4076(84)90058-7).
- Schmidt, P. y Sickles, R. C. (1984). Production Frontiers and Panel Data. *Journal of Business and Economic Statistics*, 2(4), 367-374. <https://www.jstor.org/stable/1391278>.
- Shen, L. (2007). The Changes of China's Foreign Trade Structure are Harmful to Energy-Saving and Consumption Reducing. *Manage World*, (10), 43-50.
- Weyman-Jones, T.G. y Milner, C. (2003). Relative National Efficiency and Country Size: Evidence for Developing Countries. *Review of Development Economics*, 7(1), 1-14. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1467-9361.00171>.
- Zhang, S. (2016). *Energy Efficiency and Business Performance: Evidence of the Swedish Industry* [tesis de doctorado, Universidad de Ciencias Agrícolas de Suecia].
- Zhou, P., Ang, B. y Zhou, D. (2012). Measuring Economy-Wide Energy Efficiency Performance: A Parametric Frontier Approach. *Applied Energy*, 90(1), 196-200. <https://ideas.repec.org/a/eee/appene/v90y2012i1p196-200.html>.

ANEXOS

Tabla A1. Estadística descriptiva

<i>Variable</i>	<i>Etiqueta</i>	<i>Media</i>	<i>Desv. Est.</i>	<i>Máx.</i>	<i>Mín.</i>
<i>Inputs</i>					
Consumo de energía final total (mtoe)	<i>E</i>	462,0	473,6	2.057,7	47,7
Formación bruta de capital fijo (millones de USD, 100=2010)	<i>K</i>	565.152,7	971.523,0	4.997.822,6	27.446,6
Empleados (millones)	<i>L</i>	269,9	283,8	768,7	11,4
<i>Output</i>					
PIB (millones de USD, 100=2010)	<i>Y</i>	1.809.119,6	1.971.137,1	10.872.977,8	216.015,8
<i>Variables exógenas</i>					
Precio de la energía ^{1/} (índice 2010=100)	<i>PE</i>	82,2	33,2	130,6	35,0
Intensidad de intercambio (% del PIB)	<i>II</i>	41,7	15,9	110,6	15,2
Inversión extranjera directa (entradas, millones de USD, 2010=100)	<i>IED</i>	40.052,7	58.331,9	272.318,6	-126,4
Industria, valor agregado (millones de USD, 2010=100)	<i>VAI</i>	654.645,1	940.627,7	4.941.807,7	75.505,5
Población (millones)	<i>POB</i>	556,5	539,7	1.392,7	36,8
Tamaño de área (millones de km ²)	<i>AREA</i>	7,7	5,4	16,4	1,2
Temperatura media anual (celsius)	<i>TEMP</i>	14,1	11,7	26,2	-6,5

Fuente: elaboración propia.

Tabla A2. Cálculos del ahorro potencial de energía y emisiones de CO₂

País	Consumo de energía promedio (mtoe)	Emisiones de CO ₂ promedio (mt)	Coefficiente CO ₂ (t/toe)	Nivel de EF	Consumo de energía óptimo estimado (ktoe)	Emisiones CO ₂ óptimo estimado (mt)	Ahorro de energía potencial estimado (mtoe)	Ahorro de CO ₂ potencial estimado (mt)
	\bar{E}_i	\bar{CO}_{2i}	λ_i	\bar{EF}_i	\bar{E}_i^*	\bar{CO}_{2i}^*	E_{ahorro}	$CO_{2,\text{ahorro}}$
Ahorros potenciales de largo plazo (eficiencia persistente)								
Brasil	173,4	318,2	1,8351	0,7549	130,9	240,2	42,5	78,0
Rusia	457,3	1.585,0	3,4660	1,0000	457,3	1.585,0	0,0	0,0
India	388,2	1.221,2	3,1456	0,1787	69,4	218,2	318,8	1.002,9
China	1.231,6	5.416,9	4,3981	0,1328	163,6	719,5	1.068,1	4.697,4
Sudáfrica	59,7	345,3	5,7890	0,6144	36,7	212,2	23,0	133,1
Ahorros potenciales de corto plazo (eficiencia transitoria)								
Subperiodo 1990-1999								
Brasil	128,9	227,4	1,7641	0,9966	128,5	226,6	0,4	0,8
Rusia	491,7	1.699,0	3,4556	0,9786	481,1	1.662,6	10,5	36,4
India	273,8	684,2	2,4986	0,9904	271,2	677,6	2,6	6,6
China	738,2	2.632,5	3,5663	0,9846	726,8	2.591,9	11,4	40,6
Sudáfrica	52,4	258,9	4,9446	0,9734	51,0	252,0	1,4	6,9
Subperiodo 2000-2009								
Brasil	171,8	312,8	1,8211	0,9907	170,2	309,9	1,6	2,9
Rusia	419,7	1.494,5	3,5607	0,9866	414,1	1.474,4	5,6	20,1
India	363,6	1.103,7	3,0356	0,9902	360,0	1.092,9	3,6	10,8
China	1.134,7	5.032,0	4,4347	0,9768	1.108,4	4.915,3	26,3	116,8
Sudáfrica	60,5	360,6	5,9642	0,9852	59,6	355,2	0,9	5,3

Cont. Tabla A2

País	Consumo de energía promedio (mtoe)	Emisiones de CO ₂ promedio (mt)	Coefficiente CO ₂ (t/toe)	Nivel de EF	Consumo de energía óptimo estimado (ktoe)	Emisiones CO ₂ óptimo estimado (mt)	Ahorro de energía potencial estimado (mtoe)	Ahorro de CO ₂ potencial estimado (mt)
Subperiodo 2010-2018								
Brasil	224,6	425,0	1,8923	0,9807	220,3	416,8	4,3	8,2
Rusia	460,9	1.559,0	3,3824	0,9940	458,1	1.549,6	2,8	9,4
India	542,7	1.948,3	3,5902	0,9870	535,6	1.922,9	7,1	25,4
China	1.887,7	8.938,4	4,7351	0,9976	1.883,1	8.916,8	4,6	21,6
Sudáfrica	66,9	424,5	6,3474	0,9852	65,9	418,2	1,0	6,3
1990-2018								
Brasil	173,4	318,2	1,8351	0,9891	171,5	314,7	1,9	3,5
Rusia	457,3	1.585,0	3,4660	0,9867	451,2	1.563,9	6,1	21,1
India	388,2	1.221,2	3,1456	0,9892	384,0	1.207,9	4,2	13,2
China	1.231,6	5.416,9	4,3981	0,9860	1.214,4	5.341,3	17,2	75,7
Sudáfrica	59,7	345,3	5,7890	0,9817	58,6	339,0	1,1	6,3

Fuente: elaboración propia.

Nota:

El ahorro de energía a largo plazo para Rusia resultó en cero debido a que su nivel de eficiencia persistente se estimó al 100 % de acuerdo con los resultados obtenidos en el apartado 3.1