

EL EFECTO REBOTE DEL CONSUMO DE GAS NATURAL: EL CASO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN LA REFORMA ENERGÉTICA¹

*David Bonilla**

Adrián Livas García

Adriana Caballero Castrillo

Instituto de Investigaciones Económicas de la Universidad Nacional
Autónoma de México (UNAM, México)

* Autor para correspondencia: bonvar@yahoo.com

Recibido el 11 de enero de 2022; aceptado el 12 de mayo de 2022.

RESUMEN

Nuestros objetivos son: 1) calcular el impacto del efecto rebote (ER) del consumo de gas natural (GN) de tres tipos de modalidades de generación: central eléctrica pública (CEP), productor independiente de energía (PIE) y autogeneradores (Aut), lo anterior en dos tecnologías de ciclo combinado (CC) y turbogas (TG) y 2) explicar la demanda de GN en la economía mexicana en el periodo de 2000-2020. El ER de ambas PIES (las plantas pequeñas) y de las plantas de TG es menor que el valor del ER de las CEPs (las plantas grandes). Mientras que el valor de la elasticidad respecto de la eficiencia de transformación muestra un promedio menor en las plantas grandes que en las pequeñas. De nuestro análisis se deriva una dualidad del ER: 1) reducir la efectividad de nuevas tecnologías: CEP y PIE CC, dado que la eficiencia (de transformación) no siempre se traduce

¹ Proyecto financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), no. 58514 "El efecto rebote, extensiones y límites: la economía mexicana y efectos no esperados para la política energética".

<http://dx.doi.org/10.22201/fe.01851667p.2022.321.81564>

© 2022 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Economía. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

en ahorros de gas natural y 2) las PIES reaccionan muy rápido a un alza del precio de gas y reducen su consumo, mientras que las CEPS operadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) reaccionan lentamente al cambio en precio de gas natural.

Palabras clave: política energética, eficiencia energética, gas natural.

Clasificación JEL: Q3, Q35, Q38, Q40.

THE REBOUND EFFECT OF NATURAL GAS CONSUMPTION:
THE CASE OF ELECTRICITY GENERATION DURING THE ENERGY REFORM

ABSTRACT

Our aims are: 1) to calculate the impact of the Rebound Effect (RE) of the consumption of Natural Gas (NG) of three types of generation plants: Public Power Plant (PPP), Independent Energy Producer (IEP), and Self-generators (Aut), the foregoing in two technologies combined cycle (CC) and turbogas (TG) and 2) to explain the demand for NG in the Mexican economy in the period 2000-2020. The RE of both IEPS (small plants), and TG plants is less than the RE value of PPPs (large plants). While the elasticity value with respect to efficiency is lower in large plants than in small ones. Our analysis confirms RE has two impacts: 1) it reduces the effectiveness of new technologies, *i.e.* PPP and IEP CC since (transformation) efficiency does not always translate into savings in NG; 2) small plants (IEPS) react very quickly to a rise in the price of gas and reduce their consumption, while PPPs operated by Comisión Federal de Electricidad (CFE) react slowly to changes in the price of NG.

Key words: Energy policy, energy efficiency, natural gas.

JEL Classification: Q3, Q35, Q38, Q40.

1. INTRODUCCIÓN

Hay tres tipos de efecto rebote: el directo, cuando una mejora en la eficiencia energética, para un servicio energético en particular reduce el costo de ese servicio con la consecuencia de aumentar la intensidad de uso de ese servicio energético, de tal modo que las expectativas de reducción de uso de energía se compensan de manera parcial o total; el indirecto, que sucede cuando el decremento del costo

de un servicio energético lidera la demanda de otros bienes y servicios que también requieren provisiones de energía y sobre toda la economía (*economy-wide*); el tercero es la suma de los efectos directos e indirectos.

Este artículo tiene dos objetivos: el primero, calcular el impacto del efecto rebote (ER) del consumo de gas natural (GN) de tres tipos de modalidades de generación: central eléctrica pública (CEP), productor independiente de energía (PIE) y autogeneradores (Aut), lo anterior en dos tecnologías de ciclo combinado (CC) y turbogas (TG); el segundo objetivo es explicar la demanda de GN en la economía mexicana en el periodo 2000-2020. De manera normal se piensa que al aumentar la generación de electricidad con base en GN, el país puede disminuir el consumo de otros combustibles fósiles (combustóleo y diésel) y descarbonizar (menos CO₂/Kwh consumido) el sistema eléctrico; sin embargo, el ER puede demostrar lo contrario.

México enfrenta un creciente déficit energético ya que importa un gran volumen de GN, lo cual afecta su balanza de pagos. México rebasó a Canadá y Japón en importaciones de GN procedentes de Estados Unidos (EU) en 2019 (EIA, 2021). La demanda de GN se ha incrementado en 2002-2017, 7.2% en promedio anual (Sener, 2019), por arriba de dos indicadores: la producción industrial (PI) (crecimiento de 5% anual, según el Banco Mundial, 2019) y el producto interno bruto (PIB) per cápita de México (crecimiento de 0.8 % anual, de acuerdo con el Banco Mundial, 2019) en el mismo periodo.²

Una ventaja de las plantas eléctricas de CC es su costo. El costo nivelado de capital de plantas de GN en CC indica que son de las más baratas en el portafolio de tecnologías de generación, pero las energías renovables están reduciendo sus costos nivelados a niveles similares a los de las plantas de CC (Institute of Energy Research, 2019). Estas comparaciones entre tecnologías son difíciles de hacer porque no toman en cuenta los costos de intermitencia de energía renovables, lo que le resta competitividad, a diferencia de plantas de CC (Institute of Energy Research, 2019).

² En 2019, México importó casi 34 000 millones de dólares estadounidenses (USD) de energía fósil de EU, anualmente; de este total, el GN registró 4 000 millones de USD (EIA, 2021). El resto era petróleo refinado: gasolina, diésel y turbosina, Coke, etcétera. El GN también se importó de Nigeria e Indonesia: 1 400 millones de USD (OEC, 2021).

La demanda adicional de GN de PIES de los últimos años se explica en parte por el ER.³ Es común calcular el ER usando datos empíricos con base en elasticidades estimadas de precio o de elasticidades de demanda (Gillingham, Rapson y Wagner, 2016). El ER se define como un fenómeno que resulta de la mayor eficiencia energética, la cual podría originar un ahorro energético menor de lo esperado, simplemente al multiplicar el cambio de eficiencia energética por el uso de energético antes del cambio en tal eficiencia.

En este artículo medimos: 1) el ER del mercado de GN en la generación de electricidad, 2) las causas del crecimiento de demanda de GN aunado a la existencia del ER y 3) los efectos de varias reformas energéticas (1992-2018) en el mercado de GN y en el consumo de productores de electricidad de México. Las tecnologías de generación de electricidad de CC desempeñan un importante papel desde las reformas de 1992, lo que permitió que productores privados (las PIES) se beneficiaran del GN (Ramírez Camperos, Rodríguez Padilla y Guido Aldana, 2013). Para examinar el mercado eléctrico se utiliza el modelo de ER.

El Ejecutivo federal pretende detener el proceso de liberalización y desregulación del mercado eléctrico con la nueva Ley de la Industria Eléctrica (LIE) de 2021 con la intención de modificar la reforma de 2013 que a la vez se justificaba (durante el gobierno de Peña Nieto) con el argumento de que “primero, que el monopolio público no daba buenos resultados especialmente en materia de tarifas y, segundo, la apertura traería mayores espacios de crecimiento económico y bienestar social” (Rodríguez Padilla, 2016, p. 37). El debate, sin embargo, continúa fluyendo y todavía la literatura académica no ha recogido todos los cambios jurídico-económicos respecto a la conformación del mercado eléctrico dentro del marco del estado y el mercado.

Las importaciones de GN de México fueron de 1.68 millones de pies cúbicos o (2.1 millones de petajoules) en 2018 (EIA, 2021). Este GN

³ Durante el encierro por la pandemia por COVID-19, el consumo de gas natural (medido en ventas al mayoreo) disminuyó ya que este consumo constituye una función de la caída de producción industrial (PI) en 2020 y no sólo del ER. Si bien la producción industrial del sector manufacturero está recuperándose mensualmente entre 2020-2021, ésta disminuye mucho afectando: 1) al consumo (ventas) de electricidad y 2) al consumo de GN. (CRE, 2021; Banco de México, 2021).

provino de EU por gasoductos a un precio de 2.58 USD por 1000 pies cúbicos (EIA, 2021). Las exportaciones de EU a México registraron 4 000 millones de USD en 2019 o un incremento mayor de 481% desde 2009 (EIA, 2021). Al mismo tiempo, el país está obligado a reducir las emisiones de CO₂, ya que México está comprometido como firmante del Acuerdo de París en 2015 (CFE, 2020) y el GN puede ser una solución a mediano plazo. Es posible asumir que al aumentar la generación de electricidad con base en GN, el país puede disminuir el consumo de energía fósil.

El ER permite explicar tres aspectos de consumo energético. Primero, este indicador cuantitativo refleja si el consumo del GN se incrementa o se retrae en la generación eléctrica: la estimación es para México, el periodo de análisis es 2002-2018. Segundo, el ER se basa en dos identidades de Sorrell (2007), en la elasticidad de demanda-consumo y en la elasticidad de precios-eficiencia. Tercero, el método ER permite utilizar las elasticidades dinámicas para entender mejor el cambio a través del tiempo de consumo de GN.

Nuestra hipótesis se basa en que el ER dificulta y disminuye el ahorro potencial del energético fósil (el GN) en el sector eléctrico mexicano. La segunda hipótesis es que el nuevo marco regulador (desde finales de la década de 1990 hasta 2018) aumenta la magnitud del ER de manera distinta en plantas de electricidad pequeñas y grandes. La desregulación en el nuevo marco regulador afecta los volúmenes de importación y consumo de GN.

El ER es relevante ya que el consumo de GN de las plantas eléctricas se ha incrementado 7.2% anualmente (2002-2017) a pesar de que la capacidad efectiva de energía eléctrica ha aumentado 6% y la generación de electricidad aumentó 6.7% en el mismo periodo. Mientras la eficiencia térmica de estas ha mejorado hasta 2% por año y se han añadido tecnologías más eficientes como las plantas de ciclo combinado (Sener, 2019). ¿Cómo explicar que el consumo de GN rebasa al cambio positivo en la eficiencia térmica y la eficiencia de transformación?

Las evaluaciones cuantitativas de eficiencia basadas en los estudios de ingeniería en el sector electricidad consideran que la demanda de GN debe reducirse en la misma proporción que el cambio en la eficiencia térmica. Es decir, se supone que la relación es de 1 a 1. Existe evidencia empírica del ER en algunos países, pero para la economía mexicana existen pocos estudios. Las implicaciones del ER no se han analizado

ampliamente en el contexto de las políticas públicas de: *a*) eficiencia energética y *b*) políticas de cambio climático. Es necesario su análisis dentro de las prospectivas de reducción de gases de efecto invernadero (GEI) para el 2050.

2. LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD EN MÉXICO

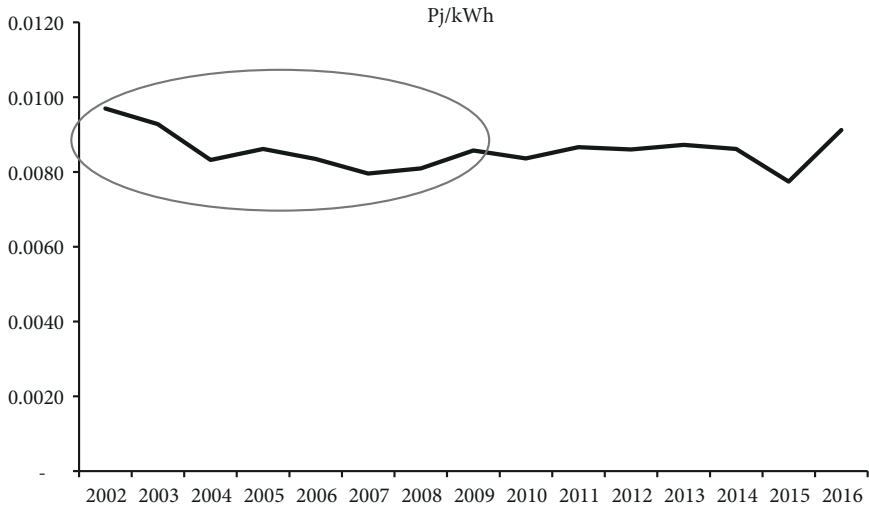
La generación de energía eléctrica en México se basa principalmente en combustibles fósiles: carbón (12%), combustóleo y diésel (12%), en fuente de energía convencional y en tecnología de CC con base en GN (50%); mientras que la participación en la generación de otros energéticos es pequeña: turbogas (2.3%), en combustión interna (0.72%) y en lecho fluidizado (1.3%), lo cual suma 78.9%. El resto se genera con energías limpias (21.1%) [Cenace, 2017]. Las energías limpias conforman 16 % de la generación nacional de electricidad; de esto, las plantas hidroeléctricas (la mayoría es estatal de CFE) aportan 12 %; eólica, 0.77%; solar, > 0.01% (Sener, 2019). Las energías renovables (sin hidroelectricidad) constituyen 7% de la generación eléctrica en México. En resumen, el GN es el principal insumo para generar electricidad en México.

Por lo mencionado antes es importante revisar cómo la eficiencia energética que resulta de nuevas políticas energéticas actuales y anteriores afecta el consumo de GN. La eficiencia de transformación del GN para la generación de electricidad efectiva se basa en el cambio en el consumo medido en unidades de petajoules por kilowatt/hora producidas (PJ/kWh) [véase la gráfica 1]. En los últimos años el nivel de eficiencia ha empeorado (es necesaria más energía primaria para producir 1 kWh; véase la gráfica 1) debido a que las CEPS son menos eficientes que las PIES. Una forma indirecta para observar la evolución del ER es la razón PJ/kWh.

Una gran parte de la inversión en infraestructura eléctrica es en plantas de ciclo combinado que utilizan principalmente GN, lo cual ha permitido satisfacer la demanda de electricidad con capacidad instalada; esta última ha crecido 6% cada año en 2002-2016, superando el crecimiento del PIB de México.

Por lo tanto, las consecuencias de adopción del GN y del CC en el sector eléctrico mexicano son cuatro: 1) altas importaciones de GN, 2) aumento de su consumo, 3) crecientes cuellos de botella en el abaste-

Gráfica 1. Petajoule (gas natural) por kWh-hora: 2002-2016. CEP y PIE



Fuente: Sener (2019).

cimiento de GN y 4) debilitamiento de la seguridad energética del país. Por otro lado, México requiere detener los efectos negativos asociados con el uso de la energía fósil.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En el campo de la economía energética, el ER se ha estudiado de manera empírica (Sorrell, 2007; Sorrell, Gatersleben y Druckman, 2018). La base teórica del ER de trabajos importantes recientes proviene de la economía neoclásica y los instrumentos son efectos de las elasticidades de precio, ingreso y de sustitución (Wallenborn, 2018; Van der Bergh, 2011). Las aplicaciones son diversas; por ejemplo, los estudios de los servicios energéticos en el transporte, la iluminación y la refrigeración, por medio de estudios econométricos de datos cruzados o datos de series de tiempo para las economías de EU y Europa (Borenstein, 2013; Schipper y Grubb, 2000).

La base empírica está dividida en tres criterios del ER: 1) el microeconómico (como el nuestro); 2) el macroeconómico, que se subdivide entre modelos macroeconómicos y modelos de equilibrio general

computable, que utiliza análisis de datos sobre: crecimiento económico, oferta de energía primaria, factores de producción, inventarios de capital y datos de mercado laboral (Jin y Kim, 2019); así como modelos macroeconómicos (Barker, Dagoumas y Rubin, 2009) o aquellos que utilizan el modelo de equilibrio general (Broberg, Berg y Samakovlis, 2015; Turner y Hanley, 2011), y 3) modelos de insumo producto (Li, Zhang y Liu, 2016). Existen dos desventajas de estos últimos: 1) asumen elasticidades fijas en el tiempo y las elasticidades de sustitución son estáticas y 2) no utilizan evidencia histórica de cambios en la eficiencia para estimar el consumo de energía.

Hay tres tipos de efecto rebote: el directo, cuando una mejoría en la eficiencia energética, para un servicio energético en particular, reduce el costo de ese servicio con la consecuencia de aumentar la intensidad de uso de ese servicio energético, de tal modo que las expectativas de reducción de uso de energía se compensan de manera parcial o total; el indirecto, que sucede cuando el decremento del costo de un servicio energético lidera la demanda de otros bienes y servicios que también requieren provisiones de energía y sobre toda la economía (*economy-wide*); el tercero es la suma de los efectos directos e indirectos.

La mayor parte de la bibliografía de los ER aborda temas del sector consumidor y casi no al de los productores. Mucha investigación se sustenta en estimar el ER directo (Sorrell, Gatersleben y Druckman, 2018). El concepto de ER se refiere a que las expectativas del ahorro de energía como resultado de las mejoras en la eficiencia energética son parciales o nulas, dado que tales ahorros son compensados por incrementos en la demanda del servicio energético (Greening, Greene y Difiglio, 2000; Dimitropoulos y Sorrell, 2006).

Existe poca investigación del ER causado por productores de energía. En algunos estudios (Jevons, 1865) se analiza la sinergia entre productores: el carbón, el motor de vapor, el acero y el movimiento de trenes que causan el efecto de *backfire*. Desde el punto de vista de la economía industrial del siglo XIX, Jevons observó que el sistema de infraestructura causa el ER. Lo mismo puede decirse de la infraestructura del GN en México.

A través de una revisión bibliográfica, detectamos que el estudio del ER ha aumentado en décadas recientes, aunque la mayoría de los análisis está centrada en el sector residencial (refrigeradores, iluminación,

aire acondicionado) y transporte (gasolina, diésel, etc.) [Sorrell, 2007; Stapleton, Sorrell y Schwanen, 2016]. Existen pocos estudios del sector eléctrico sobre el ER para México.

La idea central del concepto ER surgió al detectar que los aumentos en la eficiencia energética no siempre se traducían en decrementos del uso de energía, mientras que este último es el efecto deseado. La eficiencia energética que es componente del cálculo de ER o de la eficiencia de uso de recursos tiene que superar la tasa de crecimiento económico anual (Jackson, 2009) para que tal eficiencia beneficie con una reducción del consumo.

La interpretación del efecto rebote es amplia, pero no existe una definición consensada entre economistas (Schipper y Grubb, 2000 *versus* Lovins *et al.*, 2019). En parte, esto se debe a que el contexto contemporáneo exige considerar el concepto desde diversos ángulos, como las interpretaciones de las fallas de mercado con sus consecuencias en el uso de energía (Barker, Dagoumas y Rubin, 2009), y, entre otros, como el desempeño de las políticas de eficiencia energética y en los impactos sobre la consecuencia y sus efectos en los problemas de gran escala como el cambio climático y las políticas nacionales e internacionales (Geller *et al.*, 2006).

Con frecuencia los especialistas en economía de la energía coinciden en que hay dos situaciones para el ER (Sorrell, 2007). Por un lado, se sostiene que, con una mejora de la eficiencia energética, se produce un ahorro de energía final, teniendo como resultado que el ER es menor que 100% del ahorro energético. Por otro lado, la optimización de la eficiencia energética genera un aumento del consumo de energía final; por lo tanto, el ER es mayor que 100% del ahorro energético, situación que se conoce como *backfire*, *rebote fuerte* en castellano.

Las técnicas de análisis para el ER directo son: los estudios de evaluación (Bonilla y Foxon, 2007; Haas y Biermay, 2000; Nesbakken, 2001 y de modelaje econométrico (Khazzoom, 1980, 1986; Stapleton, Sorrell y Schwanen, 2016. Muchos estudios también utilizan modelos numéricos.

Entre las técnicas de análisis del ER indirecto y sobre toda la economía, identificamos cuatro: 1) los cálculos y análisis de las elasticidades de sustitución (Sorrell, 2007); 2) modelos de equilibrio general computable (Turner y Hanley, 2011; Barker y Foxon, 2006); 3) modelos macroeconómicos (Barker, Ekins y Foxon, 2007), y 4) los análisis de energía,

productividad y crecimiento económico (Dimitropoulos y Sorrell, 2006; Schipper y Grubb, 2000).

En la formulación de políticas públicas en México se menciona el ER (Sener, 2014; Conuue, 2014; INECC, 2015). Algunas publicaciones que abordan el tema de ER examinan el caso de Teletrabajo en la Ciudad de México (INECC, 2015; Conuue, 2014; Graizbord *et al.*, 2014). Sin embargo, el concepto ER no se ha estudiado en el contexto de las reformas de los últimos 15 años, ni se han elaborado estudios cuantitativos para el caso de mercado de GN en México.

Sin embargo, existen evidencias del ER sobre sus impactos inesperados en las estimaciones del potencial de ahorro energético basadas en el GN y asociadas con las mejoras en la eficiencia energética, donde los ahorros posibles se compensan de forma parcial o total por los incrementos en la demanda del servicio energético (Greening, Greene y Difiglio, 2000).

Este trabajo extiende los análisis del ER para el sector eléctrico de México y GN. La literatura previa no ha considerado la eficiencia de transformación en la amplitud del ER, ni la importancia de heterogeneidad de las plantas de electricidad, es decir, que sean grandes (plantas centralizadas) o pequeñas (productores independientes).

4. METODOLOGÍA

Este análisis se basa en la aplicación de las identidades de ER desarrolladas por Sorrell (2007). Para su implementación, relaciona el consumo de GN para la generación de energía eléctrica a base de GN con las modalidades de CEP, PIES y Aut., considera que las principales tecnologías de generación son las plantas de ciclo combinado y de turbogas. Entendemos por ER una función de la demanda de energía que requiere un servicio energético, el cual está en función del trabajo útil, los GW eléctricos obtenidos por $MMBtu_{GN}$ de gas natural consumido en la generación.

A continuación, definimos los conceptos:

- Servicio energético (*ES*), entendido como potencia de movimiento, refrigeración, calefacción, cocción, iluminación, entre otras; todos los servicios requieren energía en alguna forma útil, aunque sea una pequeña proporción del costo total de algunos servicios respecto a otros.

- Trabajo útil (S) es una característica indispensable del ES y puede definirse a través de una gran variedad de mediciones físicas e indicadores termodinámicos, que pueden descomponerse de diversas maneras para revelar las contribuciones de diferentes variables.
- Atributos generales (A) son aquellas características que ayudan a identificar aspectos importantes de un ES ; pueden diseñarse en combinación con el S de diversas formas.

Por lo tanto, la combinación del S con A específicos definen a un ES , como lo muestra la ecuación:

$$ES = es(S, A) \quad [1]$$

Los trabajos de Sorrell (2007) y Sorrell, Gatersleben y Druckman (2018) enfatizan que el consumo de los servicios energéticos implica la interrelación de los tres aspectos:

1. El consumo de trabajo útil respecto al consumo de otros atributos del servicio energético.
2. La energía, el capital y otros bienes de mercado con el tiempo de producción del servicio energético.
3. Entre el consumo de diferentes tipos de servicios energéticos.

Para estimar el ER como una elasticidad de la eficiencia, definimos:

- *Eficiencia energética:*

$$\varepsilon = S/E \quad [2]$$

donde E es la energía requerida para generar una unidad de producto de salida de trabajo útil.

- *Costo energético* del trabajo utilizado:

$$P_s = \frac{P_E}{\varepsilon} \quad [3]$$

donde P_s es el precio de la energía.

Los cambios en la demanda de trabajo útil seguidos de un pequeño cambio en la eficiencia energética pueden medirse como la elasticidad de la eficiencia de la demanda del trabajo útil, $\eta_\varepsilon(S)$.

$$\left(\right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \varepsilon} \tag{4}$$

De la misma forma, la demanda seguida de un pequeño cambio en la eficiencia energética puede medirse con $\eta_\varepsilon(E)$.

$$\eta_\varepsilon(E) = \frac{\partial E}{\partial \varepsilon} \frac{\varepsilon}{E} \tag{5}$$

Al sustituir $E = S/\varepsilon$ en la ecuación [3], tomando las derivadas parciales y sustituyendo los términos similares de la ecuación [2], obtenemos la relación entre las dos elasticidades.

$$\eta_\varepsilon(E) = \frac{\partial S/\varepsilon}{\partial \varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{S/\varepsilon} \right) = \left(-\frac{S}{\varepsilon^2} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \right) \left(\frac{\varepsilon^2}{S} \right) = \left(-1 + \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \frac{\varepsilon}{S} \right)$$

$$\eta_\varepsilon(E) = \eta_\varepsilon(S) - 1 \tag{6}$$

De acuerdo con Berkhout, Muskens y Velthuisen (2000), esta medida se ha interpretado como una medida directa del ER. Este modelo conceptual se verifica con datos del sector eléctrico de México. A continuación, analizamos los resultados del modelo.

5. RESULTADOS: EFECTO REBOTE

El servicio energético que utilizamos es la generación de potencia eléctrica a base de GN. El trabajo útil (S) son los GM eléctricos obtenidos por $MMBtu_{GN}$ de GN consumido; el atributo se define para identificar al generador. Y la eficiencia del sistema eléctrico (ε) es la cantidad de energía total que ingresa al sistema para la obtención de una unidad de potencia eléctrica.

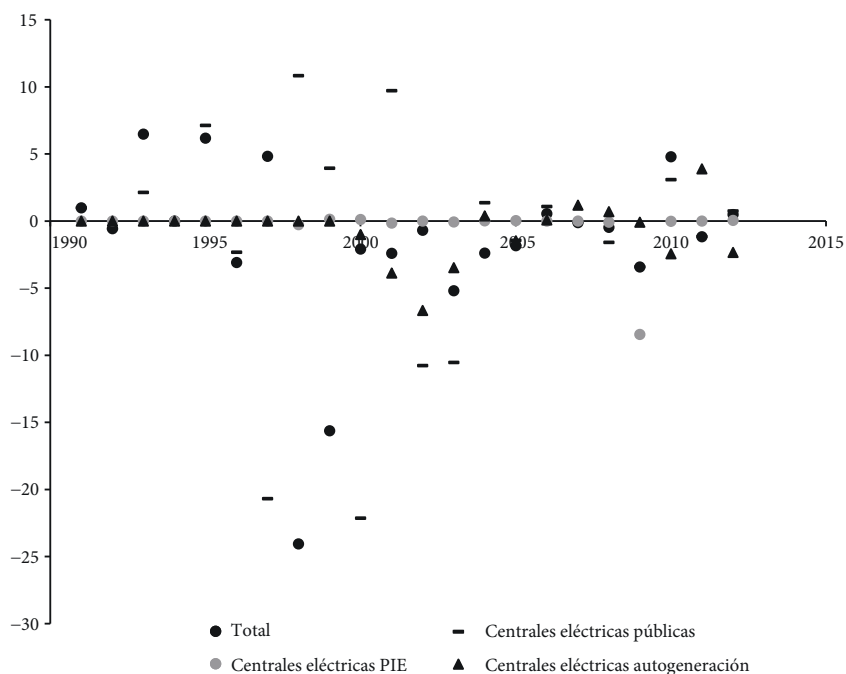
Primero analizamos los resultados de:

1. El ER de uso de gas natural en generación de electricidad.
2. Elasticidades de demanda de electricidad respecto de la eficiencia de transformación.
3. Elasticidad de demanda de electricidad respecto a precios de gas natural.

En la gráfica 2 es posible apreciar los resultados del análisis (ecuaciones [2]-[5]) de ER que fue descrito en la sección.

Calculamos el ER para CEPS, PIE, los Aut (véase la gráfica 2) para periodos anuales de 2002 a 2017. Durante el periodo 2002-2017 el ER de las PIEs casi no varió, mientras que el de las CEPS fue positivo inicialmente y luego negativo en 1998-2001 (véase la gráfica 2). El ER se tornó positivo a lo largo de 2001-2002. En los últimos años, el ER de las CEPS converge con los valores del ER de otras tecnologías (PIE y Aut). En la gráfica 2 apreciamos que el ER es más agudo y negativo cuando el PIB manufacturero se contrajo en 1994-1996, 2000-2005 y 2010-2012.

Gráfica 2. Efecto rebote, gas natural. CEP, PIE, Aut



Fuente: autor con datos de la Sener (2019).

El signo deseado del ER debe variar entre -1 y 1 . Si el valor de ER es >1 significa que la demanda de GN sube más que la eficiencia. Este signo negativo de ER puede interpretarse como ER fuerte o *backfire*.

Las CEPS responden de una manera más aleatoria al cambio en la eficiencia (véase la gráfica 2). Por ejemplo, la desviación estándar da un valor (8.2) muy lejano del promedio (1.5). Esto demuestra que la eficiencia aumenta, pero el consumo de gas se dispara, lo cual refleja un efecto de *backfire*. El ER es sumamente alto en el caso de estas plantas. Esto se explica por dos factores: 1) las CEPS fueron gestionadas con deficiencia en el periodo de análisis y 2) no compraron electricidad de sí mismas, sino de las PIES. Las CEPS compran electricidad a las PIES, lo que afecta su estado financiero. Estas plantas son más grandes que las PIES y que los Aut.

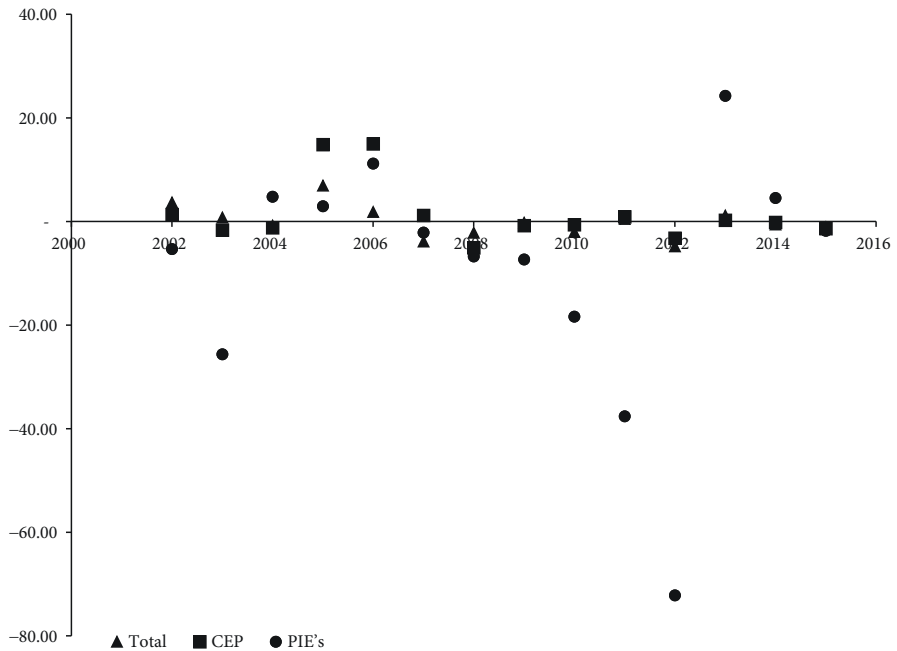
Las PIES responden de igual manera que el cambio en la eficiencia energética: el consumo de GN cambia en igual proporción que los cambios en la eficiencia (véase la gráfica 2). El valor del ER varía entre 0.01 y -8.4 , pero durante la mayor parte del periodo de análisis el valor permanece dentro de -1 y 1 , lo cual significa que el ER no es tan potente y la eficiencia térmica sí logra reducir el consumo de este energético. La desviación estándar se aproxima al valor del promedio; esto refleja que la ER de estas plantas es más estable y predecible.

Los Aut muestran menos resiliencia: en 2002-2006 presentaron un valor de ER >1 , lo cual confirma que consumen de modo proporcional más GN que el cambio en eficiencia de transformación (véase la gráfica 2). La desviación estándar muestra que el ER de estas plantas es relativamente estable. En resumen, el valor del ER depende también del tamaño de la planta. En este caso, los Aut son relativamente pequeños y tienen valores bajos: a) del ER y b) de la recuperación de demanda de GN.

El siguiente examen de elasticidades complementa el análisis del ER de dos modalidades de generación (véase la gráfica 3). La elasticidad del GN respecto de la eficiencia de las CEPS es más volátil en comparación con las elasticidades de las PIES. La elasticidad del GN es positiva: en algunos años, el cambio en el consumo de GN aumentará al mismo tiempo que la eficiencia (CEPS y PIES, indicadas por un círculo en la gráfica 4).

La eficiencia de transformación se calcula usando datos de generación bruta dividida por el consumo de gas natural por año. La eficiencia de transformación es el cociente del GN que sale de las plantas procesadoras de GN respecto al gas natural que entra.

Gráfica 3. Elasticidad de la demanda de gas natural para la generación eléctrica respecto a la eficiencia de transformación. Valor en eje Y: elasticidad de punto



Fuente: véase la gráfica 2.

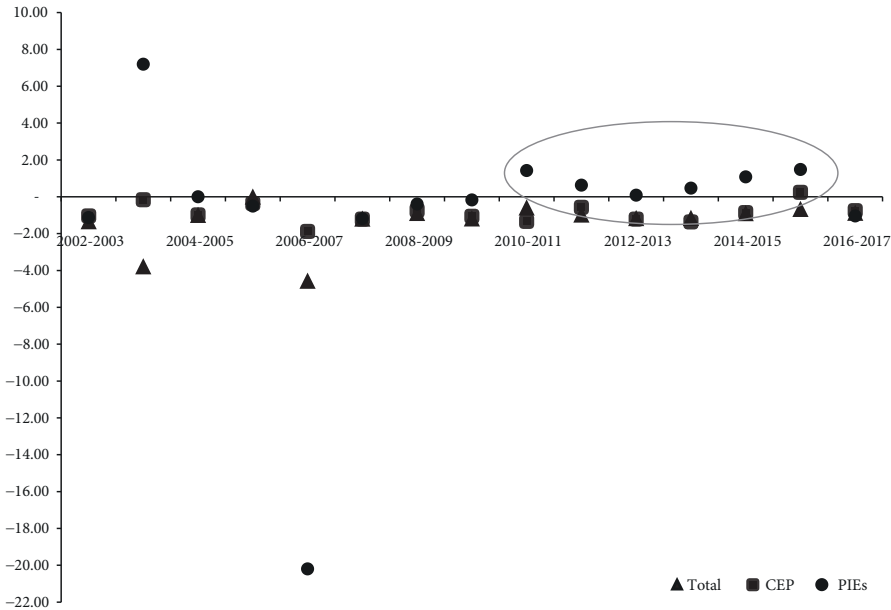
Cuando la cantidad demandada de GN o electricidad tiene un valor de elasticidad de >1 , la demanda es elástica: un cambio porcentual en eficiencia de transformación causa un cambio porcentual más grande en la cantidad requerida de GN. Por otro lado, si la elasticidad es <1 , la demanda de GN es inelástica, lo cual implica que es necesario un cambio porcentual muy grande en la eficiencia para reducir el requerimiento de gas.

La evidencia muestra que las elasticidades para las tres modalidades de generación son: a) CEP: la elasticidad es >1 (en 2002, 2005-2009) respecto a la eficiencia; esto indica que un aumento en la eficiencia está asociado con un incremento de uso de GN. En los periodos restantes, la elasticidad es negativa, lo cual refleja que la eficiencia está vinculada con un decremento del uso de GN. Desde 2008 en adelante, las CEPs mejoraron su gestión: cambios en la eficiencia resultan en incrementos

cada vez menores en su uso de GN. Esto demuestra que tales plantas van reduciendo el uso del GN de modo gradual. Las CEPS responden de manera positiva a un cambio porcentual en su eficiencia: es decir, un cambio en la eficiencia aumenta el consumo de GN. *b*) PIES: este tipo de plantas responde muy rápidamente a la eficiencia: un cambio en la eficiencia origina un cambio porcentual negativo en la demanda de GN. El efecto del precio del gas (2002-2005) produce su efecto dilatorio: la demanda de gas disminuyó de modo sustancial en 2005-2007 (véase la gráfica 5). Esto significa que la eficiencia es efectiva en reducir el requerimiento de GN en este tipo de productores. *c*) los Aut responden de manera negativa al cambio porcentual en la eficiencia: un cambio en la eficiencia causa un cambio porcentual negativo en la demanda de gas natural. Esto es el efecto esperado.

La gráfica 4 muestra los cambios anuales en los valores de elasticidad de la demanda de GN para la generación eléctrica respecto al precio del GN.

Gráfica 4. Elasticidad de la demanda de gas natural (para la generación eléctrica) respecto al precio de gas natural



Fuente: véase la gráfica 2.

Como afirmamos antes, cuando la cantidad requerida es >1 , la demanda es elástica: un cambio porcentual en la eficiencia causa un cambio porcentual más grande en la cantidad demandada de gas.

A continuación analizamos las elasticidades respecto del precio de GN (véase la gráfica 4). Una forma alternativa para entender el ER es a través de las elasticidades del servicio (generación de electricidad) en relación con el precio en ausencia de más información de estas plantas de electricidad. A diferencia de las PIES, las CEPS no respondieron de forma tan negativa durante 2002-2017 a un cambio porcentual en su precio: un cambio en éste reduce el consumo de gas, lo que refleja que la gestión de estas plantas se basa menos en los precios de insumos. Estas elasticidades de precio indican que el precio es un determinante en sus operaciones, a pesar de que las CEPS son públicas y propiedad del Estado y de forma normal no maximizan sus ganancias. El alza en los precios de GN de 2002-2005 afectó la elasticidad en 2005-2007, pero este último valor es mayor para las PIES en comparación con las CEPS.

Las PIES responden muy rápido, mucho más que las CEPS, al precio: un cambio en el precio causó un cambio porcentual negativo en la demanda de GN en el periodo 2002-2018. El efecto del precio del GN de un periodo anterior (2002-2005) después generó un efecto fuerte sobre el consumo de GN: la demanda de GN disminuyó de manera sustancial en 2005-2007 (véase la gráfica 4). En los años subsiguientes la elasticidad fue estable después de que el precio se estabilizó (2009-2017). La gestión de estas plantas está dirigida más al nivel de precios del GN en comparación con las CEPS. Estas plantas maximizan más sus ganancias, por tanto, son más sensibles a los cambios en los precios de insumos (gas natural). Con excepción del subperiodo 2006-2007, de 2002-2017 las elasticidades del precio mostraron valores bajos, lo cual explica la reducida magnitud del ER (véase la gráfica 4) de las PIES. Estos niveles de elasticidad son el efecto esperado después de que estas firmas (CEPS o PIES) invirtieron en mayor eficiencia a base de GN. Nuestra evidencia muestra que las CEPS parecen menos motivadas para reducir costos que las PIES.

6. ANÁLISIS

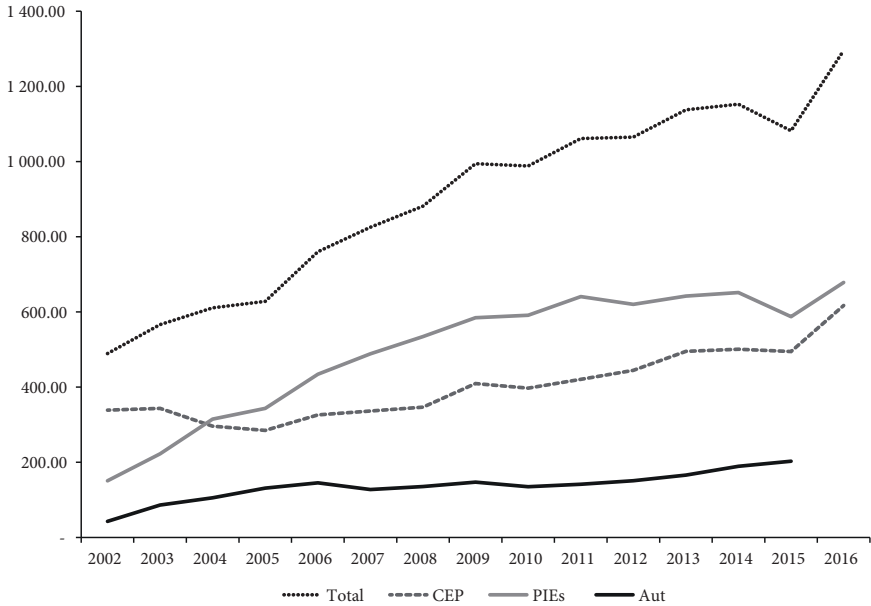
En esta parte analizamos para los tres tipos de plantas: el ER ya discutido, la demanda de GN, el consumo de electricidad y los costos de genera-

ción. El valor estimado del ER dependerá de estas variables. Una manera alternativa para entender el ER es a través del valor de elasticidades del servicio (generación de electricidad) respecto del precio (gráfica 4). Estas tendencias de costos, consumo y energía primaria (petajoules/Kwh) requeridos (gráfica 1) también ayudan a entender el ER.

La gráfica 5 muestra la demanda de gas natural por tipo de tecnología de generación (CEP, PIES, Aut) de 2002-2017. El rápido crecimiento de las PIES a costa de las CEPs (en control de la CFE) ocurrió en otro contexto regulador y es probable que en el marco regulador actual detenga el crecimiento de las PIES.

Observamos el cambio en el consumo de GN en el 2002 por modalidad de generación: las PIES rebasan a las CEPs. Estas muestran un crecimiento más lento en su consumo. La demanda de electricidad (véase la gráfica 6) crece más de 100% (2002-2017-2018), muy por encima de la producción industrial, la cual creció 24% en el mismo periodo (medida de valor agregado de industria, Banco Mundial, 2019). Si consideramos

Gráfica 5. Generación bruta de energía eléctrica por tecnología (petajoules)



Fuente: véase la gráfica 2.

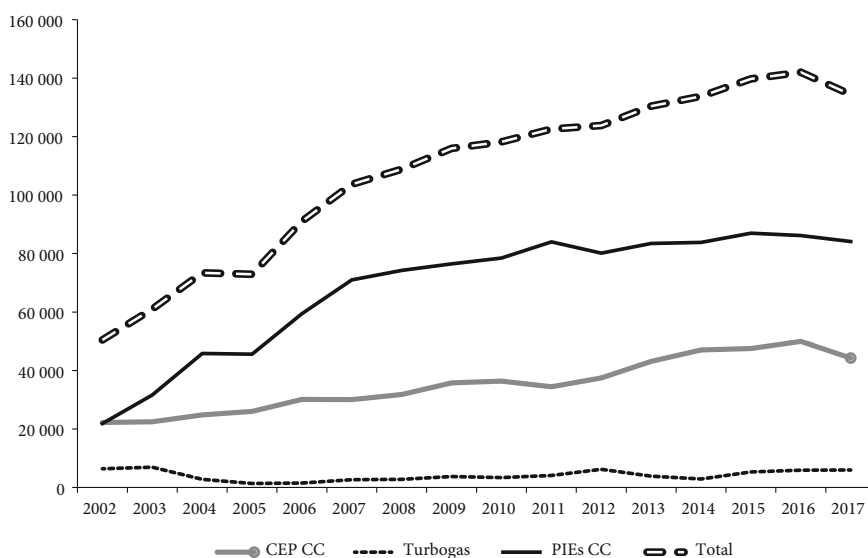
el crecimiento por tipo de modalidad (véase la gráfica 6), la generación de las PIES por CC crece más que las CEPS por CC.

Las PIES CC gozan de una participación destacada en el mercado eléctrico mexicano dados los cambios en el mercado. La demanda de electricidad (de turbogas) permanece constante en ese periodo.

En la gráfica 6 observamos que la generación que más crece en esos años es la de los productores independientes, la cual es seguida por la de la CEP. El turbogas registra pequeños incrementos en el mismo periodo. Las PIES demuestran tener menos costos de generación en comparación con las CEPS; esto permite una mayor participación de las PIES en el mercado eléctrico (véase la gráfica 7). Los nuevos cambios en el marco jurídico (la Ley de la Industria Eléctrica; CFE, 2020) podrían frenar el crecimiento de las PIES y favorecer a las CEPS de la paraestatal CFE, aunque las actuales normas de la Cofece se interponen a tal ley.

En la gráfica 7 mostramos los cambios históricos en costos de generación de electricidad *por tipo de planta*. Por ejemplo, los costos han disminuido precipitadamente desde 2008 hasta el presente. Si bien todos los tipos de planta registran una caída, la principal fue en los costos de

Gráfica 6. Generación bruta de energía eléctrica por tecnología (GWh)



Fuente: autor con datos de la Sener (2017, 2019).

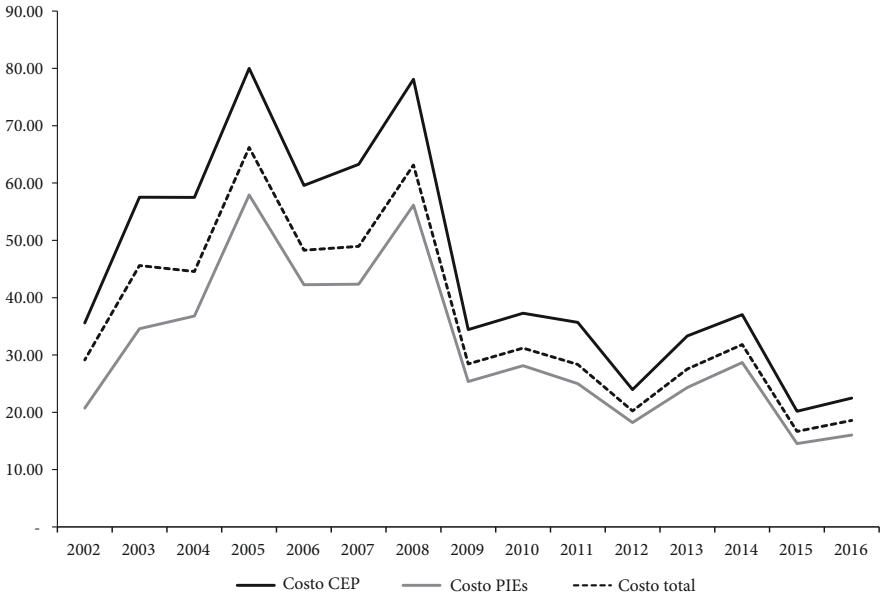
las PIES, las cuales son empresas privadas. Las CEPS registran menos decrementos en sus costos, ya que son empresas públicas. Esto explica que las CEPS muestren elasticidades de precio menores que las PIES: al ser entidades privadas, estas últimas están bajo presión para reducir los costos. Estas elasticidades dependen del año observado.

Una forma de observar la posible evolución del uso del GN es a través de los cambios en el costo de generación, lo cual aumenta la magnitud del ER. Si el costo aumenta, la demanda del GN debe reducirse; si tal costo disminuye, el consumo debe incrementarse. La razón principal de la caída del costo de generación es el precio del GN, el cual se reduce en el mismo periodo (véase la gráfica 7). Este último está muy correlacionado con el precio del petróleo, que también disminuye en ese mismo periodo.

El costo de generación para el año i se estima con la siguiente fórmula:

$$CG_i = \frac{RT_n \times CC_i}{PCN_i} \quad [7]$$

Gráfica 7. Costos de generación de electricidad por tipo de planta (US\$/MWh)



Fuente: autores con datos de la Sener (2017, 2019).

donde CG_i = costo de generación (US\$/MWh), RT = rendimiento térmico (%), CC = precio de gas por pie cúbico (US\$/ft³) y PCN = valor calorífico neto.

Como consecuencia, dado que los costos de generación de las PIES son bajos, estas plantas pueden continuar aumentando su participación en el mercado eléctrico mexicano siempre y cuando: 1) no enfrenten costos de la red de infraestructura y transmisión y 2) las CEPS (propiedad de CFE) les compre electricidad a altos precios que permita a las PIES tener alta rentabilidad.

7. CONCLUSIÓN

En este artículo proponemos un modelo numérico que mide efectos inesperados con base en el ER (el modelo conceptual) después de la penetración del GN en el sector eléctrico de México, lo cual ocurrió con las reformas que favorecen al mercado en el periodo 2000-2018. Esta fase de evolución del sector culmina en 2018. El modelo usa variables de eficiencia de transformación de las tres modalidades de generación, precios de gas, uso de gas de estas mismas y capacidad de electricidad de las plantas en el periodo 2002-2018.

Aunado al ER, calculamos dos tipos de elasticidades respecto de: 1) eficiencia de transformación y 2) precio de GN. Estas elasticidades explican con más detalle cómo los factores afectan la demanda de GN, la cual se acelera durante las reformas energéticas de 2000-2018. Tales reformas favorecen la infraestructura (plantas de generación eléctrica y gasoductos) para la importación de GN; esto debilita la soberanía energética y, al mismo tiempo, refuerza el ER. Podemos especular que el consumo de GN de las PIES se reducirá mientras que el consumo de GN y de combustible de las CEPS aumentará en el contexto de la nueva ley LIE adoptada en 2021 y de las contrarreformas energéticas impulsadas por el Ejecutivo.

Cuatro resultados emanan del análisis cuantitativo. Primero, encontramos un impacto del ER muy alto, principalmente de las CEPS. Segundo, las elasticidades de consumo del GN respecto de la eficiencia tienen un valor bajo en el caso de las CEPS, lo cual demuestra que las CEPS son menos eficientes en el control de costos de este insumo. Tercero, las elasticidades de consumo de GN en relación con el precio refuerzan el resultado del

ER: las plantas en la modalidad CEPS son mucho menos sensibles a este precio, mientras que las PIES son muy sensibles al precio; esto se debe a que estas plantas son privadas y son más racionales en sus costos. Cuarto, el aumento en producción industrial y de ingreso de hogar incrementa la demanda de electricidad al mismo tiempo, alentando así el consumo de GN. Tal situación aumentó la inversión en plantas de ciclo combinado en el periodo de estudio. Para satisfacer tal demanda es necesario invertir en el sector a través de tecnología más limpia y de carga de base.

Dos consecuencias se derivan de nuestro modelo de ER para el sistema eléctrico nacional y de abastecimiento de GN. Primero, las importaciones de GN podrían ser menores si no existiese el ER y la balanza de pagos se beneficiaría. Segundo, los bajos precios del GN aumentan el ER porque en lugar de consumir menos (como insumo de generación de electricidad), el consumo es mayor volumen en todo el sector de generación de plantas. La metodología propuesta para estimar el ER puede extenderse al análisis de factores adicionales: efecto producción que también altera el ER, el efecto de ingreso hogareño y el efecto de costo nivelado. ◀

REFERENCIAS

- Banco de México (2021). Índice de volumen de la producción industrial. [en línea] Disponible en: <<https://www.banxico.org.mx/SieInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?sector=2&accion=consultarCuadro&idCuadro=CR205&locale=es>>.
- Banco Mundial (2019). Valor agregado industrial (manufactura, valor agregado en dólares constantes US\$ de 2010). [en línea] Disponible en: <<https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.MANF.KD?locations=MX-US>>.
- Barker, T., Dagoumas, A. y Rubin, J. (2009). The macroeconomic rebound effect and world economy. *Journal of Energy Efficiency*, 2(411). <https://doi.org/10.1007/s12053-009-9053-y>
- Barker, T., Ekins, P. y Foxon, T. (2007). Macroeconomic effects of efficiency policies for energy intensive industries: The case of the UK Climate Change Agreements, 2000-2010. *Energy Economics*, 29(5), pp. 760-778. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2006.12.008>
- Barker, T. y Foxon, T. (2006). The macroeconomic rebound effect and the UK economy. *Report to the Department of the Environment, Food and Rural Affairs*. 4CMR, Cambridge.

- Berkhout, P.H.G., Muskens, J.C. y Velthuisen, J.W. (2000). Defining the rebound effect. *Energy Policy*, 28, pp. 425-432. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00022-7](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00022-7)
- Bonilla, D. y Foxon, T. (2007). Estimating demand for new car fuel economy in the UK 1970-2004 using a two-stage error correction model. *Environmental Economy and Policy Research* [Discussions Paper Series]. University of Cambridge, Department of Land Economy, Cambridge.
- Borenstein, S. (2013). *A microeconomic framework for evaluating energy efficiency rebound and some implications* [NBER Working Paper, No. 19044]. National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA.
- Broberg, T., Berg, C. y Samakovlis, E. (2015). The economy wide rebound effect from improved energy efficiency in Swedish industries-A general equilibrium analysis. *Energy Policy*, 83, pp. 26-37. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.03.026>
- Cenace, Centro Nacional de Control de Energía (2017). *Informe de tecnología de generación de referencia*. [en línea] Disponible en: <<https://www.cenace.gob.mx/Docs/MercadoOperacion/TecnologiaGeneracionReferencia/2017/Tecnología%20Generación%20Referencia%202016%20v2016%2012%2006.pdf>>.
- CFE (2020). *Plan de negocios, 2021-2025*. México: CFE.
- Conuue, Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (2014). *Estrategia de transición para promover el uso de tecnologías y combustibles más limpios*. Ciudad de México: Conuue.
- CRE, Comisión Reguladora de Energía (2021). *Índice de precios de gas natural*. [en línea] Disponible en: <<https://datos.gob.mx/busca/organization/cre>>.
- Dimitropoulos, J. y Sorrell, S. (2006). *The rebound effect: Microeconomic definitions, extensions and limitations*. Proceedings of the 29th IAEE International Conference, Potsdam, Alemania.
- EIA, U.S. Energy Information Administration (2021). *Today in energy*. [en línea] Disponible en: <<http://eia.gov/today/inenergy.detail.php?id=39172>>.
- Geller, H., Harrington, P., Rosenfeld, A.H., Tanishima, S. y Unander, F. (2006). Policies for increasing energy efficiency: Thirty years of experience in OECD countries. *Energy Policy*, 34(5), pp. 556-573. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.11.010>
- Graizbord, B., Mercado, A., González, J.L., Mendoza, D., Larralde, A. y Aguayo, F. (2014). Teletrabajo: una estrategia de mitigación de GEI para el área metropolitana de la Ciudad de México. En: S. Giorguli y V. Ugalde (coords.),

- Gobierno, territorio y población: las políticas públicas en la mira*, (pp. 645-690). México: Colegio de México. [en línea] Disponible en: <<http://www.jstor.org/stable/j.ctt15hvw3.18>>.
- Greening, L.A., Greene, D.L. y Difiglio, C. (2000). Energy efficiency and consumption –the rebound effect– A survey. *Energy Policy*, 28, pp. 389-401. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00021-5)
- Gillingham, K., Rapson, D. y Wagner, G. (2016). The rebound effect and energy efficiency policy. *Review of Environmental Economics and Policy*, 10(1).
- Haas, R. y Biermayr, P. (2000). The rebound effect for space heating – Empirical evidence from Austria. *Energy Policy*, 28(6-7), pp. 403-410. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00023-9](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00023-9)
- INECC, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2015). *Modelación de descarbonización profunda del sistema energético en México al 2050. Reporte final*. Ciudad de México: INECC.
- Institute of Energy Research (2019). *The levelized costs of electricity generation technologies, Report*. [en línea] Disponible en: <<https://www.instituteforenergyresearch.org/>>.
- Jackson, T. (2009). *Prosperity without Growth: Economics for a Finite Planet*. Londres: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315677453>
- Jevons, W. (1865 [2001]). The coal question: An inquiry concerning the progress of the Nation, and probable exhaustion of our coal mines. *Library of economics and liberty*, vol. IX. Gran Bretaña: Palgrave. [en línea] Disponible en: <<http://www.econlib.org/library/YPDBooks/Jevons/jvnCQCover.html>>.
- Jin, T. y Kim, J. (2019). A new approach for assessing the macroeconomic growth energy rebound effect. *Applied Energy*, 239(April), pp. 192-200. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.220>
- Khazzoom, J.D. (1980). Economic implications of mandated efficiency in standards for household appliances. *Energy Journal*, 1(4), pp. 21-40. <https://doi.org/10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol1-No4-2>
- Khazzoom, J.D. (1986). An econometric model integrating conservation in the estimation of the residential demand for electricity. *JAI Press*, Greenwich, CT.
- Li, Y., Zhang, N. y Liu, Y. (2016). The energy rebound effect across China's industrial sectors: An output distance function approach. *Applied Energy*, 184, pp. 1165-1175, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.1170306-2619/>
- Lovins, A., Urge Vorsatz, D., Mundaca, L., Kammen, D. y Glassman J.W. (2019). Recalibrating climate prospects. *Environmental Research Letters*, 14(12), pp. 1-17. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab55ab>.

- oEC, Observatory of Economic Complexity (2021). [en línea] Disponible en: <https://oec.world/en/visualize/tree_map/hs92/import/mex/usa/show/2019/>.
- Nesbakken, R. (2001). Energy consumption for space heating: A discrete-continuous approach. *Scandinavian Journal of Economics*, 103(1), pp. 165-84. <https://doi.org/10.1111/1467-9442.00236>
- Ramírez Camperos, A., Rodríguez Padilla, V. y Guido Aldana, P. (2013). The Mexican electricity sector: Policy analysis and reform (1992-2009). *Energy Policy*, 62, pp. 1092-1103. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.063>
- Rodríguez Padilla, V. (2016). Industria eléctrica en México: tensión entre el Estado y el mercado. *Problemas de Desarrollo*, 185(47), pp. 35-57. [en línea] Disponible en: <<https://probdes.iiec.unam.mx/index.php/pde/article/view/54104>>.
- Schipper, L. y Grubb, M. (2000). On the Rebound? Feedback between energy efficiency & energy uses in IEA countries. *Energy Policy*, 28(6-7), pp. 367-388. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00018-5)
- Sener, Secretaría de Energía (2014). *Estrategia nacional de transición energética y aprovechamiento sustentable de la energía*. [en línea] Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/215/ENTEASE_2014.pdf>.
- Sener (2017). *Energy Information System (EIS) of the Secretary of Energy*. [en línea] Disponible en: <<http://sie.energia.gob.mx/>>.
- Sener (2019). *Energy Information System (EIS) of the Secretary of Energy*. [en línea] Disponible en: <<http://sie.energia.gob.mx/>>.
- Sorrell, S. (2007). *The rebound effect: An assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency*. Report. RU: Energy Research Centre.
- Sorrell, S., Gatersleben, B. y Druckman, A. (2018). *Energy sufficiency and rebound effects*. Estocolmo: European Council for an Energy Efficient Economy.
- Stapleton, L., Sorrell, S. y Schwanen, T. (2016). Estimating direct rebound effects for personal travel in Great Britain. *Energy Economics*, 54, pp. 313-325. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.12.012>
- Turner, K. y Hanley, N. (2011). Energy efficiency, rebound effects and the environmental Kuznets curve. *Energy Economics*, 33(5), pp. 709-720.
- Van der Bergh (2011). Energy conservation more effective with rebound policy. *Environmental and Resource Economics*, 48, pp. 43-58. <https://doi.org/10.1007/s10640-010-9396-z>
- Wallenborn, G. (2018). Rebounds are structural effects of infrastructure and markets. *Frontiers in Energy Research*, 6(99), pp. 1-6. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00099>