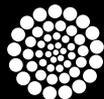


COLECCIÓN
**CIENCIAS Y
HUMANIDADES
PARA MÉXICO**

Transición energética justa y sustentable

Contexto y estrategias
para México

**Luca Ferrari
Omar Masera
Alejandra Straffon**
COORDINADORES



CONAHCYT

CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

COLECCIÓN CIENCIAS Y HUMANIDADES PARA MÉXICO

El Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) difunde, a través de la colección Ciencias y Humanidades para México, obras de investigación científica y humanística que aportan conocimientos para el desarrollo y bienestar de nuestro país.

Las personas autoras, tanto nacionales como extranjeras, son profesionales y académicas altamente capacitadas en la investigación humanística y científica, dedicadas a la atención de las principales temáticas y los problemas prioritarios de México, así como del contexto latinoamericano.

Con la publicación de estos trabajos se conforma un corpus valioso, accesible para estudiantes de educación superior, así como profesionales especializados y no especializados. De igual forma, el público general podrá completar o enriquecer su formación mediante la lectura y el estudio de sus páginas.

Los libros de esta colección abordan cuestiones fundamentales y de interés, como salud, movilidad, soberanía alimentaria, migración, cambio climático, transición energética, educación, artes y literatura, y contribuyen al diálogo e intercambio de ideas sobre temas actuales que remiten a nuestras realidades.

De esta manera el Conahcyt y el Fondo de Cultura Económica han unido esfuerzos para hacer de esta colección una muestra significativa de las visiones y los conocimientos que las mentes expertas tienen respecto de algunos temas sobresalientes que hoy se debaten en México y América Latina.

Transición energética justa y sustentable

Programa Nacional Estratégico de Energía
y Cambio Climático (Pronace ECC)

COLECCIÓN
**CIENCIAS Y
HUMANIDADES
PARA MÉXICO**

Transición energética justa y sustentable

Contexto y estrategias
para México

Luca Ferrari
Omar Masera
Alejandra Straffon

COORDINADORES



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



**FONDO
DE CULTURA
ECONÓMICA**

Primera edición, 2023

[Primera edición en libro electrónico, 2024]

Ferrari, Luca, Omar Masera y Alejandra Straffon (coords.)

Transición energética justa y sustentable. Contexto y estrategias para México / coord. e introd. de Luca Ferrari, Omar Masera, Alejandra Straffon ; present. de María Elena Álvarez-Buylla Rocés. – México : FCE, Conahcyt, 2023

796 p. ; 23 × 17 cm – (Colec. Ciencias y Humanidades para México)

Nota: Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático (Pronace ECC)

ISBN 978-607-8273-35-5 (Conahcyt)

ISBN 978-607-16-8327-4 (FCE)

1. Recursos energéticos - México 2. Desarrollo energético - México 3. Desarrollo sustentable - México 4. Política energética - México 5. Medio ambiente - México I. Masera, Omar, coord. II. Straffon, Alejandra, coord. III. Álvarez-Buylla Rocés, María Elena, present. IV. Ser. V. t.

LC HD9505.M4

Dewey 333.79 F566t

Distribución mundial

© Luca Ferrari
© Omar Masera
© Alejandra Straffon

D. R. © 2023, Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías
Av. Insurgentes 1582, col. Crédito Constructor,
alcaldía Benito Juárez, Ciudad de México, CP 03940

D. R. © 2023, Fondo de Cultura Económica
Carretera Picacho Ajusco 227, col. Ampliación Fuentes
del Pedregal, Ciudad de México, CP 14110

Todos los Derechos Reservados. Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, la fotocopia o la grabación, sin la previa autorización por escrito del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías.

ISBN 978-607-8273-35-5 (Conahcyt)

ISBN 978-607-16-8327-4 (FCE)

ISBN 978-607-16-8400-4 (electrónico-pdf)

Impreso y hecho en México

Presentación

Impulsar una transición energética justa y sustentable constituye uno de los esfuerzos de investigación e incidencia más importantes, urgentes y necesarios para México. Por un lado, el panorama energético a nivel mundial está cambiando, ya que se están agotando las reservas de combustibles fósiles, y tanto su extracción como su producción resultan cada vez más costosas. Por otro, se ha demostrado que el cambio climático y un sinnúmero de conflictos socioambientales emanan del modelo energético que impera aún en nuestro país y en el mundo entero. Dicho modelo caracteriza a un paradigma civilizatorio que se debe transformar por el bien de la humanidad y de la vida en el planeta.

En este escenario, el análisis del potencial y de las limitaciones técnicas y materiales de las diferentes fuentes de energía disponibles en México es fundamental para el diseño de estrategias que contribuyan a garantizar no sólo la soberanía energética del país, sino también el bienestar de toda la población, pues la energía es imprescindible para el cumplimiento de derechos humanos tan esenciales como el acceso al agua, la alimentación, la salud, la educación, la vivienda y el ambiente sano, entre muchos otros.

Como señala el Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático (Pronace ECC) del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) del Gobierno de México –que inició el primero de diciembre de 2018 para promover una transición justa y sustentable en nuestro país–, es preciso trabajar de forma integral en cuatro ejes estratégicos: 1) impulsar una movilidad sustentable, con énfasis en el fortalecimiento del transporte público; 2) promover la generación de

“calor verde” en el sector industrial, sobre todo en las miles de pequeñas y medianas empresas que hoy dependen de los combustibles fósiles para estas tareas; 3) brindar acceso a servicios energéticos dignos y eficientes para las poblaciones rurales mediante sistemas energéticos rurales sustentables (SERS) que apoyarán la generación de empleos y oportunidades de ingreso en las regiones más marginadas de México, y 4) propiciar la democratización efectiva de la producción, y el uso de la energía mediante el impulso a cooperativas de generación distribuida.

En suma, México debe planear una transición democrática, equitativa e incluyente, comenzando por los sectores más vulnerables, sin perder de vista la importancia del cuidado y la conservación de los recursos naturales del país. Aunque el tema es complejo, pues convergen en él múltiples dimensiones que deben ser atendidas de manera rigurosa y coordinada, la investigación y el diálogo son indispensables para consolidar alternativas viables, sustentables, duraderas, culturalmente pertinentes y democráticas.

Desde el Conahcyt, nos enorgullece presentar este libro, producto del esfuerzo colectivo de más de cuarenta especialistas en energía bajo la coordinación del Pronace ECC. Confiamos en que su lectura será de gran utilidad para el público general y especializado, y esperamos también que las estrategias presentadas en este volumen lleguen a los distintos niveles de gobierno, promoviendo la diversificación de fuentes energéticas, la innovación, el desarrollo tecnológico, el diálogo entre múltiples actores, el quehacer humanístico e interdisciplinario, así como la toma de decisiones con base en evidencia científica robusta y actualizada.

Dra. María Elena Álvarez-Buylla Roces
Directora general, Consejo Nacional de
Humanidades, Ciencias y Tecnologías

Introducción

Omar Masera
Luca Ferrari
Alejandra Straffon

¿POR QUÉ ANALIZAR LA ENERGÍA?

A pesar de la insistencia que se pone constantemente en la economía, la dimensión que abarca todo el espectro de la actividad humana es la energía. Como civilización, perdimos de vista su importancia debido a que durante mucho tiempo vivimos como si la energía fuera un bien gratuito. Y, en efecto, a partir de la Revolución Industrial, y en particular durante buena parte del siglo xx, las grandes reservas de combustibles fósiles –un legado muy especial de la naturaleza acumulado durante millones y millones de años– nos hicieron creer que nos encontrábamos en un mundo de abundancia infinita. En consecuencia, desde entonces toda la planeación energética –y económica– se ha hecho en función de poder incrementar la oferta de energía, sin tomar en cuenta sus efectos sociales o ambientales, ni los rendimientos decrecientes, ni la naturaleza no renovable de los hidrocarburos.

Sin embargo, ya desde la década de 1970 varios analistas comenzaron a cuestionar este modelo de “crecimiento infinito”. Destacan, por ejemplo, los famosos reportes del Club de Roma (Meadows *et al.* 1972) sobre los límites del crecimiento y los trabajos de Georgescu-Roegen (1971) sobre la necesidad de analizar la actividad económica desde fundamentos físicos, considerando en particular el carácter irreversible de

las actividades humanas a la luz de la segunda ley de la termodinámica. Estos enfoques tuvieron mucho eco, sobre todo durante la primera gran crisis del petróleo en la década de 1970, que mostró la vulnerabilidad de un sistema energético global dependiente de los combustibles fósiles. A nivel internacional, se comenzaron a crear programas de ahorro de energía, y a nivel conceptual, se desarrolló el enfoque de planeación con base en usos finales de la energía, es decir, considerando la energía no como un fin en sí mismo, sino como un medio para la satisfacción de necesidades humanas, tales como la cocción, la calefacción, la iluminación y el transporte.

Más adelante, en la década de 1980, se desarrollaron escenarios futuros que mostraban con claridad el terrible despilfarro del sistema energético dominante y las posibilidades de un mundo más sustentable, en el que podrían satisfacerse las necesidades energéticas básicas de toda la población con una fracción del consumo energético y con una mucho menor dependencia de los combustibles fósiles (Goldemberg *et al.* 1998; Herrera *et al.* 1977). No obstante, estos análisis quedaron en el olvido con el auge del neoliberalismo a partir de la década de 1990 y con la baja en los precios de los hidrocarburos por el descubrimiento y puesta en producción de los últimos grandes yacimientos de Alaska y mar del Norte.

En la actualidad, con un mundo en plena emergencia climática, con recursos fósiles menguantes, costos crecientes de energía y en medio de una crisis económica, social y ambiental de magnitudes planetarias, han vuelto al primer plano la energía y la necesidad de transitar a otras formas y patrones de su uso, menos contaminantes y más justas. ¿Cuánta energía necesitamos en realidad para satisfacer nuestras necesidades como sociedad? ¿Cómo podemos mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y reducir los impactos ambientales a tiempo para evitar una crisis climática? ¿Qué significa dejar de depender de los combustibles fósiles y qué nuevos retos prácticos, económicos y técnicos nos plantean las fuentes renovables de energía? ¿Cómo se puede convertir

la energía en un motor de desarrollo verdaderamente local y no sólo en una fuente de ganancia para las grandes corporaciones? ¿Qué alternativas tenemos a nuestra disposición para ahorrar energía y usarla de forma más sustentable en los diferentes sectores?

La energía es un tema de particular relevancia para nuestro país. México depende en un 85% de los combustibles fósiles y también, sustantivamente, de la importación de gasolina, diésel y gas natural. Además, 40% de los mexicanos vive en condiciones de pobreza energética. Por si esto fuera poco, nuestro país ocupa el decimosegundo lugar a nivel internacional en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero –en su mayoría producidas por el sector energético–; presenta además un alto deterioro ambiental debido a la exploración, producción y uso de energéticos, y se ha convertido en el escenario de un creciente número de conflictos que involucran a las comunidades locales debido al establecimiento de proyectos mineros y de recursos renovables.

En la presente administración se han abierto nuevos debates que obligan a una detenida reflexión sobre el papel del Estado en la conducción de la política energética y en la “explotación” de recursos renovables y no renovables. Nos hallamos ante la apremiante necesidad de un diálogo que permita abordar el papel que deben desempeñar los hidrocarburos en la economía nacional –tanto en el presente como en el futuro–, así como la naturaleza del sistema eléctrico, el futuro de los proyectos de generación de energía basados en fuentes renovables y la minería de elementos estratégicos como el litio. A su vez, han quedado en el tintero temas centrales como el ahorro y el uso eficiente de energía, la participación del sector social y la identificación de estrategias que hagan verdaderamente universal en México el derecho a servicios energéticos dignos, accesibles y sustentables.

Con este libro, el Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático (Pronace ECC) intenta contribuir a estos debates al brindar información y análisis derivados del trabajo de connotados

expertos nacionales. El objetivo es ofrecer una perspectiva integral, comprehensiva y fresca del sector energético mexicano –desde la producción de combustibles y la generación de energía con fuentes renovables hasta los usos finales de esta última– a fin de entender los retos que enfrentamos y las oportunidades que tenemos para consolidar en México un uso más justo y sustentable de la energía.

DOS GRANDES CORRIENTES

Entre los numerosos debates internacionales en cuanto a los cambios que debe atravesar nuestra relación con la energía, podemos distinguir dos grandes corrientes. La primera es una corriente dominante que ve la transición energética simplemente como el paso de un sistema dominado por combustibles fósiles a otro que deberá depender de las fuentes renovables –con o sin el complemento de la energía nuclear, de acuerdo con los autores–. Esta postura se alinea conforme a la lógica de los promotores del “crecimiento verde”, motivo por el cual ha sido impulsada no sólo por la mayoría de los gobiernos occidentales, sino también por la Agencia Internacional de la Energía (IEA, por sus siglas en inglés), la Agencia Internacional de Energías Renovables (Irena, por sus siglas en inglés) y el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), entre otras organizaciones internacionales. La premisa fundamental de esta corriente consiste en que es posible consumir una transición energética hacia fuentes renovables sin reducir los niveles de consumo de energía, sin cuestionar la lógica económica dominante, orientada al crecimiento económico como fin en sí mismo (OECD 2011, 2017; UNEP 2012; World Bank 2012; Irena 2020) y, en los planteamientos más extremos, sin poner en duda la estructura actual del capitalismo neoliberal, donde unas pocas corporaciones controlan los mercados de productos energéticos, digitales, farmacéuticos y alimentarios, por citar sólo algunos sectores, mientras la desigualdad aumenta tanto entre el Norte

y el Sur globales como al interior de las naciones (Hickel *et al.* 2022). Esta visión ha recibido diversas críticas, no sólo por no atender a la desigualdad creciente en el consumo de energía, sino por ser inviable a escala planetaria (Hickel y Kallis 2020).

Una segunda corriente, con la que se identifica el Pronace ECC, es que la transición energética debe ser parte de una transición sociotecnológica de mayor amplitud y que, según Svampa (2022, p. 3), “debe entenderse desde una perspectiva holística que apunta a un cambio integral (...) en el plano energético, productivo y urbano (así como rural), hacia modelos que articulen la justicia social con la justicia ambiental, hacia prácticas económicas y productivas basadas en la reciprocidad, la complementariedad y los cuidados; hacia un nuevo pacto con la naturaleza, que garantice la sostenibilidad de la vida digna”. Esta formulación se articula y complementa con todos los movimientos sociales que hoy trabajan por un nuevo imaginario basado en los principios colectivos del “buen vivir”, un mundo que ya no será un gran mercado donde las personas son antes que nada objetos y sujetos de consumo, sino un lugar donde se reconozcan los límites biofísicos y se logre convivir en un espacio justo y seguro para todos, comenzando por los más vulnerables (Svampa 2022).

En términos específicos, consideramos que para una transición energética justa y sustentable (TEJS) es necesario impulsar de manera integral acciones desde el punto de vista de la oferta y la demanda energéticas. Por un lado, la TEJS debe buscar una participación mayoritaria de las fuentes renovables en la matriz energética nacional, así como la disminución absoluta del consumo energético en el lado de la demanda. Una transición de esta naturaleza contribuiría a mitigar el cambio climático mediante una reducción absoluta de las emisiones debidas al uso de energía y garantizaría, a su vez, una mayor seguridad e independencia energéticas. Por otro lado, la TEJS debe reducir las prácticas inequitativas al asegurar el acceso universal a servicios energéticos dignos en las zonas rurales y periurbanas, que son

las menos favorecidas. Para conseguir esto último es indispensable promover la democratización de la generación de energía y detonar así procesos productivos locales con base en la generación distribuida comunitaria de energía con uso de fuentes renovables.

MÉXICO ANTE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

La evidencia científica actual indica que México ha entrado desde hace más de una década en la etapa de declive natural de la producción de hidrocarburos, lo que tiene como consecuencia un rápido incremento en el costo de exploración y extracción de nuevos yacimientos, así como una disminución significativa de su magnitud y calidad. Considerando, además, el creciente impacto ambiental y los efectos que sobre el clima tienen la producción y el consumo de energía fósil, la transición energética hacia fuentes renovables resulta inevitable. Sin embargo, esta transición no puede ser concebida simplemente como un reemplazo de los combustibles fósiles para luego continuar con el patrón de producción y consumo anterior, ya que esto es inviable desde el punto de vista técnico, ambiental y económico, además de que, por sí solo, no resuelve la gran desigualdad en el consumo de energía que caracteriza a nuestra sociedad. Frente a este escenario, identificamos tres grandes ejes para el análisis de las posibilidades de una TEJS en México.

El primer eje requiere la comprensión a fondo del actual patrón de consumo de energía en el país, así como de los principales retos que plantea la alta dependencia de los hidrocarburos, incluidos petróleo y gas natural. Para ello, es esencial saber manejar la tasa de retorno energético de estos combustibles, un indicador fundamental de la energía neta que queda para uso de la sociedad a medida que los yacimientos de mayor calidad son explotados o, como en el caso de México, a medida que se haya pasado el pico de la producción. En relación con los patrones de consumo, es imprescindible analizar: 1) el sector y el sistema eléctricos, cuya infraestructura y regulación son muy complejas, y 2) la

demanda sectorial del país, su estructura, su evolución reciente y la forma en que se satisfacen o no los servicios de energía entre los diferentes grupos sociales, considerando los usos finales de la energía y el nivel de ingreso de la población.

Un segundo gran eje de análisis consiste en examinar con todo detalle las oportunidades y los límites de las fuentes renovables de energía para que pueda pensarse en el reemplazo de los combustibles fósiles en nuestro país. La transición energética debe promover el uso diverso y sustentable de los recursos renovables disponibles en México, armonizando los proyectos con sus variados contextos socioecológicos. Además de la energía solar fotovoltaica y la eólica, el abanico de alternativas incluye las aplicaciones térmicas de la energía solar, los recursos hidráulicos, la bioenergía –en sus diversas formas y aplicaciones– y la geotermia. En cada caso, es importante tener presentes los potenciales energéticos existentes y las oportunidades que brindan las nuevas tecnologías, sin perder de vista los retos inherentes al uso de las energías renovables, como el depender de flujos variables de energía, el no ser almacenables o el tener una mucho menor densidad energética que los combustibles fósiles, aspectos que deben incluirse en la planificación y el diseño de los sistemas futuros de energía. Además, la construcción de la infraestructura de las fuentes renovables –aerogeneradores y parques solares, por mencionar algunos ejemplos– depende de combustibles fósiles, así como de minerales estratégicos que se encuentran en cantidades limitadas en la corteza terrestre, y cuya explotación implica mayores impactos ambientales asociados a una creciente actividad minera. Cabe hacer notar que en estos intentos por entender las posibilidades reales de fuentes alternativas de energía entra también en juego la nuclear, la cual, aunque muy concentrada y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero al operar, tiene costos altísimos de inversión, depende del uranio –un recurso no renovable que tendríamos que importar junto con la mayor parte de la tecnología de los reactores–, y no tiene resuelto el problema de la disposición de los residuos radiactivos a mediano ni –menos aún– a largo plazo.

Por último, el tercer eje de análisis atañe a las acciones concretas que, una vez considerados los patrones actuales de consumo y las perspectivas de los recursos renovables disponibles, se pueden llevar a cabo en México con miras a una TEJS. Algunas de las líneas estratégicas que se examinan en este libro son:

- El ahorro energético en el sector del transporte mediante transporte público electrificado de calidad, limitaciones al uso del coche particular y una ampliación de otros modos de transporte.
- La descarbonización gradual del uso y generación de la energía en el sector industrial mediante la sustitución de combustibles fósiles por fuentes de “calor verde” –biomasa y energía termosolar–, así como una mayor eficiencia energética que derive en una reducción absoluta del consumo total de energía.
- El uso de fuentes renovables –fotovoltaica, termosolar y biomasa– para usos térmicos y eléctricos en los sectores residencial y comercial, buscando al mismo tiempo una mayor eficiencia energética mediante el uso de equipos altamente eficientes y normas de aislamiento y ventilación en las edificaciones.
- La eliminación de la pobreza energética, con acciones como el desarrollo de sistemas energéticos comunitarios basados en un menú amplio de recursos renovables –solar, eólica, biomasa, hidráulica y geotermia–, así como en ecotecnologías de uso final –estufas eficientes, paneles solares, biodigestores, secadores y bombas.
- La democratización efectiva de la distribución de energía y de los beneficios de su aprovechamiento mediante una fuerte promoción a los “prosumidores” de energía, con base en la integración de cooperativas urbanas y rurales de producción distribuida comunitaria de energía, particularmente de electricidad.
- La promoción de otros modelos de participación social, capaces de fortalecer procesos de autonomía territorial, economías solidarias y soberanía alimentaria.

- El fortalecimiento de un sistema alimentario saludable, soberano y cada vez menos dependiente de los combustibles fósiles mediante una transición agroecológica, la promoción de productos y de mercados locales, así como el uso creciente de energías renovables.

Las acciones que se proponen en este libro pueden enfrentar la resistencia de algunos sectores de la población o incluso del gobierno en sus diferentes niveles, si bien hay gobiernos locales que ya están desarrollando políticas públicas exitosas en las líneas mencionadas. Sin embargo, estamos convencidos de que, al ser resultado de un análisis minucioso de la problemática energética de México y sus alternativas, lo que proponemos es parte de los cambios que requiere el país para ser viable y sustentable en el mediano y largo plazo. Para construir una nueva narrativa del futuro de México, será esencial debatir abiertamente estos temas con la participación de todos los sectores de la sociedad.

ESTRUCTURA DEL LIBRO

Las tres secciones que conforman este libro son producto del esfuerzo de 42 investigadores que han cedido con generosidad su tiempo y sus conocimientos a fin de brindarnos un panorama detallado y científicamente sólido de la ruta por seguir para consolidar en México una TEJS. Al tratarse de una obra colectiva, el libro refleja distintas concepciones acerca de la transición energética, unidas, sin embargo, por la búsqueda de justicia y sustentabilidad.

En la primera sección, integrada por 10 capítulos, se lleva a cabo un diagnóstico del estado actual del país en materia energética, caracterizado por cuatro aspectos principales: 1) los límites de la expansión de la producción de hidrocarburos, 2) la creciente dependencia energética del país, que amenaza la seguridad energética, y 3) la concentración de la producción y consumo de energía y –su contraparte– la pobreza energética.

En la segunda sección, conformada por seis capítulos, se analizan el potencial, el costo y los límites del despliegue de las posibles fuentes renovables a través de un análisis detallado de las energías eólica, solar, geotérmica, biomasa e hidráulica. En cada caso se detallan su potencial energético, sus principales aplicaciones, sus costos y demás aspectos relacionados con la sustentabilidad de su aprovechamiento. La sección cierra con un capítulo que ofrece una perspectiva integral en torno a las energías renovables –y, de manera sucinta, sobre la nuclear–, haciendo especial hincapié en los retos y límites que se enfrentarían en caso de que se pretenda utilizarlas como simples sustitutos de los combustibles fósiles.

Partiendo de este contexto, en la tercera sección se presentan seis capítulos en los que se dan ejemplos concretos de acciones capaces de encaminarnos hacia una verdadera TEJS. Se hace hincapié en la necesidad de un cambio de paradigma energético, lo que implica un enfoque integral en el que se actúe simultánea y decididamente tanto en la demanda como en la oferta energéticas, buscando cambios profundos en la producción de energía, los patrones y estilos de consumo, la movilidad y la urbanización, el sistema alimentario, la producción industrial y el acceso social a los servicios energéticos. En este proceso de cambio, es vital la construcción conjunta de alternativas con los pobladores y los actores locales.

El libro concluye con una revisión general de los principales hallazgos junto con una serie de recomendaciones y acciones orientadas a llevar a la práctica una verdadera transición energética justa y sustentable en México.

AGRADECIMIENTOS

Esta obra es ante todo el producto de un enorme e intenso trabajo colectivo.

Como coordinadores, queremos agradecer en primer lugar al Conahcyt, en particular, a su directora general, la doctora María Elena Álvarez-Buylla Roces, por haber apoyado la idea de escribir un libro

sobre el proceso de transición energética y hacerlo parte del proyecto editorial del Conahcyt en su convenio con el Fondo de Cultura Económica, en la colección Ciencias y Humanidades para México. De igual forma, expresamos nuestro agradecimiento a la Coordinación de Comunicación y Cooperación Internacional del Conahcyt, en especial a Horacio Chavira Cruz, Alberto Cue y Luis Flores Valtierra, por su apoyo en la publicación, coordinación editorial y organización del proceso de dictamen del libro. En relación con este último punto, reconocemos el atinado y minucioso trabajo de dictamen de seis revisores anónimos que ayudaron a mejorar la propuesta original. De igual manera, es preciso mencionar las aportaciones de Salvador Jaramillo, por su asesoría en materia de diseño, así como las de Leopoldo Laurido y Fabián Espejel, por su trabajo de corrección de estilo en las lecturas de pruebas de esta obra.

No podríamos concluir estos agradecimientos sin mencionar al equipo de asistentes de investigación del Pronace ECC. Debemos un reconocimiento especial a Andrea González Márquez por su cuidadoso trabajo de edición y corrección de estilo. De igual forma, agradecemos las valiosas observaciones y sugerencias de Sofía Ávila, así como el apoyo logístico de Daniel Cohen Salgado y Azucena Silva Norman. Por último, expresamos nuestro reconocimiento tanto a Arlen Hernández por su trabajo de diseño editorial como a Brenda Arvizu, Jorge Fernández, Marco Barón y Christopher Domínguez por el diseño de las 199 gráficas, diagramas y mapas que constituyen el soporte visual de este libro.

REFERENCIAS

- Georgescu-Roegen, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge: Harvard University Press.
- Goldemberg, J., T.B. Johansson, A.K. Reddy y R.H. Williams (1998). *Energy for a Sustainable World*. Nueva York: John Wiley & Sons.

- Herrera, A., H. Scolnik, G. Chichilnisky, G. Gallopin, J. Hardoy, D. Mosovich, E. Oteiza, G. Romero Brest, C. Suárez y L. Talavera (1977). *¿Catástrofe o nueva sociedad? Modelo mundial latinoamericano*. Ottawa: Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo.
- Hickel, J., y G. Kallis (2020). Is Green Growth Possible? *New Political Economy*, 25(4), 469-486.
- Hickel, J., C. Dorninger, H. Wieland e I. Suwandi (2022). Imperialist appropriation in the world economy: Drain from the global South through unequal exchange, 1990-2015. *Global Environmental Change*, 73, 102467.
- International Renewable Energy Agency (Irena) (2020). *Global Landscape of Renewable Energy Finance, 2020*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Meadows, D.H., D.L. Meadows, J. Randers y W. Behrens (1972). *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. Nueva York: Universe Books.
- Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD) (2011). *Towards Green Growth*. París: OECD.
- _____ (2017). *Green Growth Indicators 2017*. París: OECD.
- Svampa, M. (2022). Dilemas de la transición ecosocial desde América Latina. *Documentos de trabajo*, (2). Madrid: Fundación Carolina; Oxfam Intermón. <https://doi.org/10.33960/issn-e.1885-9119.DTFO02>
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2011). *Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication. A Synthesis for Policy Makers*. Nairobi: UNEP.
- World Bank (2012). *Inclusive Green Growth: The Pathway to Sustainable Development*. Washington, DC: World Bank.

Sección 1

DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA ENERGÉTICO MEXICANO

1.1 Matriz energética nacional y flujos de energía

Luca Ferrari
Rodrigo Palacios Saldaña

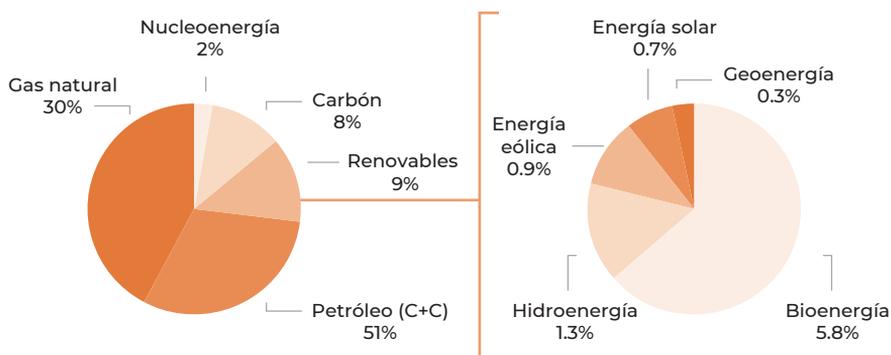
INTRODUCCIÓN

Este capítulo ofrece el marco general del sistema energético mexicano, el cual es tratado con más detalle en los capítulos subsecuentes. En este apartado abordamos de forma general el flujo de energía nacional –desde la oferta hasta su uso final– con base en los datos oficiales que proveen la Secretaría de Energía (Sener) y el Centro Nacional de Control de Energía (Cenace), los cuales han sido revisados y, en algunos casos, corregidos. Se eligió analizar el año 2019 debido a que en 2020 hubo variaciones anómalas por el efecto de la reducción selectiva de algunos sectores de consumo como consecuencia de la pandemia de Covid-19 (véase capítulo 1.9).

Debido a su riqueza en hidrocarburos, a lo largo de más de medio siglo la matriz energética de México ha sido dominada por los combustibles fósiles. En 2019 la oferta interna bruta de energía proveniente de energéticos primarios –esto es: la energía disponible con la que cuenta el país, la que se puede emplear en los procesos de transformación, distribución y consumo, la obtenida de la producción e importación, descontando la exportación– estaba constituida así: 89% por combustibles fósiles, repartidos de la siguiente forma: 51% petróleo, 30% gas natural y 8% carbón (figura 1). Dos décadas antes, la participación de los combustibles fósiles

era casi igual, con una contribución apenas mayor de petróleo (52%) y menor de gas natural (33%). Por su parte, la participación de la energía nuclear ha cambiado sólo marginalmente desde la construcción de la central nuclear Laguna Verde en la primera mitad de la década de 1990, por el repotenciamiento (20%) de las unidades entre 2008 y 2013. En lo que se refiere a las fuentes renovables, su participación ha aumentado con mucha lentitud, al alcanzar 9% en 2019 (figura 1). Entre estas fuentes, el papel dominante le corresponde a la biomasa tradicional (5.8%), ya que una parte importante de la población usa leña como principal combustible para calefacción y cocción (Serrano-Medrano *et al.* 2014). La segunda fuente es la hidroenergía (1.3%), seguida por la eólica (0.9%), la solar (0.77%) y la geotermia (0.33%).

Figura 1. Oferta bruta de energía nacional para 2019



Fuente: Elaboración propia con base en datos del Sistema de Información de Energía (SIE), de la Sener (s.a.), del Cenace (s.a.), la Comisión Reguladora de Energía (2022) y el Inegi.

Es importante mencionar que en el mismo periodo –de 2000 a 2019– la oferta bruta nacional casi se duplicó en términos absolutos. El incremento se llevó a cabo principalmente mediante el gas natural y, en mucho menor medida, a partir de fuentes renovables. En este sentido, la evolución del sistema energético mexicano no difiere de

manera sustancial de las tendencias mundiales, donde se observa un incremento marginal de la oferta energética por fuentes renovables que se ha venido sumando al de las fuentes fósiles. En otras palabras, no ha habido sustitución real de fuentes fósiles por renovables, sino más bien una acumulación de fuentes para satisfacer una demanda creciente. Por estos motivos, la política energética nacional enfrenta dos grandes retos: 1) la recuperación de la independencia energética frente a una producción de hidrocarburos menguante y con una tasa de retorno energético a la baja (véanse capítulos 1.2 y 1.3, respectivamente) y 2) la descarbonización de la matriz energética mexicana, para atender el creciente impacto ambiental y los compromisos internacionales relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero y el incremento promedio de la temperatura mundial.

FLUJOS DE ENERGÍA

La figura 2 muestra los flujos de energía del sistema energético mexicano desde la oferta hasta el consumo final con base en la información de 2019. En la gráfica se pueden apreciar también los intercambios con el extranjero en cuanto a exportación e importación de energéticos. La oferta interna bruta de energía (figura 1) procede de restar la exportación de la producción primaria de energía y sumar la importación, así como de sumar o restar –según aplique– las variaciones de inventarios, la energía no aprovechada y la maquila. El consumo final total de energía se obtiene de restar el consumo del sector energético de la oferta interior bruta. Este último incluye todas las pérdidas asociadas a la transformación de energía primaria en secundaria.

EXPORTACIONES E IMPORTACIONES

México exporta energía casi exclusivamente en forma de petróleo crudo (véase “Anexos”, figura 2). Desde el descubrimiento de los campos

gigantes de la sonda de Campeche, en la segunda mitad de la década de 1970, México es un importante exportador en el mercado internacional (figura 3) y, aunque su papel ha venido decreciendo, en 2020 se encontraba en el lugar 15. El máximo volumen de exportación de crudo se alcanzó en 2004, cuando se exportó un promedio de poco más de 2.1 millones de barriles diarios (MMbd). Ese mismo año México llegó al máximo de su producción petrolera. Después, cuando empezó el acelerado declive del campo supergigante Cantarell en 2005 (véase capítulo 1.2, pp. 40-43), disminuyó con rapidez el volumen de la exportación. Sin embargo, esto no afectó de forma significativa la renta petrolera, porque entre 2004 y 2008 el precio del crudo se cuadruplicó, lo que compensó la baja del volumen exportado en cuanto a entradas para las finanzas públicas. Desde 2014 el volumen de las exportaciones de crudo se ha mantenido alrededor de 1.2 MMbd, un volumen mayor al procesado en el país por el sistema de refinación nacional.

Figura 3. Promedio de exportaciones de petróleo de México (1980-2020), expresadas en miles de barriles diarios

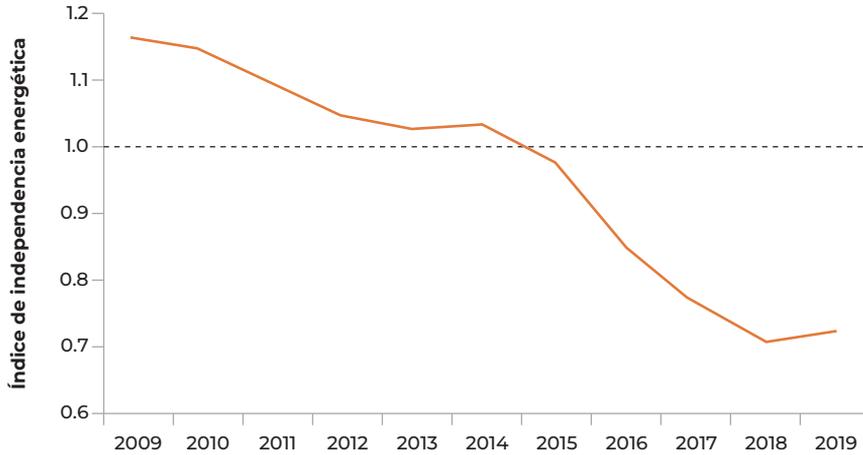


Fuente: Organización de los Países Exportadores de Petróleo (OPEP s.a.).

Por otro lado, el declive geológico de la producción de gas natural y la disminución de la capacidad de refinación han incrementado de manera progresiva la dependencia en cuanto a la importación de energéticos

del extranjero, por lo que México se ha vuelto un importador neto de energía desde 2015 (figura 4; véase capítulo 1.2, pp. 50-52). Esto último significa que México importa más energía de la que exporta.

Figura 4. Índice de independencia energética de México

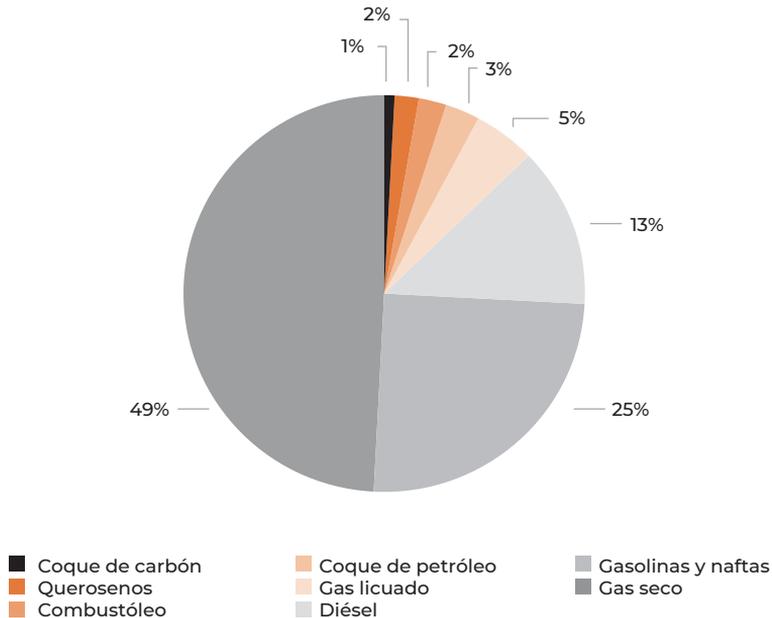


Nota: Un índice inferior a 1 indica que el país consume más energía de la que produce; la diferencia procede de la importación desde el extranjero.

Fuente: Sener (2021).

La importación de energéticos ha incrementado de manera sostenida a partir de la caída de la producción en 2005; asimismo, ha tocado su máximo a finales del sexenio pasado. Desde 2019 se ha revertido la tendencia; las razones principales han sido el descenso de la demanda y, desde finales de 2021, la recuperación incipiente de la refinación nacional. La baja de la demanda, que se experimenta desde finales de 2018, se debe a un menor crecimiento económico y, desde 2020, al efecto de la pandemia sobre el sector del transporte. Para 2019, casi la mitad de la importación de energía se relacionaba con el gas seco (figura 5), seguido de la gasolina, el diésel y el gas licuado del petróleo (GLP). En conjunto, estos hidrocarburos representan 92% de las importaciones de energía.

Figura 5. Composición relativa de la importación de energía para 2019



Nota: Los diferentes tipos de energía se han convertido a petajoules para fines comparativos.
Fuente: Elaboración propia con base en Sener (2021).

El crecimiento de las importaciones de gas natural es un proceso que comenzó desde el inicio de este siglo y se relaciona con la decisión de dar un fuerte impulso a este energético –relativamente menos contaminante y más versátil– con el propósito de cubrir una creciente demanda de electricidad, en particular en el sector industrial (véase capítulo 1.4, pp. 110-112). Es importante subrayar que, en el mismo periodo, el incremento del consumo de electricidad en el sector industrial ha sido superior al del sector residencial y comercial. En buena medida, este incremento se debe al crecimiento de la industria maquiladora de las regiones centro y norte del país, ocasionado por la firma del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) (Geocomunes 2021).

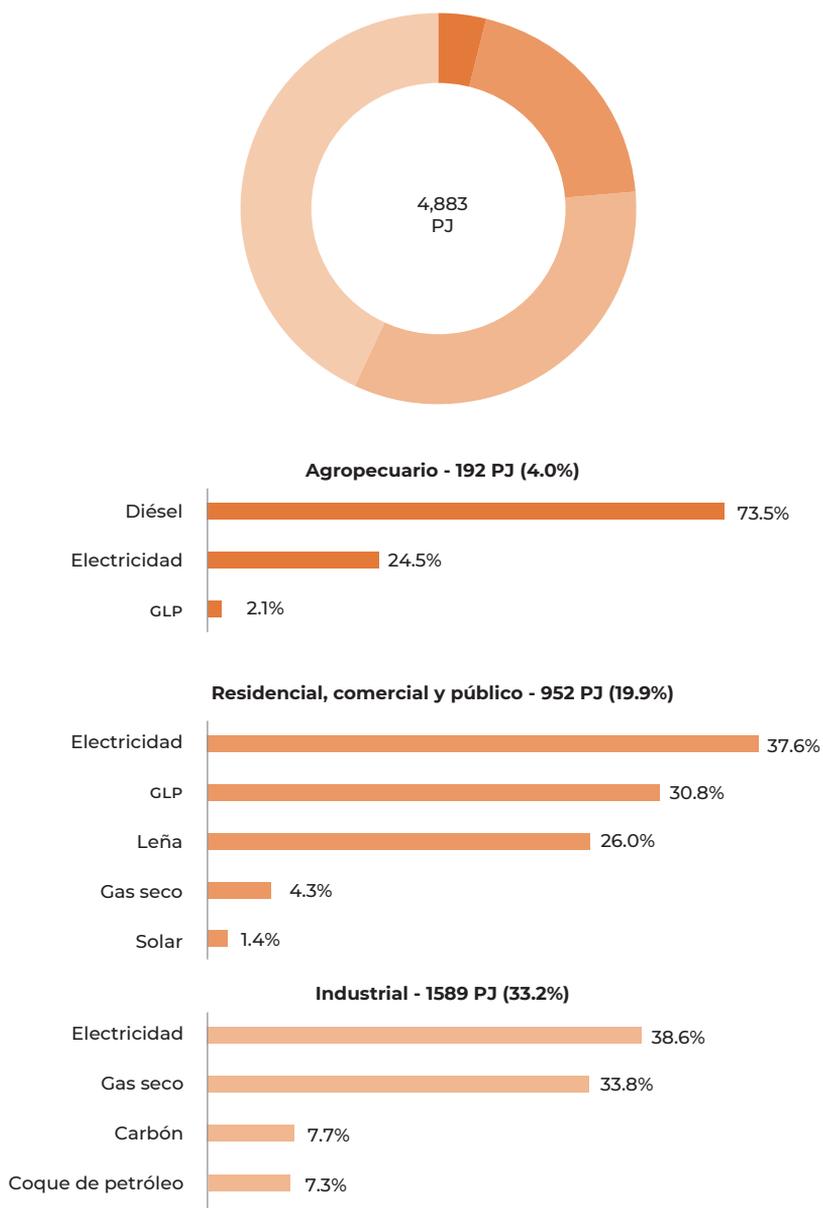
CONSUMO DEL SECTOR ENERGÉTICO

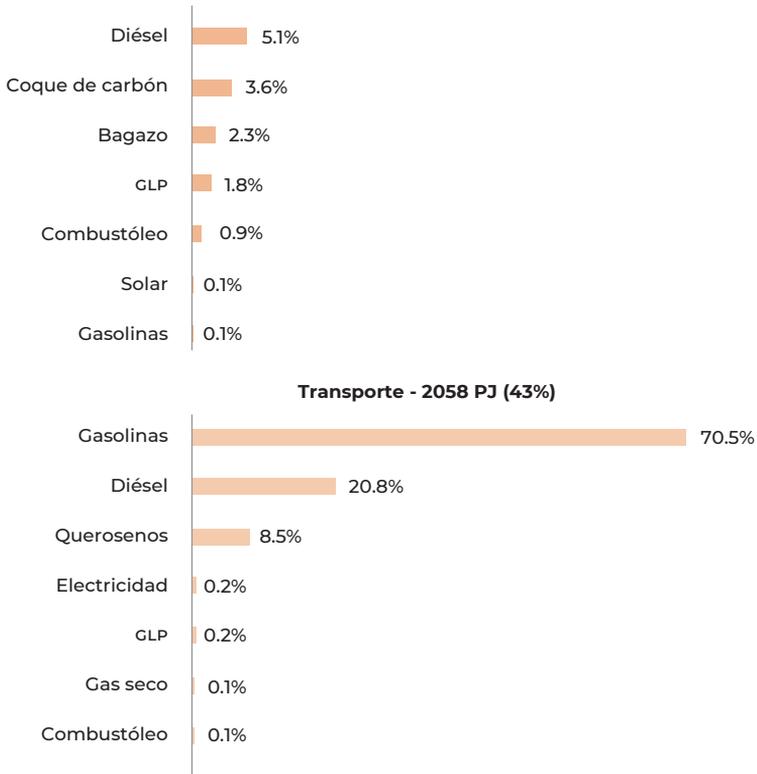
El consumo del sector energético se refiere a la energía consumida en la refinación y procesamiento de hidrocarburos, así como a la asociada a la transformación de diferentes fuentes de energía primaria en electricidad. Para 2019, el consumo del sector energético correspondió a cerca de 22% de la oferta interna bruta de energía. La mayor parte de este consumo (87%) se relaciona con las pérdidas en la generación de electricidad a partir de energía térmica –combustibles fósiles, geotermia y nuclear–, hidráulica, solar y eólica. La energía consumida en el procesamiento de hidrocarburos incluye tanto la refinación del petróleo crudo –refinerías, despuntadoras, coquizadoras y hornos– como las plantas de gas y las fraccionadoras. En conjunto, el consumo del sector hidrocarburos en 2019 fue de 13% del total del consumo energético nacional.

CONSUMO FINAL

En 2019, el consumo final de energía representó 78% de la oferta interna bruta de energía (figura 6). El sector de mayor consumo fue el de transporte (43%), donde 99.4% de toda la energía proviene de derivados del petróleo. El segundo consumidor es el sector industrial (33.2%), donde casi 60% del consumo está asociado a combustibles fósiles. La biomasa y la energía solar sólo representan 2.4%, pero pueden ser sustitutos importantes para los procesos de generación de calor de baja y mediana temperatura (véase capítulo 3.3). En el sector residencial, comercial y público (20% del total) domina la electricidad, seguida por el gas LP y la leña, energéticos que se asocian al uso doméstico para calefacción y cocción de alimentos. Es interesante hacer notar que la energía solar representa 1.4% del total, lo que sugiere un potencial importante para sustituir el uso de combustibles fósiles (véase capítulo 2.1). Por último, el sector agropecuario consumió 4% en su mayor parte en forma de diésel, que es prácticamente el único energético empleado en la maquinaria agrícola.

Figura 6. Consumo final por sector y tipo de energético para 2019





Fuente: Elaboración propia con base en Sener (2021).

CONCLUSIONES

La matriz energética de México permanece dominada por los combustibles fósiles, que en 2019 representaron 84% de la oferta interna bruta de energía. Si bien en la última década la fuente eólica y la solar han incrementado su participación, la biomasa tradicional sigue siendo la principal fuente renovable.

El declive geológico de la producción de hidrocarburos, junto con la disminución de la refinación nacional y el incremento de la generación

eléctrica basada en gas natural, han provocado un serio déficit en la balanza energética de México, que desde 2015 se ha convertido en un importador neto de energía.

Los sectores de mayor consumo de energía son el de transporte (43%) y el industrial (33%), que dependen de manera casi total de energías fósiles. Cualquier política de descarbonización y recuperación de la independencia energética debería propiciar y promover la incorporación de fuentes renovables a la matriz de generación para lograr de esta manera una sustitución paulatina de la energía basada en combustibles fósiles, así como adoptar medidas para disminuir significativamente la demanda de energéticos en áreas no prioritarias del sector transporte, como el uso del coche particular, y en los sectores industriales intensivos en energía.

REFERENCIAS

- Cenace (s.a.). Observatorio de Transición Energética de México, *ObtrenMX*. <https://obtrenmx.org>
- Comisión Reguladora de Energía (CRE) (2022). Solicitudes de interconexión de centrales eléctricas con capacidad menor a 0.5 MW. Contratos de interconexión de pequeña y mediana escala y generación distribuida. Estadísticas al segundo semestre de 2021.
- Geocomunes (2021). Alumbrar las contradicciones del sistema eléctrico mexicano y de la transición energética. *Revista Planeo*, 47, <https://revistaplaneo.cl/2021/04/08/alumbrar-las-contradicciones-del-sistema-electrico-mexicano-y-de-la-transicion-energetica-colectivo-geocomunes/>
- Organización de los Países Exportadores de Petróleo (OPEP) (s.a.). Mexico Crude Oil: Exports. *CEIC Data*. <https://www.ceicdata.com/en/indicator/mexico/crude-oil-exports>
- Secretaría de Energía (Sener) (2018). *Lista de combustibles 2019 que se considerarán para identificar a los usuarios de patrón de alto consumo, así como los factores para determinar las equivalencias en términos de barriles equivalentes de*

petróleo. México: Sener. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/428334/Lista_de_combustibles_2019.pdf

_____ (2021). *Balance Nacional de Energía 2020*. México: Sener. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/707654/BALANCE_NACIONAL_ENERGIA_0403.pdf

_____ (s. a.). *Sistema de Información Energética (SIE)*. 2022. <https://sie.energia.gob.mx/>

Serrano-Medrano, M., T. Arias-Chalico, A. Ghilardi y O. Masera (2014). Spatial and temporal projection of fuelwood and charcoal consumption in Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 19, 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.11.007>

1.2 Sector hidrocarburos: evolución histórica, situación actual y escenarios sobre la soberanía energética

Luca Ferrari
Diana Hernández Martínez

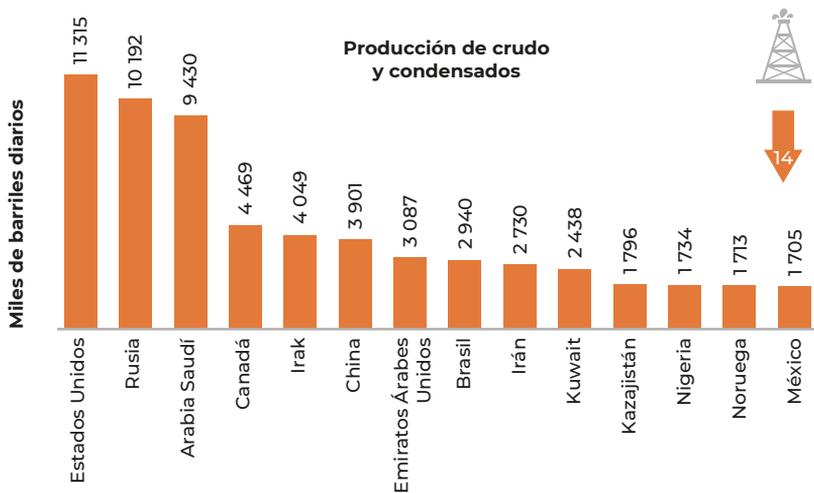
IMPORTANCIA DE LOS HIDROCARBUROS EN MÉXICO

Históricamente, los hidrocarburos han mantenido un vínculo estrecho con el desarrollo social, político y económico del país. Debido a su riqueza petrolera, México cimentó su seguridad energética en este recurso, de manera que hasta ahora los hidrocarburos representan todavía 84% de su matriz energética primaria (véase capítulo 1.1). Sin embargo, estos recursos no renovables se extrajeron a un ritmo acelerado por razones político-económicas y México pasó su pico de producción petrolera en 2004 y de gas en 2009. Desde entonces, la producción petrolera ha disminuido a la mitad y la del gas a dos tercios para el año 2020. En su auge de producción, México fue el quinto productor mundial de crudo, pero en 2021 ocupó el lugar número 14, con una producción de cerca de 1.7 millones de barriles diarios (MMbd) de crudo y condensados, correspondiente a 2.2% de la producción mundial (BP 2021). La producción mexicana es la séptima parte de la producción de Estados Unidos, principal productor

mundial, de acuerdo con las estadísticas mundiales de 2021 (figura 1). En cuanto a reservas probadas de crudo (1P),¹ México ocupa el lugar número 20, con 6 120 millones de barriles (MMbd) de petróleo (CNH 2021), lo que corresponde a 0.4% de las reservas mundiales de crudo y condensados (figura 1). En el caso del gas, las reservas probadas son de 9 981 miles de millones de pies cúbicos (MMMpc), lo cual posiciona al país en el lugar 33 del *ranking* mundial.

La comercialización del petróleo llegó a representar hasta 44% de los ingresos presupuestales tan sólo en 2008, pero el declive de la producción y, en parte, la caída de los precios desde 2014 han provocado una disminución significativa. En los últimos seis años los ingresos petroleros sólo han representado entre 11% y 20% del presupuesto de

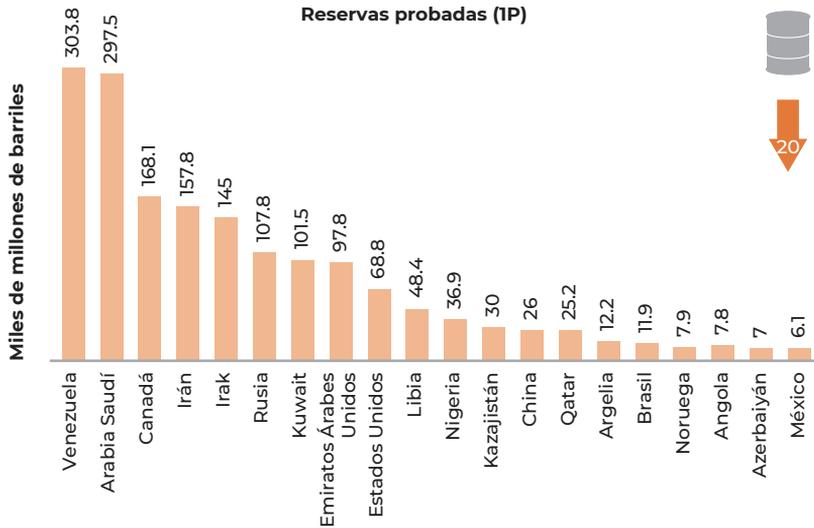
Figura 1. *Ranking* de reservas probadas y producción de crudo y condensados (2020)



Fuente: Elaboración propia con datos de BP (2021).

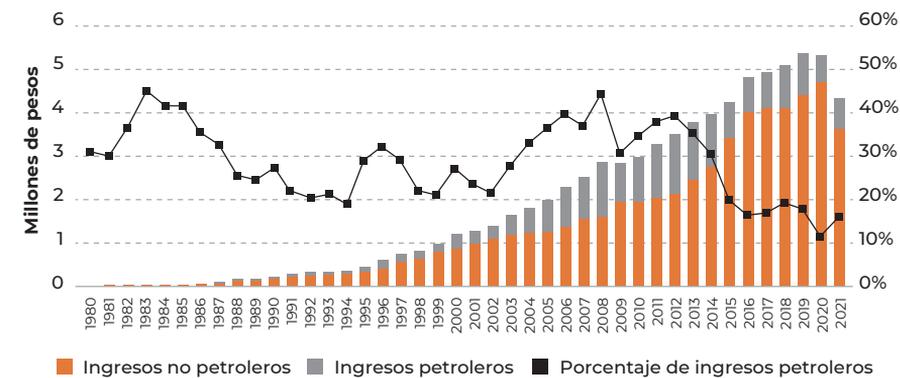
¹ Se definen como las cantidades que tienen una probabilidad de 90% de ser recuperadas en las condiciones técnicas y económicas actuales (SPE-PRMS 2007).

SECTOR HIDROCARBUROS: EVOLUCIÓN HISTÓRICA, SITUACIÓN ACTUAL Y ESCENARIOS



ingreso de la federación (figura 2), una cantidad inferior a la de las remesas de los inmigrantes mexicanos en Estados Unidos.

Figura 2. Ingresos presupuestales del sector público (de 1980 a septiembre de 2021) y porcentaje de los ingresos petroleros



Fuente: Elaboración propia con datos de Banxico (2021).

INFRAESTRUCTURA DEL SECTOR HIDROCARBUROS

La cadena de valor de la industria petrolera se suele dividir en tres áreas: 1) *upstream*, 2) *midstream* y 3) *downstream*.

El *upstream* comprende la exploración y la producción e incluye tanto la exploración para descubrir potenciales yacimientos de hidrocarburos como la perforación de pozos exploratorios y de producción. En México se han perforado alrededor de 33 500 pozos petroleros, distribuidos en las provincias petroleras del país (mapa 1): 8 180 pozos en las provincias de Burgos y Sabinas; 1 076 pozos en la de Veracruz; 12 558 en la de Tampico-Misantla; 9 298 en las Cuencas del Sureste; 2 251 en aguas someras; 95 pozos en aguas profundas, y 42 en la zona de la península de Baja California. A lo largo de su historia, en el país se han llegado a descubrir 1 217 campos de hidrocarburos (véase “Anexos”, mapa 2). No obstante, 86% de la producción acumulada de petróleo ha procedido de una sola provincia: las Cuencas del Sureste.

Mapa 1. Provincias petroleras de México



Fuente: Elaboración propia, utilizando la herramienta digital de la CNH (s.f.c).

Nota: La abreviatura SMOR se refiere al cinturón plegado de la Sierra Madre Oriental.

El *midstream* abarca el proceso de transporte de los hidrocarburos desde el yacimiento hasta el lugar de procesamiento y/o almacenamiento. La red de transporte de hidrocarburos de Petróleos Mexicanos (Pemex) incluye los ductos de producción de crudo y gas, así como los ductos de transporte a instalaciones de procesamiento, refinerías y terminales de almacenamiento (véase “Anexos”, mapa 2). De acuerdo con la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH), se cuenta con una red de 34 046 km de ductos, de la cual en la actualidad se encuentran en operación 22 941 km, es decir 67% de la red (tabla 1).

Tabla 1. Red de producción y distribución de petróleo y productos refinados

	CONSTRUIDO (KM)	OPERANDO (KM)	% OPERANDO
Gasoducto	19 856	13 544	68%
Oleoducto	4 959	3 980	80%
Oleogasoducto	3 602	2 703	75%
Otros	4 804	2 292	48%
Gasolinoducto	825	423	51%
Total general	34 046	22 941	67%

Fuente: CNH (2021).

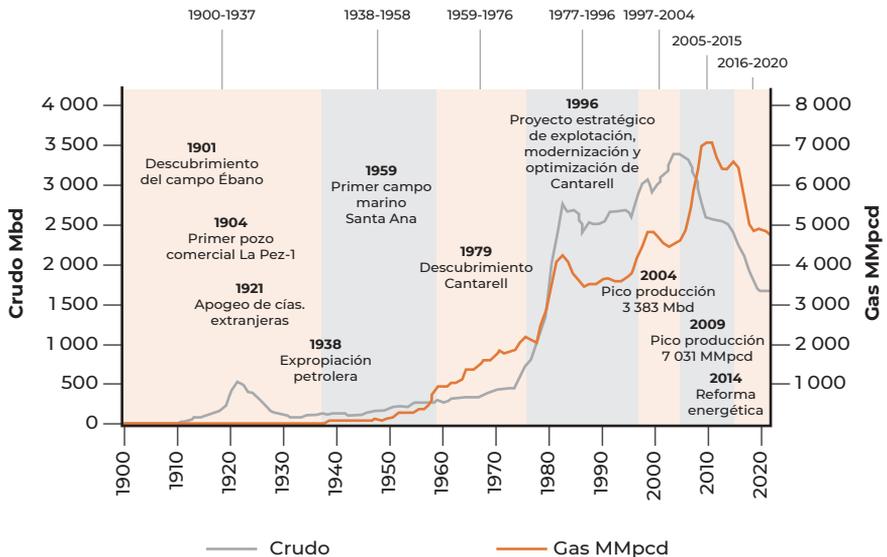
El *downstream* incluye todo lo relacionado con la refinación del petróleo crudo y el procesamiento y la purificación del gas natural, así como la distribución de productos derivados del petróleo crudo y gas natural. México cuenta con seis refinerías ubicadas en Cadereyta, Nuevo León; Minatitlán, Veracruz; Ciudad Madero, Tamaulipas; Salamanca, Guanajuato; Tula, Hidalgo, y Salina Cruz, Oaxaca (véase “Anexos”, mapa 2), construidas entre 1906 y 1979. En conjunto, estas refinerías tienen la capacidad nominal de refinar cerca de 1 640 000 barriles diarios (bd) de petróleo crudo, aunque desde 2017 operaron a menos del 50% de su capacidad. En cuanto al sector del gas natural, en México hay siete plantas de procesamiento de gas, 22 estaciones de

compresión y tres terminales de almacenamiento y regasificación de gas natural licuado en los puertos de Altamira, Manzanillo y Ensenada (véase “Anexos”, mapa 2).

PRODUCCIÓN HISTÓRICA DE HIDROCARBUROS:
DESARROLLO, AUGE Y DECLIVE

Dada la importancia de los hidrocarburos en la matriz energética y económica de México, es importante conocer la evolución del sector de hidrocarburos en nuestro país con la finalidad de contextualizar la situación actual y los escenarios futuros. La historia de la industria petrolera puede dividirse en siete periodos en relación con la producción de petróleo y gas (figura 3).

Figura 3. Evolución de la producción de petróleo crudo y gas



Nota: Periodos históricos de la industria petrolera descritos en el texto.
Fuente: Elaboración propia.

- *Periodo I (1869-1937). Nacimiento de la industria petrolera.* El desarrollo de la era del petróleo en México inició en 1869 con la perforación del primer pozo petrolero, ubicado en el cerro de Furbero, en Papantla, Veracruz (Benavides 1956; Ibarra 2003). En 1901 se descubre el primer campo comercial, Ébano, el cual continúa activo. En 1921 se alcanza el cenit de la producción de la primera etapa de exploración del país con 530 000 barriles diarios (Mbd).
- *Periodo II (1938-1958). Nacionalización de la industria petrolera.* En 1938 se lleva a cabo la expropiación de la industria petrolera y la creación de Pemex. Esta decisión fue consecuencia del declive de la producción petrolera, la baja en los precios del crudo, reformas constitucionales, gravámenes fiscales y una serie de conflictos laborales (DOF 1938a, 1938b, 1938c). La producción repunta lentamente y Pemex tiene un hito tecnológico en 1958 con la instalación de la primera plataforma marina de perforación frente a la barra de Santa Ana, en la costa del estado de Tabasco (Acuña 1991).
- *Periodo III (1959-1976). La exploración marina.* En 1959 inicia la exploración marina del golfo de México, cuyo primer descubrimiento es el campo de Santa Ana, Tabasco. La culminación de este periodo ocurre en 1976, con el descubrimiento de los campos marinos supergigantes de la Sonda de Campeche, parte de la provincia geológica de las Cuencas del Sureste (figura 3).
- *Periodo IV (1977-1996). Los grandes descubrimientos.* Con la perforación del pozo Cantarell-1, en 1977, se confirma la existencia del complejo de yacimientos supergigante Cantarell, que en su auge llegó a ser el segundo más prolífico del mundo. Durante este periodo se descubren otros campos marinos gigantes, como Ku, Maloob y Zaap, ubicados en la porción noreste de la provincia petrolera de Cuencas del Sureste (véase “Anexos”, mapa 2, recuadro D1).

- *Periodo V (1997-2004). Inicio de la declinación de los grandes campos y cenit de la producción.* A raíz de la disminución de presión del yacimiento de Cantarell, en 1997 se pone en marcha el Proyecto Estratégico de Explotación, Modernización y Optimización de Cantarell (PEEMOC). Con el objetivo de mantener y aumentar la presión del yacimiento, se intensifica la perforación y se lleva a cabo un ambicioso programa de inyección de nitrógeno (Lozada 2015). Esto permitió duplicar la producción en cuatro años, hasta un máximo de poco más de 2 MMbd desde finales de 2003. En consecuencia, se incrementó también la producción nacional de crudo y se alcanzó el pico máximo de producción en 2004, que ascendió al total de 3 383 000 barriles diarios.
- *Periodo VI (2005-2015). Declive de la producción y Reforma energética.* La sobreexplotación de Cantarell² lleva a una caída rápida de la producción de este campo, que sostenía 60% de la producción petrolera nacional. El inicio del agotamiento se refleja en el incremento de la producción de gas, que alcanza su pico máximo en 2009 con 7 031 millones de pies cúbicos diarios (MMpcd). La caída de la producción nacional se presenta como justificación para llevar a cabo una reforma constitucional en materia de energía en 2013, a raíz de la cual se expide la Ley de Hidrocarburos (DOF 2014). Con esta ley, Pemex se convierte en una “empresa productiva del Estado” y se abre la exploración y extracción de hidrocarburos a compañías privadas, tanto nacionales como extranjeras. La implementación de la reforma

² El programa de inyección de nitrógeno en Cantarell fue una estrategia sin precedente en la historia de la industria petrolera. Aunque la inyección era una práctica común desde varias décadas atrás, el plan de Pemex implicó introducir casi seis veces la cantidad que se acostumbraba en la industria. Este incremento tan exacerbado de la presión pudo haber dañado el yacimiento haciendo que el nitrógeno migrara a través de la columna de petróleo al tiempo que el agua la invadiera desde abajo. Esto hizo necesario cerrar algunos pozos, comenzando con los que tenían las relaciones gas/aceite y gas/nitrógeno más estrechas (Lajous 2014).

inició con la Ronda Cero de 2014, en la que se otorga a Pemex 83% de las reservas 2P³ y 21% de los recursos prospectivos del país. En las rondas subsecuentes, se licitan varios bloques entre varias compañías privadas, con lo que se pone fin al monopolio del Estado en la explotación de petróleo.

- *Periodo VII (2016-actualidad). Postreforma energética.* Se incorpora la producción de compañías privadas a la producción nacional. En diciembre de 2021 ésta representó 9% de la producción total.⁴ Con el nuevo gobierno del presidente López Obrador, Pemex recibe un importante incremento en su presupuesto anual con el propósito de revertir la caída de la producción. Si bien se logra detener la caída, no se alcanzó en realidad un incremento significativo: hasta el 1 de enero de 2019 la producción fue de 1 619 Mbd, y el promedio de los años 2019, 2020 y 2021 fue de 1 679, 1 663 y 1 664 Mbd de petróleo crudo, respectivamente. Esto corresponde a alrededor de 50% de lo que se produjo durante el máximo alcanzado en 2004.

LAS RAZONES GEOLÓGICAS DEL DECLIVE PETROLERO Y EL INCREMENTO DE LOS COSTOS

EL RENDIMIENTO DECRECIENTE DE LA EXPLOTACIÓN DE HIDROCARBUROS

A pesar de los episodios de mala administración y corrupción que han ocurrido en el pasado, el declive de la producción petrolera mexicana se explica en buena medida por razones geológicas y técnicas, así como por tendencias similares a las que se han observado en distintos países. Desde hace varias décadas, en múltiples ocasiones se ha demostrado que la curva de producción de todo recurso no renovable –como los

³ Las reservas 2P son la suma de las probadas y probables.

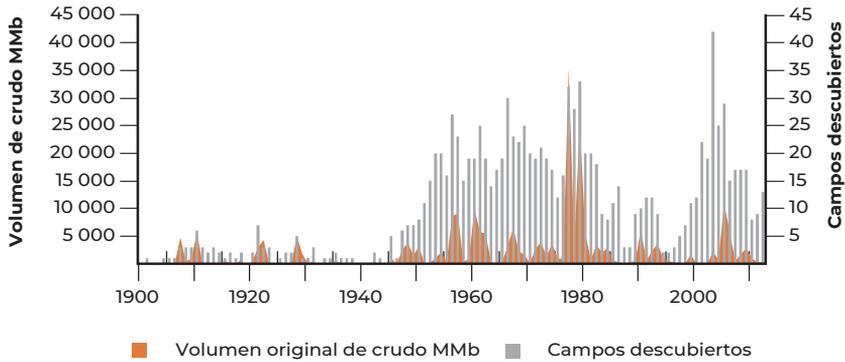
⁴ Más información disponible en CNH (s.f.a).

hidrocarburos— sube hasta un pico o cenit a partir del cual comienza su declive (Hubbert 1956; Bardi 2009). Aunque en el momento del pico se tiene todavía la mitad del recurso existente, éste se vuelve cada vez más caro, ya que siempre se descubren y desarrollan primero los yacimientos más grandes, más someros y con el recurso de mejor calidad, es decir, un petróleo ligero e intermedio. En consecuencia, en la era del declive se produce no sólo una menor cantidad de recurso, sino también con un mayor gasto económico y energético. Este fenómeno se conoce como la Ley de Retornos Decrecientes, aplicada a la producción de energía. En el caso de los hidrocarburos, esto se manifiesta con la disminución de la tasa de retorno energético (EROI), cantidad que indica la relación entre la energía invertida y la energía obtenida (Hall *et al.* 2014) y que es analizada en detalle para el sector petrolero de México en el capítulo 1.3 de este libro.

El caso de México resulta paradigmático: un análisis de los descubrimientos de petróleo muestra que el pico de dichos descubrimientos, en cuanto a volumen original, se alcanzó en la década de 1970 (figura 4). Desde entonces, aunque se han descubierto más campos, éstos son cada vez más pequeños. Además, con el tiempo se han descubierto campos cada vez más profundos (figura 5) y con petróleo de menor calidad, es decir, más pesado o ultraligero. Por ejemplo, los últimos descubrimientos como Ixachi, Quesqui y Dzimpona son yacimientos profundos (5-7 km) con altas presiones y altas temperaturas, lo que produce principalmente gas y, en menor medida, petróleo muy ligero (es decir, 40° a 45° API).⁵

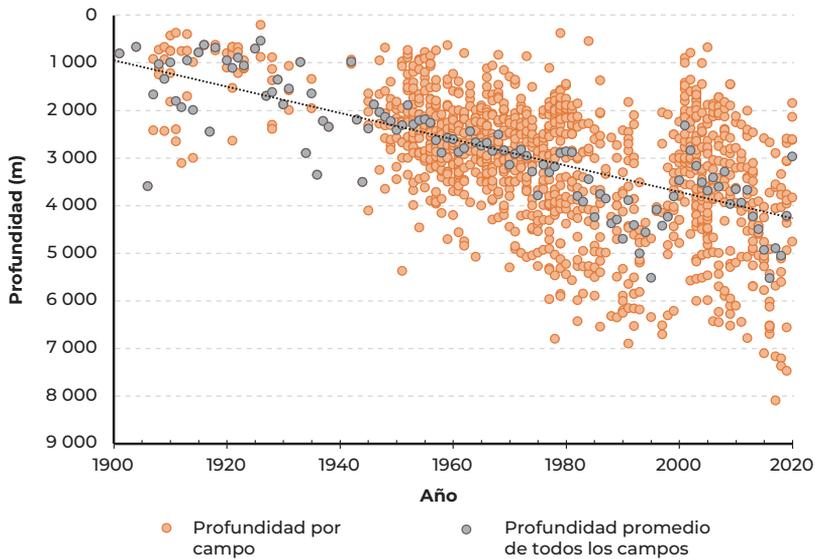
⁵ El petróleo se clasifica en grados API (American Petroleum Institute), una escala que mide la densidad del crudo en comparación con la del agua. De acuerdo con ello, >10 indica que el petróleo tiene una menor densidad que el agua.

Figura 4. Número (escala a la derecha) y volumen de petróleo (escala a la izquierda) de los campos petroleros descubiertos en México (1900-2015)



Fuente: Elaboración propia con información de Pemex (2021) y Comisión Nacional de Hidrocarburos.

Figura 5. Profundidad de los campos petroleros en México en relación con su fecha de descubrimiento

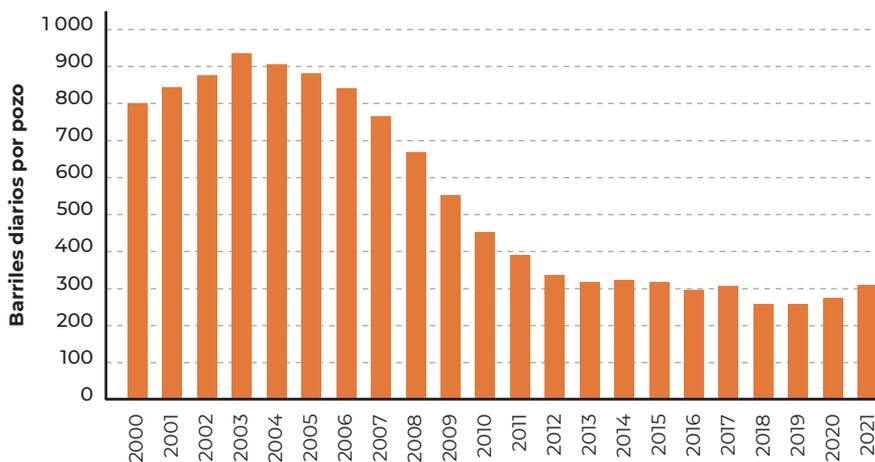


Fuente: Elaboración propia con información de Pemex (2021) y Comisión Nacional de Hidrocarburos.

Al mismo tiempo, se observa que la productividad promedio por pozo ha disminuido de manera significativa desde el pico en 2004, llegando a ser poco menos de la tercera parte (figura 6).

Estos patrones generales se confirman cuando se examinan los cambios en la estructura de la plataforma de producción petrolera de México correspondientes a las últimas cuatro décadas (véase “Anexos”, figura 7). A nivel mundial, un aspecto recurrente se refiere a que el tamaño de los yacimientos petroleros de una región sigue una ley fractal o multiescalar, lo que implica que pocos yacimientos supergigantes y gigantes controlan la variación de la producción de un país. En el caso de México, la bonanza petrolera se asoció al descubrimiento y producción de los campos supergigantes de Cantarell –Akal–, un yacimiento geológicamente único que llegó a ser el segundo a nivel mundial en cuanto a producción, después del de campo Gawhar, en Arabia Saudita (véase “Anexos”, figura 7).

Figura 6. Producción promedio diaria de los pozos petroleros en México



Fuente: Elaboración propia con información de Pemex (2021) y Comisión Nacional de Hidrocarburos.

Entre 1982 y 1996 Cantarell, Abkatún y Ku sostuvieron casi la mitad de la producción nacional (véase “Anexos”, figura 7). Con la recuperación secundaria mediante inyección de nitrógeno, que empezó en 2000, Cantarell consiguió duplicar su producción, y en su pico de 2003-2004 llegó a producir más de dos MMbd –60% de la producción nacional– con sólo 200 pozos. Debido a su dominancia en la plataforma de producción, el pico de Cantarell en 2004 constituyó también el pico de la producción de petróleo nacional. Entre 2010 y 2014, el declive de Cantarell se mitigó llevando a su máximo los tres campos gigantes de Ku, Maloob y Zaap (KMZ) (véase “Anexos”, figura 7), que sin embargo llegaron a producir en su conjunto sólo 40% de Cantarell, y empezaron su declive a mediados de la década de 2010. Los demás campos descubiertos tienen un tamaño y una producción máxima mucho menor que Cantarell y los tres campos gigantes mencionados.

En la actualidad Cantarell, KMZ y los siguientes seis campos de mayor producción –en total 10– soportan 62% de la producción nacional con 356 pozos, pero el 38% restante lo cubren 200 campos con 3 899 pozos (véase “Anexos”, figura 7). En otras palabras, 62% de la producción se sostiene con 356 pozos, cada uno de los cuales produce en promedio 3 033 bd mientras que el resto proviene de 3 899 pozos que producen alrededor de 160 bd. Una comparación de la producción actual con la de Cantarell en su auge es aún más impresionante: en 2004, los 200 pozos de Cantarell producían más que los 4 255 pozos de la actualidad –2.0 MMbd contra 1.7 MMbd–; es decir, los pozos de Cantarell producían en promedio 25 veces lo que producen los actuales. De hecho, los últimos campos descubiertos son de un tamaño muy inferior al de Cantarell y KMZ. De acuerdo con la base de datos de la CNH (s.f.b), las reservas 2P de los campos Ixachi y Quesqui suman 740 millones de barriles, equivalentes a 4% de las reservas que tenía Cantarell y a 11% de las de KMZ. Hasta el primer semestre de 2022, Ixachi y Quesqui, junto con los otros 31 nuevos campos que está desarrollando Pemex,

produjeron en su conjunto 352 Mbd (Pemex 2022), apenas suficientes para compensar la caída de producción de KMZ, que desde final de 2018 tiene un declive de casi 9% anual.

DISMINUCIÓN DE LAS RESERVAS E INCREMENTO DEL COSTO DE EXTRACCIÓN

Hasta el primero de enero de 2021 las reservas probadas de petróleo en México correspondían a 6 120 MMbd (CNH 2021), lo que equivale a 9.7 años de la producción de 2020. Si tomamos en cuenta las reservas 3P (probadas, probables y posibles),⁶ serían 27 años. Sumando las reservas probadas a la producción histórica (60 848 MMbd), podemos observar que hemos consumido ya 90% del petróleo que tenemos la seguridad de poder extraer. Incluso si consideramos las reservas 3P, vemos que hemos consumido 78% del petróleo nacional.

La situación del gas natural es similar, ya que una buena parte de la producción nacional es gas asociado al petróleo. El pico de la producción se tocó en 2009 con la caída de la producción de gas asociado de Cantarell, y ha disminuido 35% desde entonces. Las reservas probadas de gas natural corresponden a 9 981 miles de millones de pies cúbicos (MMMpc) (CNH 2021), lo que corresponde a seis años de la producción de 2020. Si consideramos las reservas 3P, serían 17 años. El caso del gas es particularmente grave debido a la alta dependencia de las importaciones.

Se debe considerar también que, entre 2017 y 2019, la tasa de restitución⁷ de las reservas probadas osciló entre 2.8% y 36.6% (CNH 2021), es decir, se encontró menos de un tercio del petróleo y del gas del que

⁶ Las reservas 3P son la suma de las probadas, probables y posibles. Las dos últimas son las que tienen una probabilidad de 50% y 10%, respectivamente, de poder extraerse en las condiciones técnicas y económicas presentes.

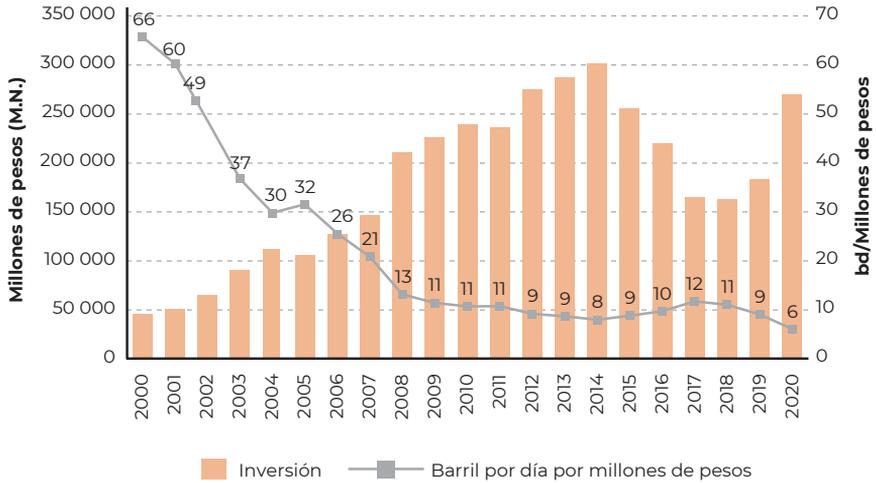
⁷ La tasa de restitución es el porcentaje del volumen de hidrocarburos extraído que se repone por la incorporación de descubrimientos, delimitación, desarrollo y revisiones a reservas.

se consumió. La situación mejoró en 2020 y 2021, pues en esos años se logró incorporar a las reservas, en promedio, el equivalente del petróleo y gas que se extrajo. Sin embargo, estos volúmenes no indican el costo energético y económico que conlleva su extracción, el cual incrementa cada año.

Con la política de rescate de Pemex, la actual administración está tratando de obtener una mayor producción de hidrocarburos, incrementando el presupuesto para la exploración y producción. No obstante, aun con los significativos incrementos del presupuesto en 2019 y 2020, la inversión en este rubro fue inferior a la que se hizo entre 2012 y 2014 (véase figura 8). Desde el inicio de este siglo el presupuesto de exploración de Pemex ha crecido de manera constante hasta 2014, cuando llegó a ser casi el doble; a pesar de ello la producción cayó desde 3.4 MMbd en 2004 a 2.5 MMbd en 2014. Esta tendencia al incremento de los costos en la exploración y producción es común a toda la industria petrolera mundial, y se debe a que desde 2005 se ha alcanzado el pico del petróleo convencional y, con ello, el fin del petróleo barato. En el caso de México, la dependencia del yacimiento supergigante y geológicamente único de Cantarell ha exacerbado esta tendencia. Como se puede apreciar en la figura 8, el rendimiento de la inversión (barriles diarios producidos/pesos invertidos) cayó de manera drástica: en 2000 por cada millón de pesos invertido al año se producían 66 barriles diarios, mientras que en 2020 la misma inversión sólo produjo seis.

De acuerdo con los informes de Pemex a la Comisión de Bolsa y Valores de Estados Unidos (U.S. Securities and Exchange Commission), el costo de producción se ha triplicado en las últimas dos décadas, pasando de 4.3 dólares por barril en 2000 a 13.7 en 2021. Sin embargo, esto sólo incluye los gastos de capital (CapEx). De acuerdo con la agencia calificadora Fitch Ratings, a estos 13.7 dólares por barril hay que sumarle 11.6 de gastos operativos (OpEx) para la producción de crudo y 10.8 para los gastos de ventas, generales y administrativos de Pemex (SG&A).

Figura 8. Inversión en Pemex para exploración y producción (escala a la izquierda) y rendimiento en barriles diarios extraídos por cada millón de pesos invertido al año (escala a la derecha)



Fuente: Elaboración propia con datos de la Secretaría de Energía (Sener).

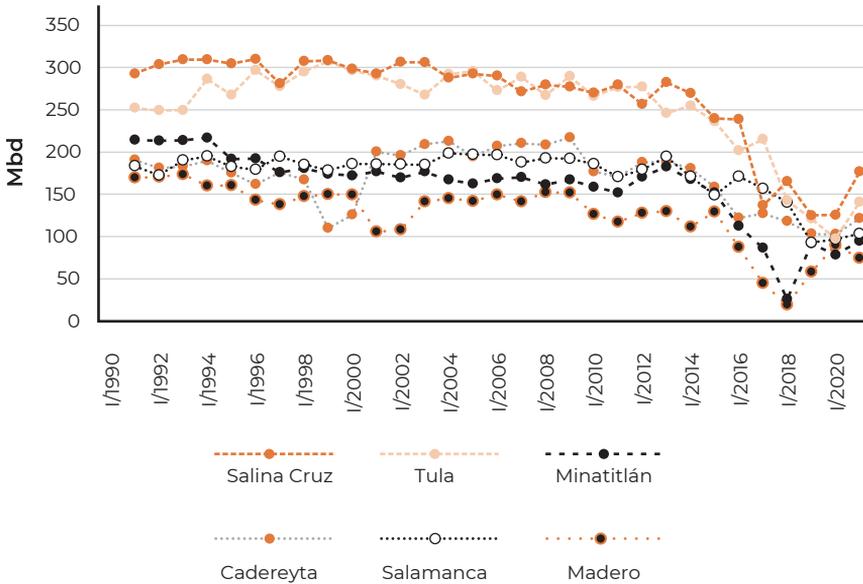
Si, además, se consideran los intereses de la deuda, hay que sumar 9.7 dólares por barril. Por tanto, para Pemex el costo completo antes de impuestos es de 45.1 dólares por barril. Si ése fuera el caso, la producción de Pemex en 2020 no habría sido rentable, pues el precio promedio anual de la mezcla mexicana de exportación fue de 35.8 dólares por barril. Este supuesto se confirma de manera indirecta si tomamos en cuenta que los ingresos obtenidos por la venta de petróleo en 2020 sumaron cerca de 300 000 millones de pesos, pero el presupuesto ordinario aprobado a Pemex fue de 529 000 millones de pesos.

REFINACIÓN Y CONSUMO DE PETROLÍFEROS: ¿HACIA LA SOBERANÍA ENERGÉTICA?

Por falta de inversión y mantenimiento, el sector de la refinación ha quedado muy rezagado durante las últimas tres décadas. Las últimas tres

refinerías mexicanas se construyeron a finales de la década de 1970 con la tecnología disponible en esa época, y fueron calibradas para refinar un crudo más ligero del que se extrae ahora. El proceso de crudo en las refinerías se mantuvo más o menos constante hasta 2014 –cuando empezó a declinar– y llegó a la mitad para el periodo 2018-2020 (figura 9).

Figura 9. Petróleo crudo procesado en las refinerías mexicanas desde 1990



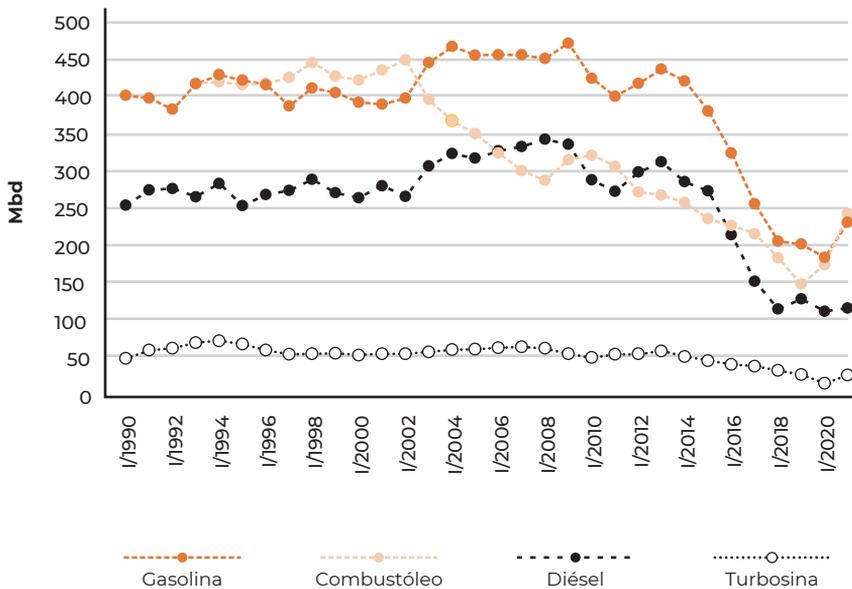
Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética (SIE) de la Sener.

Esta disminución afectó principalmente a la producción de gasolina y diésel, pues su nivel llegó a la mitad en tan sólo cuatro años (figura 10). Si bien la baja podría atribuirse a factores técnicos, llama la atención que haya ocurrido después de la implementación de la Reforma energética de 2013, con la que se abrió la comercialización de la gasolina a compañías privadas.

Debido al incremento del parque vehicular desde la década de 1990, la producción nacional de gasolina y diésel empezó a ser insuficiente

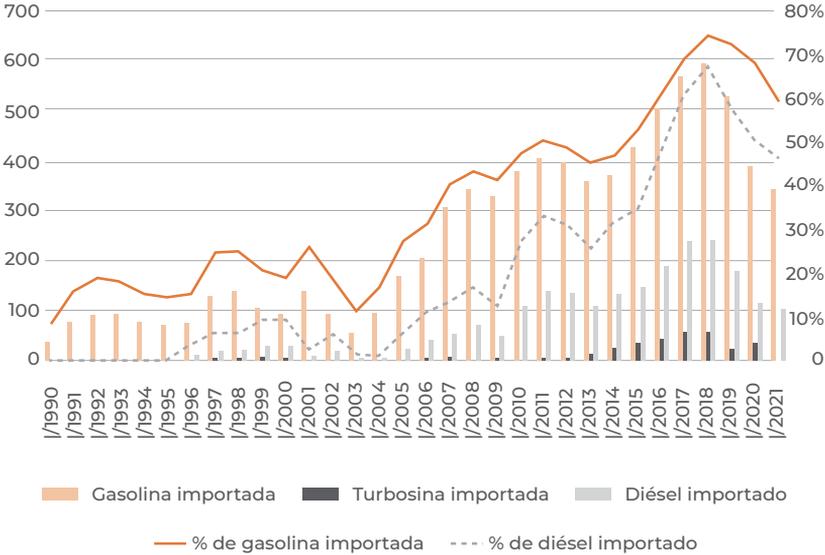
para suplir el consumo interno, por lo que inició la importación de estos productos refinados en cantidades moderadas (figura 11). Sin embargo, a partir de 2004 la importación creció de forma acelerada, para llegar a 74% del consumo de gasolina y 67% de diésel en 2018. En los tres años subsecuentes la importación ha bajado, en buena medida por la reducción del consumo inducida por la pandemia y por la disminución del crecimiento económico. Para 2021 la dependencia de la importación se había reducido al 59% en gasolina y al 46% en diésel (figura 11), por las razones mencionadas, así como por el incipiente repunte en la producción de la refinación nacional (figura 10).

Figura 10. Producción de productos refinados en las refinerías mexicanas desde 1990



Fuente: Elaboración propia con datos del SIE de la Sener.

Figura 11. Importación de productos refinados en miles de barriles diarios (escala a la izquierda) y porcentaje del consumo total (escala a la derecha)



Fuente: Elaboración propia con datos del SIE de la Sener.

El objetivo de la política energética de la actual administración en materia de refinación es recuperar la soberanía energética dejando de importar gasolina y diésel del extranjero. Para este fin se está construyendo la refinería de Dos Bocas, se ha adquirido la totalidad de la refinería de Deer Park en Texas, y se están modernizando las seis refinerías existentes en México. Este objetivo es estratégico para el país. No obstante, es improbable que se pueda alcanzar actuando sólo sobre la oferta por las razones que se explican a continuación.

En 2021 se alcanzaron a refinar en promedio 233 000 bd de gasolina y 116 000 bd de diésel. La refinería Deer Park produce cerca de 110 000 bd de gasolina y 90 000 bd de diésel. La nueva refinería de Dos Bocas, una vez terminada, se espera que pueda producir cerca de 170 000 bd de gasolina

y 120 000 bd de diésel. De llevarse a cabo lo anterior se llegaría a una producción total de 510 000 bd de gasolina y 326 000 bd de diésel. En la década previa a la pandemia de Covid-19, el consumo interno promedio fue de 800 000 barriles diarios de gasolina y 380 000 bd de diésel. Con los actuales niveles de consumo harían falta todavía 290 000 bd de gasolina y 54 000 bd de diésel. Para ello sería necesario multiplicar por 2.2 veces la cantidad de gasolina que producen las seis refinerías actuales, lo que es teóricamente posible, pero enfrenta dos problemas: 1) el exceso de producción de combustóleo, y 2) la falta de extracción de petróleo. En 2021, con el petróleo procesado por las seis refinerías nacionales se producía el 33% de gasolina, el 17% de diésel y el 34% de combustóleo del consumo interno. El combustóleo es un producto altamente contaminante cuando se usa como combustible, por lo que tiene un mercado cada vez menor. De hecho, se emplea de manera casi exclusiva en las centrales termoeléctricas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), si bien una parte podría reprocesarse para producir más diésel y gasolina en la planta coquizadora que se está construyendo en la refinería de Tula.

El segundo problema es más serio. La refinería de Dos Bocas, cuando esté terminada, procesará 340 000 bd de petróleo. La de Deer Park también procesa 340 000 bd, pero sólo 36% es crudo maya mexicano y el resto es crudo que se seguirá comprando a la compañía Shell. Para que sea posible producir la cantidad de gasolina que se consumía antes de la pandemia, las seis refinerías restantes necesitarían procesar 1.56 millones de barriles diarios (MMbd) de petróleo. Si sumamos el petróleo que iría a Dos Bocas y el de Deer Park –considerando 36%–, obtenemos un total de aproximadamente 2 MMbd de petróleo. En este sentido, no es coincidencia que el presidente haya mencionado en varias ocasiones que no se extraerán más de 2 MMbd. No obstante, a pesar de un gran esfuerzo presupuestario, la producción de Pemex en los últimos tres años ha sido de alrededor de 1.7 MMbd, incumpliendo las metas de producción establecidas para 2020 y 2021.

Como se ha mencionado ya en este capítulo, el incremento de costos y el declive de los grandes yacimientos hacen muy improbable que se pueda alcanzar una producción de 2 MMbd. La única forma de alcanzar la soberanía energética de manera sostenible pasa por reducir el consumo de gasolina, es decir, desestimulando el uso del coche particular e impulsando una estrategia integral, como la presentada en la Sección 3 de este libro.

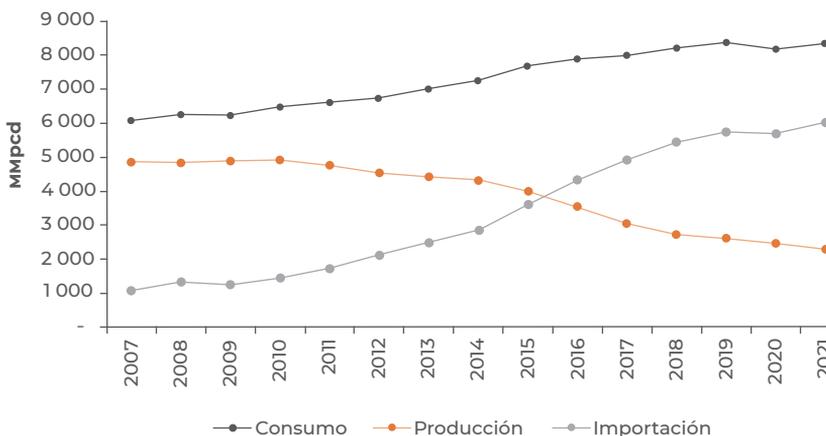
EL DÉFICIT CRÓNICO DE GAS NATURAL COMO OBSTÁCULO PARA LA SOBERANÍA ENERGÉTICA

La política de soberanía energética actual se enfrenta a un problema mucho más serio en materia de gas natural. Desde el principio de este siglo se decidió impulsar la generación eléctrica nacional mediante centrales de ciclo combinado que usan gas natural como combustible. De esta forma, la capacidad instalada se duplicó en menos de una década, y aumentó la electricidad producida con gas mientras se reducía la generación con combustóleo y carbón. Esta decisión se justificó con criterios ambientales y, sobre todo, económicos, ya que desde 2005 había empezado la producción de gas *shale* por medio de *fracking* en Estados Unidos, cuya sobreproducción provocó una baja significativa del precio. No obstante, la situación llevó a una creciente dependencia de las importaciones. Hasta 2010 la importación de gas natural se mantuvo en alrededor de 1 000 millones de pies cúbicos diarios (MMpcd) (figura 12). Sin embargo, ese año la producción nacional de gas natural empezó a declinar, al tiempo que el consumo se incrementó a un ritmo mayor que en la década anterior (figura 12). En consecuencia, las importaciones del gas se dispararon de tal manera que, para 2021, acumularon un incremento de cerca del 600% respecto a 2010 (figura 12).

En octubre de 2021 la importación de gas natural llegó a 6 017 MMpcd, lo que representa 72% del consumo nacional, mientras que la generación eléctrica mediante este insumo requirió 3 399 MMpcd y

representó 62% de toda la generación anual. Dado que 85% del gas que produce Pemex se utiliza para sus propios procesos de producción, refinación y petroquímica, más de la mitad (56%) de la electricidad que se genera en el país es producto de la importación de gas natural de Estados Unidos, lo que vulnera de forma significativa la soberanía energética. Desafortunadamente, este aspecto crucial no se está atendiendo, ya que el Plan de negocios 2022-2026 de la CFE (2021) prevé continuar con la expansión de la generación con gas natural a través de la construcción de 11 nuevas centrales de ciclo combinado y dos de turbogás. Además, la ampliación de la refinación nacional requerirá cantidades crecientes de gas natural. Más allá de la soberanía energética, la viabilidad a mediano plazo de la importación de gas natural estadounidense es cuestionable. Las estimaciones técnicas independientes indican que la producción de gas *shale* de ese país puede empezar a declinar pronto (Hughes 2021), y para Estados Unidos resulta cada vez más provechosa y geopolíticamente estratégica la exportación de gas líquido por barco hacia Europa y Asia.

Figura 12. Consumo, producción e importación de gas natural (2007-2021)



Fuente: Elaboración propia con datos del SIE de la Sener.

¿CUÁL ES EL FUTURO PARA EL SECTOR HIDROCARBUROS?

La civilización moderna se construyó sobre el petróleo, una fuente de energía versátil y de alta densidad que hasta el principio de este siglo era barata y abundante. Sin embargo, el petróleo fácil y barato se ha agotado, y los costos de exploración y explotación han crecido de manera constante desde entonces (Ferrari 2020). Los altos precios de venta del crudo que se registraron en 2008 y luego entre 2010 y 2014 sacudieron la economía global, acostumbrada a un precio del crudo que no rebasaba el 5% del producto interno bruto (PIB) (Hamilton 2008). El petróleo que queda en el planeta es caro. Los precios recientes –de alrededor de 80 dólares por barril– son demasiado altos para una economía ya probada por la pandemia, y demasiado bajos para que la industria petrolera invierta en proyectos de largo plazo (Ferrari 2020). La volatilidad de los precios del petróleo en la última década –que ha mostrado variaciones de hasta 350%– muestra con claridad este desbalance. La industria petrolera internacional está en crisis, y ha decidido disminuir sus inversiones en la exploración y explotación de nuevos yacimientos a menos de la mitad de lo que se invirtió hace una década.

México no es ajeno a esta situación, a la que se añade la problemática de la gestión deficiente y corrupta de las administraciones anteriores. Ésta ha llevado a Pemex a ser la empresa petrolera más endeudada del mundo. El petróleo sigue siendo un recurso estratégico, pero su costo y el impacto ambiental de su uso como energético son cada vez más insostenibles. El diagnóstico que se ha presentado en este capítulo indica que es prácticamente imposible aumentar de manera sostenida la producción actual. Por consiguiente, es imperativo hacerse dos preguntas. ¿Le conviene al país en el mediano y largo plazo una inversión masiva para la exploración y extracción de hidrocarburos? Y, sobre todo, ¿cómo podemos emplear de manera estratégica lo que queda de este preciado recurso, que no es sólo una fuente de energía, sino también materia prima de la industria de muchos materiales y un insumo en la producción de alimentos?

La soberanía energética es un objetivo estratégico para el país. Sin embargo, es imposible alcanzarla actuando sólo sobre la base de la oferta. En el caso de los productos refinados, una forma viable y sostenible de alcanzar una independencia en cuanto a la importación de gasolina es reducir el uso del automóvil particular y favorecer el transporte público, preferentemente electrificado (véase capítulo 3.2). La situación del gas natural es aún más preocupante, ya que de la importación de este combustible depende más de la mitad de nuestra electricidad; también en este rubro el objetivo de la soberanía energética resulta inalcanzable por el lado de la oferta, por lo que es indispensable repensar el uso de la electricidad para disminuir su consumo. El sector de más consumo de electricidad es la industria, en particular la maquiladora de exportación, cuya demanda ha incrementado de forma notable desde la firma del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN). En este contexto, ¿vale la pena importar gas natural de Estados Unidos para reexportar productos a ese país? Es necesario reflexionar sobre la viabilidad de esta industria a la vista de una demanda menguante de productos industriales, la falibilidad de las cadenas de suministro de microchips y la incertidumbre sobre el abasto de gas natural importado.

REFERENCIAS

- Acuña, A. (1991). Instalaciones Marinas para la Explotación de Hidrocarburos [Trabajo para ingresar como miembro a la Academia de Ingeniería]. México.
- Bardi, U. (2009). Peak oil: The four stages of a new idea. *Energy*, 34(3), 323-326. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.08.015>
- British Petroleum (BP) (2021). *World Energy Outlook*. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html>
- Comisión Federal de Electricidad (CFE) (2021). Plan de Negocios 2022-2026. <https://www.cfe.mx/finanzas/Documents/Plan%20de%20Negocios%202022-2026%20V48%20PUBLICA.pdf>

- Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH) (2021). *Proceso de cuantificación y certificación de reservas de hidrocarburos al 1 de enero de 2021*. Dirección General de Reservas. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/631694/2021.04.20._II.1_Presentacion_OdG_Reservas_al_1-ene-2021.pdf
- _____ (s.f.a). Tablero de producción de petróleo y gas. <https://produccion.hidrocarburos.gob.mx/>
- _____ (s.f.b). Reservas de hidrocarburos. <https://reservas.hidrocarburos.gob.mx/>
- _____ (s.f.c). Mapa de hidrocarburos. <https://mapa.hidrocarburos.gob.mx>
- Diario Oficial de la Federación (DOF)* (1938a). Circular número 513-6-43 que fija las cuotas para el cobro de impuestos sobre producción de petróleo durante el presente mes. México, 18 de marzo de 1938.
- _____ (1938b). Decreto que expropia a favor del patrimonio de la Nación los bienes muebles e inmuebles pertenecientes a las compañías petroleras que se negaron a acatar el laudo del 18 de diciembre de 1937 del Grupo Número 7 de la Junta Federal de Conciliación y Arbitraje. México, 19 de marzo de 1938.
- _____ (1938c). Decreto que crea la institución “Petróleos Mexicanos”. México, 20 de julio de 1938.
- Ferrari, L. (2020). Pico del petróleo y fin del crecimiento: una mirada retrospectiva. *América Latina en Movimiento*, 54(550), 15-18.
- Hall, C.A., J.G. Lambert y S.B. Balogh (2014). EROI of different fuels and the implications for society. *Energy policy*, 64, 141-152. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>
- Hamilton, J.D. (2008). Oil and the macroeconomy. En: M. Vernengo, E. Pérez Caldentey y B. J. Roser Jr (Eds.), *The New Palgrave Dictionary of Economics*. Palgrave Macmillan.
- Hubbert, M. K. (1956). Nuclear Energy and the Fossil Fuels. En: *Drilling and Production Practice 1956*. Dallas: American Petroleum Institute.
- Hughes, D. (2021). *Shale Reality Check 2021: Drilling Into the U.S. Government's Optimistic Forecasts for Shale Gas & Tight Oil Production Through 2050*. Estados Unidos: Post Carbon Institute. <https://www.postcarbon.org/publications/shale-reality-check-2021/>

- Lajous, A. (2014). *La industria petrolera mexicana: estrategias, gobierno y reformas*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Petróleos Mexicanos (Pemex) (2021). *Resultados al tercer trimestre de 2021*. Reporte no dictaminado. <https://www.pemex.com/ri/finanzas/Reporte%20de%20Resultados%20no%20Dictaminados/Reporte%203T21.pdf>
- Society of Petroleum Engineers (SPE-PRMS) (2007). Petroleum Resources Management System. Society of Petroleum Evaluation Engineers (SPEE), World Petroleum Council (WPC), American Association of Petroleum Geologists (AAPG) http://www.spe.org/industry/docs/Petroleum_Resources_Management_System_2007.pdf

1.3 El declive de la tasa de retorno energético del petróleo y el gas en México

José Rafael Flores Hernández
Luca Ferrari

INTRODUCCIÓN

Cuando en México se habla de energía necesariamente se está hablando de petróleo y gas natural debido a la alta dependencia que nuestro país guarda con respecto a dichos recursos energéticos (véase capítulo 1.1). Los combustibles fósiles mueven, calientan, enfrían, iluminan, suben, bajan y asisten en sus actividades diarias a la población mexicana. Esta energía fósil es la encargada de accionar la economía nacional, ya que inescapablemente, en mayor o menor medida, la creación y el transporte de cualquier bien o servicio requiere del consumo de energía. En este contexto, no es exagerado decir que si los mexicanos fuimos alguna vez los hijos del maíz, hoy somos hijos del gas y del petróleo.

Sin embargo, ahora enfrentamos una serie de cuestiones que ponen en duda la viabilidad de un modelo de desarrollo económico y social basado en el uso de combustibles fósiles. En primer lugar, debido a la naturaleza finita y no renovable de este tipo de recursos, ninguna sociedad que tenga como base energética el petróleo y el gas puede funcionar por tiempo indefinido. En segundo lugar, cualquier producción de petróleo y

gas –sin importar si proviene de un pozo, de un campo, de un país o de un grupo de países– natural finalmente alcanzará un punto máximo de producción para después declinar. Este aspecto tiene consecuencias importantes, ya que el crecimiento económico siempre ha venido acompañado por un incremento en el uso de energía, lo cual tiene como corolario que, si la producción de petróleo y gas no puede seguir aumentando, el crecimiento basado en ellos tampoco. Por otro lado, los límites en cuanto al uso que se puede hacer de los recursos fósiles radican también en el impacto que éstos provocan sobre el medio ambiente y, de manera especial, en su contribución dominante en el cambio climático que estamos experimentando. Sumado a los puntos anteriores, otro aspecto fundamental –casi siempre ignorado dentro de la discusión sobre cualquier recurso energético– se refiere al costo energético que implica obtener petróleo y gas. Obtener energía cuesta energía. Antes de llenar con gasolina el tanque de nuestro automóvil o de quemar gas en la cocina para calentar nuestros alimentos, hay que encontrar el petróleo y el gas, construir la infraestructura para poder extraerlos, refinarlos y transportar los productos finales al punto de consumo. Cada uno de estos procesos requiere una inversión de energía que se realiza de forma directa o indirecta y, al igual que una inversión financiera, dicha inversión sólo tiene sentido si es posible obtener un beneficio. Esto último quiere decir que la única razón para explotar un yacimiento de petróleo o gas es porque la energía que podemos obtener del mismo es mayor que la que debemos invertir en el proceso.

El costo energético de la energía es un factor crítico para evaluar la viabilidad de cualquier fuente de energía. Sólo las energías con altos retornos son capaces de crear y sostener sociedades prósperas y complejas. La energía que usamos para explotar nuestros recursos energéticos es energía que deja de estar disponible para satisfacer otras necesidades. La cuestión más fundamental –y más olvidada en relación

con la explotación de los combustibles fósiles— no se refiere a cuántos hidrocarburos quedan en el subsuelo o a qué ritmo se pueden extraer, sino cuántos de ellos se pueden extraer con un superávit energético. La energía que no dedicamos a explotar el petróleo y el gas es la que tenemos disponible para mantener operando nuestras economías y la que, de momento, podemos y tenemos que emplear para mitigar, en lo posible, los impactos ambientales asociados a su uso y, por último, para construir y desarrollar nuevas fuentes energéticas que nos permitan superar la era de la energía fósil.

Los tiempos en que vivimos son como ningún otro en lo que se refiere al costo energético de explotar petróleo y gas. Esto se debe a que los recursos petroleros que hemos aprovechado durante mucho tiempo constituían principalmente el llamado *petróleo fácil*, conformado por yacimientos gigantes y someros en tierra y agua, con gas y aceite alojado en formaciones geológicas donde la ocurrencia de condiciones óptimas de porosidad, permeabilidad, viscosidad y presión, entre otras, hacían *fácil* su aprovechamiento. Hoy, si se quiere seguir utilizando petróleo y gas como fuentes de energía, debemos crear de manera artificial condiciones adecuadas que nos permitan explotarlos —por ejemplo, fracturando rocas para crear en ellas una comunicación hidráulica que no existe o aplicando procesos térmicos en yacimientos con aceites extra-pesados para permitir su flujo hacia la superficie—, lo cual implica inversiones energéticas importantes. En este capítulo se introducirá el concepto del *indicador EROI* (Energy Return on Investment) o tasa de retorno energético y se explicará cómo su estudio y utilización nos permite afirmar que la era de la energía fósil, barata y abundante, ha llegado a su fin. Del mismo modo, se expondrá una estimación del EROI para el sector de hidrocarburos en México, así como una breve discusión sobre su posible evolución en el futuro y las posibles implicaciones que esto puede traer para la economía nacional.

LA ENERGÍA NETA Y LA TASA DE RETORNO ENERGÉTICO

ENERGÍA NETA

Como se dijo líneas arriba, para obtener energía primero debemos invertir energía. A la energía que queda, una vez restados todos los costos energéticos de su obtención, tanto directos como indirectos, se le conoce como *energía neta* (Cottrell 2009; Odum 1973). Es esta energía la que, como sociedad, podemos dedicar a la producción de alimentos, a los servicios de salud, transporte de bienes y personas, educación, manufactura, iluminación, construcción de infraestructura, etc. En términos prácticos, todo en la actividad humana depende de la disponibilidad de energía neta. Matemáticamente podemos definirla como sigue:

$$E_{neta} = E_{obtenida} - E_{invertida} \quad (1.3.1)$$

TASA DE RETORNO ENERGÉTICO

El EROI –o tasa de retorno energético (TRE), como comúnmente se ha adoptado en español– es un concepto desarrollado en la década de 1970¹ por Charles Hall (Hall y Kent 2018) con base en la idea de energía neta. Este indicador se refiere al cociente que existe entre la energía que se obtiene o recupera de una fuente de energía y la que se invierte en el proceso de su obtención. El indicador EROI describe, por tanto, la cantidad de energía que se gana en algún proceso de obtención energética,

¹ El término EROI apareció por primera vez en un trabajo de 1979 y, aunque el concepto fue bastante popular en aquel tiempo, la caída de los precios del petróleo durante la segunda mitad de los años 80 disminuyó el interés académico en torno a él. A partir de 2005, con el incremento continuo de los precios del petróleo, se reanudó el interés por el concepto EROI y con ello la publicación de gran cantidad de artículos académicos al respecto (Hall y Kent 2018). En 2011 la revista suiza de libre acceso *Sustainability* publicó un número completo sobre el tema (Hall y Hansen 2011).

y no debe ser confundido con el concepto de *eficiencia energética*, que se refiere a un proceso de transformación de una forma de energía en otra. Matemáticamente:

$$EROI = \frac{E_{obtenida}}{E_{invertida}} \quad (1.3.2)$$

En dicho cociente, tanto el numerador como el denominador se expresan en las mismas unidades de energía –por ejemplo: calorías, joules, barriles equivalentes de petróleo, etc.–, por lo que se trata de un valor adimensional. Por mencionar un ejemplo, un valor de EROI de 25 debe interpretarse como una ganancia de 25 unidades de energía por cada unidad invertida en el proceso de su obtención. De acuerdo con la definición matemática del indicador EROI, cualquier fuente que provea un valor mayor a la unidad ($EROI > 1$) entrega más energía de la que se invierte en su explotación; por el contrario, si el EROI es menor o igual a uno, la inversión energética es mayor o igual a la ganancia.

Aunque la formulación teórica del EROI es simple e intuitiva, la aplicación práctica del concepto enfrenta varias dificultades debido a que no hay una manera única de construir el indicador. Hay al menos tres dimensiones sobre las que es posible trabajar:² 1) las entradas al sistema –¿qué se debe considerar como consumo de energía?–; 2) las salidas del sistema –¿en dónde debe medirse la obtención de energía, en el punto de extracción o de refinación?–, y 3) el tiempo –¿deben considerarse flujos anuales o cantidades acumuladas a lo largo del ciclo de vida de un recurso energético? Debido a lo anterior, aunque dos autores hayan medido el EROI de una fuente de energía, sus resultados pueden no ser iguales e incluso pueden no ser comparables como consecuencia de las metodologías seguidas en cada caso. El hecho de que haya distintas maneras de

² Sobre la construcción del EROI, véanse Brandt y Dale (2011), Mulder y Hagens (2008), King et al. (2015) y Murphy et al. (2011).

medir el EROI de una fuente de energía ha dado lugar a fuertes debates académicos alrededor de fuentes como los biocombustibles y la energía eléctrica generada a partir de sistemas fotovoltaicos, pues para algunos son una clara fuente de energía neta y para otros son sumideros de energía.³ Como solución a tales discrepancias, algunos autores han propuesto la estandarización del indicador.⁴ Sin embargo, lo que se debe tener presente es que, aunque medir el EROI de una fuente de energía no es una tarea sencilla, lo importante es que la disminución en este indicador tiene implicaciones demasiado importantes para las sociedades y las economías humanas debido a los efectos que esto puede traer sobre la disponibilidad de energía neta.

LA RELACIÓN ENTRE LA TASA DE RETORNO ENERGÉTICO Y LA ENERGÍA NETA

Por su formulación, el EROI no nos dice nada respecto de la cantidad de energía que se extrae, ni del tamaño de la fuente que se explota o de los impactos ambientales que su aprovechamiento puede tener, a no ser que los costos energéticos de remediar dichos impactos se incluyan en el cálculo. Lo que el EROI sí puede determinar es qué fracción de la energía total obtenida al explotar un recurso energético representa energía neta. Matemáticamente, esto se aprecia al combinar las ecuaciones que definen la energía neta (1.3.1) y el EROI (1.3.2) para obtener:

$$E_{neta} = E_{obtenida} \left(1 - \frac{1}{EROI} \right) \quad (1.3.3)$$

A partir de la ecuación anterior es posible expresar la energía neta como una fracción de la energía total obtenida en función del EROI. De

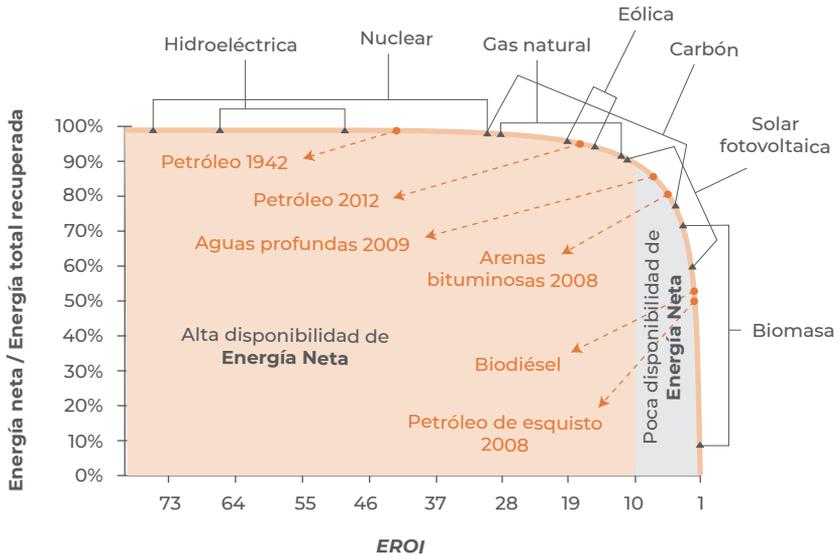
³ Para un resumen sobre las críticas que ha recibido el indicador y los debates que se han generado a su alrededor, véase el trabajo de Hall (2017).

⁴ Sobre la estandarización del EROI, véanse Brandt y Dale (2011), King *et al.* (2015), Zhang y Colosi (2013), Mulder y Hagens (2008), Brandt *et al.* (2015) y Murphy *et al.* (2011).

esta manera podemos observar cómo los cambios en el EROI de los recursos energéticos que se explotan influyen en la disponibilidad de energía para actividades sociales y económicas distintas a las de la obtención de energía. En la figura 1 se ha ilustrado esta situación. La forma particular que adquiere la gráfica se ha popularizado dentro de la literatura académica y no académica como “The Net Energy Cliff” (Hall 2017) debido a la caída abrupta que se tiene en la disponibilidad de energía neta cuando el EROI se encuentra cerca o por debajo de valores de 10. Lejos de este umbral crítico, el costo energético de la energía no representa un verdadero problema para las sociedades, sin embargo, una vez que se entra en esta región la disponibilidad de energía neta decrece de forma no lineal como consecuencia de los costos crecientes.

En la figura 1 también hemos incluido algunas estimaciones publicadas para el EROI de distintas fuentes de energía. Las indicadas en la parte superior se refieren a los procesos de generación eléctrica, mientras que en la parte interna se ilustran los valores asociados a la obtención de petróleo y biodiésel. Debido a las distintas suposiciones que han hecho los autores que midieron estos valores, no es posible realizar una comparación estricta entre ellos. Sin embargo, estos datos nos sirven como una guía aproximada de la relación entre las diferentes fuentes. Por ejemplo, la mayor EROI de los combustibles fósiles, la nuclear y la hidroeléctrica se relaciona con la característica de que son fuentes controlables, por lo que pueden funcionar más tiempo, a diferencia de lo que ocurre con fuentes como la eólica y la solar, que sólo pueden generar electricidad una fracción de tiempo –cuando hay suficiente velocidad del viento o irradiación solar. Además, estas fuentes renovables son muy diluidas comparadas con los combustibles fósiles y la nuclear, razón por la cual necesitan muchas más materias primas para construir la infraestructura de aprovechamiento –aerogeneradores, paneles solares, etc. A partir de esta gráfica se puede observar que en la actualidad nuestras fuentes de energía se encuentran dentro o en los alrededores de las zonas críticas en lo que se refiere a la disponibilidad de energía neta. Vivimos en una era de energía costosa.

Figura 1. Efectos de la disminución en el EROI sobre la disponibilidad de energía neta (“The Net Energy Cliff”) y EROI para algunas fuentes de energía⁵



Fuente: Elaboración propia con base en las distintas estimaciones del EROI de las fuentes citadas en la nota.

LA TASA DE RETORNO ENERGÉTICO DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES

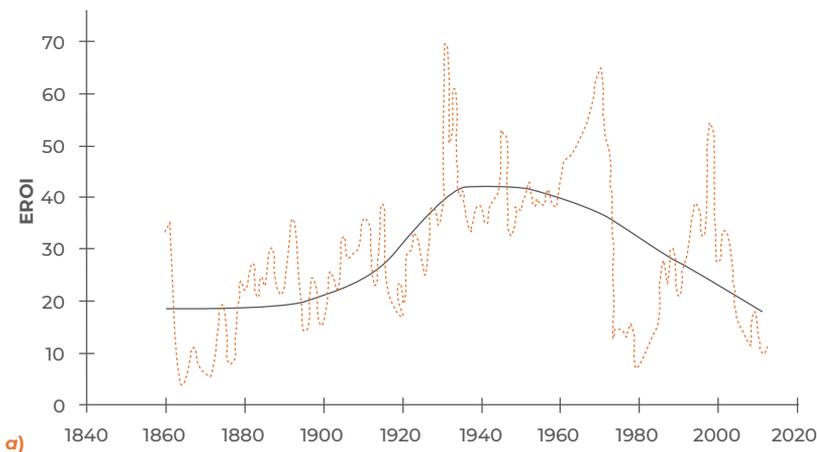
Dada su importancia dentro de la matriz energética global, el petróleo y el gas natural constituyen la base energética de las sociedades modernas. La investigación científica sobre el costo energético de obtener petróleo y gas ha generado un enorme volumen de literatura académica.⁶ A pesar

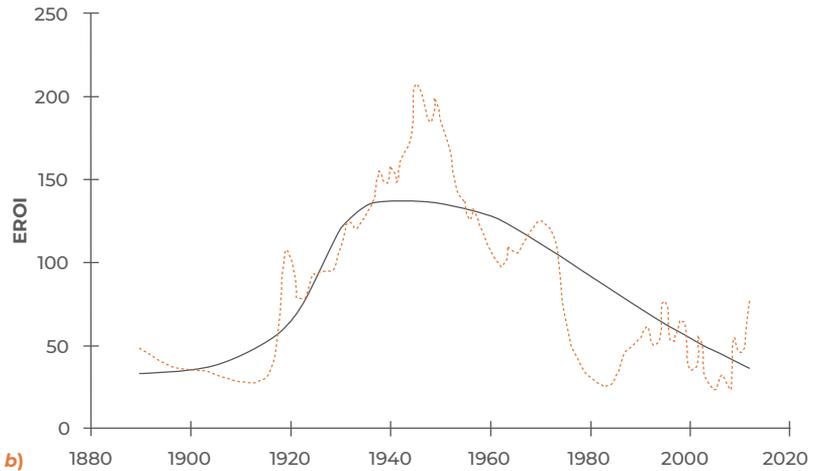
⁵ Para estimaciones del EROI del petróleo y gas a nivel global, véase Court y Fizaine (2017); para aguas profundas del golfo de México, Moerschbaeher y Day (2011); para las arenas bituminosas, Brandt *et al.* (2015); para el petróleo de esquisto, Brandt (2008), y para el biodiésel en México, Fuentes *et al.* (2018). Para los distintos sistemas de generación eléctrica, véanse Weißbach *et al.* (2013), Prieto y Hall (2013), Raugei y Leccisi (2016) y Raugei *et al.* (2018).

⁶ Véase una compilación y una síntesis de varios trabajos en Hall (2017), así como en Hall y Kent (2018).

de la gran variedad de metodologías, enfoques, suposiciones, criterios e información empleados, uno de los aspectos que más destacan en estos estudios es que hay entre ellos una conclusión general y compartida que no parece depender de la región geográfica puesta en estudio. Dicha conclusión es que el EROI de estos recursos fósiles está declinando (véase figura 2): conforme pasa el tiempo, se requiere de una mayor cantidad de energía para poder extraer cada nuevo barril de petróleo y cada nuevo metro cúbico de gas. Por añadidura, se requiere de más y más energía para procesarlos y llevarlos hasta el usuario final. La razón principal detrás de este fenómeno se halla en la naturaleza humana del mínimo esfuerzo: primero se explota lo fácil y se dejan, para momentos posteriores, los recursos que implican mayores costos y dificultades. Físicamente, se aprovechan en primer lugar las condiciones naturales que permiten la explotación –por ejemplo, la presión natural de un yacimiento– y, más tarde, deben crearse condiciones semejantes. De cualquier manera, para generar cualquier cambio en el mundo físico se requiere de una inversión de energía.

Figura 2. Estimaciones del EROI asociado a la obtención global de a) petróleo y b) gas





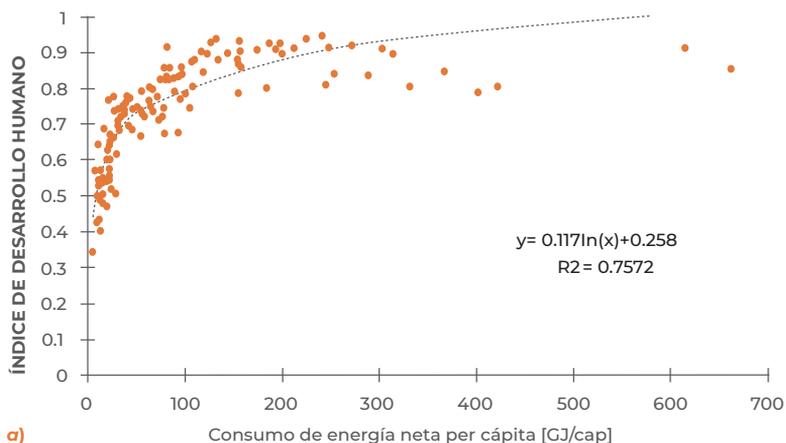
Fuente: Court y Fizaine (2017).

ENERGÍA NETA, TASA DE RETORNO ENERGÉTICO Y CALIDAD DE VIDA

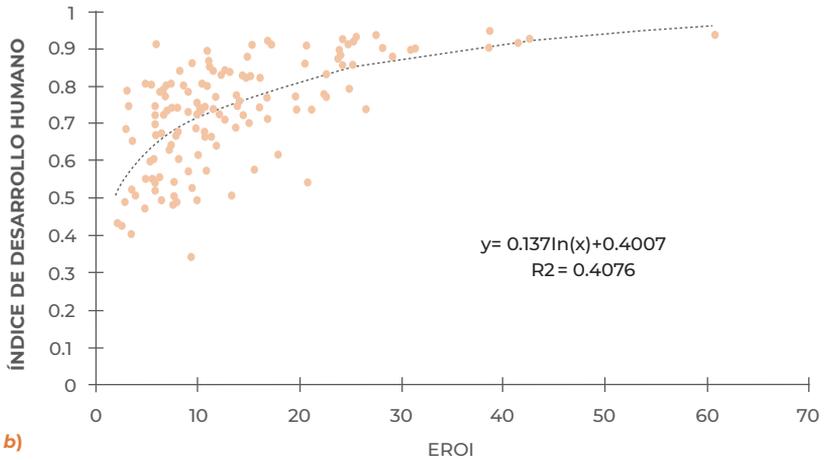
La energía neta es la que podemos dedicar a las actividades no relacionadas con la obtención de energía, es decir, la que puede utilizarse para generar bienestar. El indicador EROI —al ser una medida de la disponibilidad de energía neta— también constituye una medida de esta misma capacidad. En general, es de esperar que las sociedades con mayor retorno energético y, por tanto, con mayor disponibilidad de energía neta gocen de una mejor calidad de vida. Esta intuición ha sido comprobada cuantitativamente por autores como Lambert y colaboradores (2014), quienes calcularon los EROI correspondientes a un amplio conjunto de países y los compararon con indicadores de bienestar humano, tales como índice de desarrollo humano (IDH), acceso a agua potable, inversión monetaria en salud y alfabetización de mujeres. Sus resultados muestran que hay una relación positiva entre el EROI y la calidad de vida. En la figura 3 pueden observarse nuestras propias estimaciones para el EROI y el consumo de energía neta para 137 países —vigentes para 2012— y la comparación

de cada uno contra el IDH. Como podemos apreciar, hay entre ellos una relación positiva. Generar bienestar requiere de la disponibilidad de energía neta, pero si bien esto es necesario, no constituye una condición suficiente que asegure poder alcanzar un bienestar generalizado; en este sentido, resulta fundamental que también se dé una distribución equitativa dentro del conjunto social (véase capítulo 1.10). La disminución del EROI es un indicador de que, con el paso del tiempo, las economías requieren dedicar una mayor cantidad de energía y materiales para obtener energía. Si este incremento en los costos energéticos no se compensa con un incremento en la cantidad total de energía que se explota del medio ambiente o con un aumento en la eficiencia con la que se utiliza (véase el siguiente apartado), comenzará a disminuir la energía que puede dedicarse a actividades económicas y sociales fuera del sector energético.

Figura 3. a) Índice de desarrollo humano vs energía neta per cápita
y b) índice de desarrollo humano vs EROI⁷



⁷ En este caso, el EROI se ha calculado a partir de la relación entre este indicador y el precio de la energía; véase por ejemplo Court y Fizaine (2017). Haciendo uso de una estimación del valor promedio para el precio de la energía a nivel mundial en 2012, tomado de Fizaine y Court (2016), y los datos sobre el PIB y Consumo Primario de energía para cada país, tomados del Banco Mundial (2019), se ha hecho el estimado del EROI particular de cada uno de ellos. Los datos sobre el IDH fueron tomados directamente de la página oficial del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (United Nations Development Programme [2020]).



b)

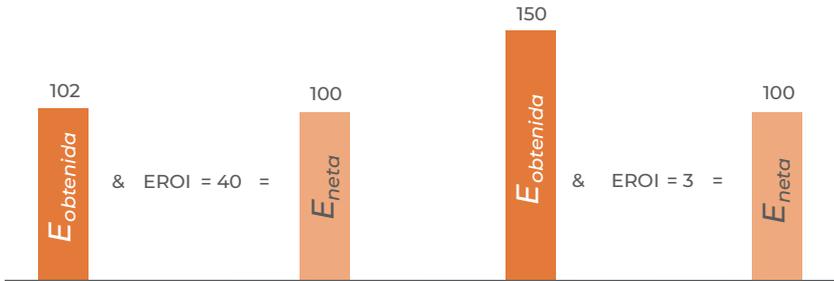
Fuente: Elaboración propia.

¿CÓMO PALIAR EL DECLIVE EN LA TASA DE RETORNO ENERGÉTICO?

En vista de la disminución del EROI asociado a nuestras fuentes de energía, principalmente en el petróleo y gas —que constituyen la base energética de las sociedades modernas—, surge naturalmente una pregunta: ¿cómo hacer frente a esta situación? En este sentido, hay al menos dos mecanismos que, al actuar de forma individual o en conjunto, posibilitan enfrentar el alza en los costos energéticos de obtener energía. El primero de estos mecanismos es incrementar la cantidad total de energía que se extrae del medio ambiente, de tal manera que sea posible compensar la energía que se pierde por concepto de costo energético. Por ejemplo, si suponemos que se requieren 100 unidades de energía neta cuando el EROI asociado a la fuente o fuentes desde donde se obtiene esta energía es de 40, entonces se necesita extraer del medio ambiente, al menos, poco más de 102 unidades de energía. Ahora bien, si el EROI disminuye de forma drástica, de manera que el indicador se sitúe bien adentro de la región de poca disponibilidad de energía neta, por ejemplo con un EROI de 3, entonces, para poder disponer de esas mismas 100 unidades de energía neta, es necesario que la energía total extraída sea de 150 unidades

(figura 4). Este pequeño análisis⁸ nos permite ver que, aunque es posible enfrentar la disminución progresiva del EROI al incrementar la cantidad total de energía que se explota, tal solución no resulta sustentable a lo largo del tiempo. Para el caso particular de los recursos fósiles, la evidencia empírica nos dice que la producción de ellos evoluciona siguiendo una forma característica de campana: primero crece, alcanza un máximo y después comienza a descender. Esto quiere decir que en el mediano y en el largo plazo resulta imposible mantener un incremento continuo de la energía que se extrae del medio ambiente y, tarde o temprano, habrá de enfrentarse a la situación de los costos crecientes. Adicionalmente, la extracción de recursos provoca un creciente impacto ambiental y social, ya que necesita ocupar más territorio y materias primas, así como mayores cantidades de agua, la cual se hace necesaria en todas las fases de la producción de energía fósil y de la minería, asociada a los elementos que ocupa la industria de las fuentes renovables.

Figura 4. Compensando la disminución en el EROI con un incremento en la cantidad total de energía que se obtiene o extrae del medio ambiente



Fuente: Elaboración propia.

⁸ Para la eficiencia es posible llegar a conclusiones similares. En este caso, se debe considerar que lo que la sociedad requiere o busca no es la energía neta *per se*, sino que desea el trabajo útil que se puede extraer de ella, esto es, la energía neta útil. Visto de esta manera, es posible concluir que se puede hacer frente al decremento del EROI mediante incrementos continuos en la eficiencia con la cual se usa la energía; sin embargo, es claro que hay límites técnicos y teóricos sobre este crecimiento.

LA TASA DE RETORNO ENERGÉTICO DEL PETRÓLEO Y EL GAS EN MÉXICO

Hay tres razones que motivan el interés por conocer la evolución del EROI para el petróleo y el gas mexicanos: 1) la alta dependencia de la economía mexicana respecto de los combustibles fósiles; 2) el declive en la producción nacional de gas y petróleo, y 3) el encarecimiento energético que se ha observado en relación con la explotación de este tipo de recursos en distintas regiones del mundo, además del alto costo energético asociado a recursos petroleros no convencionales y los situados en aguas profundas.

ANTECEDENTES

En la literatura académica hay al menos tres estudios sobre el EROI de la extracción de petróleo y gas en nuestro país.⁹ De ellos, creemos que el más importante es el publicado en 2017 por Tripathi y Brandt (2017). En dicho trabajo, los autores exploran el EROI de un conjunto de cinco campos gigantes –ubicados en distintas regiones del planeta–, dentro de los cuales se encuentra el caso mexicano de Cantarell. La importancia de este estudio radica en el hecho de que Cantarell ha sido el campo más importante de nuestro país a lo largo de las últimas cuatro décadas. Entre 1979 y 2019 aportó en promedio 35% de la producción nacional de crudo, con una participación máxima de poco más de 60% en 2004. El declive en la producción en este campo, ocurrida a partir de 2004, arrastró consigo la producción nacional (véase capítulo 1.2). De acuerdo con Tripathi y Brandt (2017), el EROI de este campo muestra dos etapas distintas. La primera, que va de 1979 a 2000, presenta una disminución en el indicador de 12% anual, al pasar de alrededor de 70 a 60. Posteriormente, el

⁹ Véanse Ramírez y Hall (2013), citados en Lambert *et al.* (2013); Tripathi y Brandt (2017), y Celi *et al.* (2018).

EROI muestra en una segunda etapa una caída abrupta entre 2000 y 2012 –último año estudiado–, posicionándose con un valor por debajo de 10. Dicho comportamiento coincide con el programa masivo de inyección de nitrógeno a Cantarell (véase capítulo 1.2), lo cual incrementa de manera sustancial la energía que debe invertirse para seguir extrayendo aceite.

ESTIMANDO LA TASA DE RETORNO ENERGÉTICO PARA EL SECTOR DE HIDROCARBUROS EN MÉXICO

Para estudiar el EROI del sector de hidrocarburos en México hemos empleado cuatro metodologías distintas, incluyendo una para vislumbrar el comportamiento del indicador desde la nacionalización de la industria petrolera. Cada una de estas aproximaciones tiene sus propias limitaciones; las discrepancias entre los valores obtenidos pueden explicarse si se consideran diferentes datos, fuentes de información y suposiciones empleadas. No obstante, el aspecto más relevante de los resultados obtenidos es que todos indican que el EROI de nuestros recursos petroleros está disminuyendo desde el inicio del siglo XXI (figura 5). Tal disminución, junto con la caída en la producción de petróleo y gas a nivel nacional, confirma que la era del petróleo abundante y barato ha llegado a su fin.

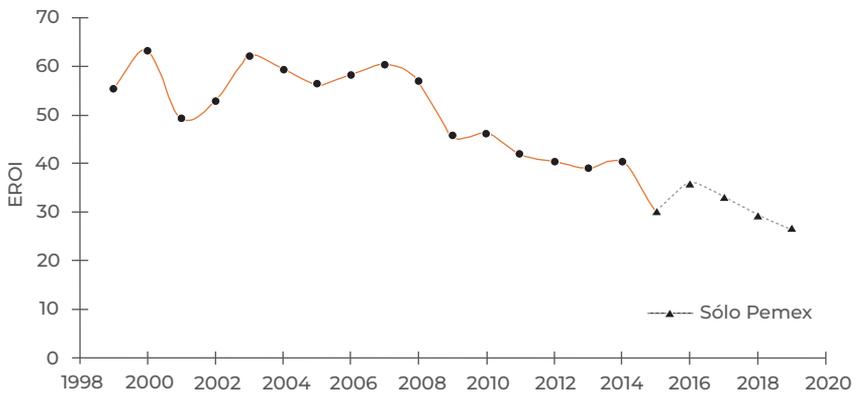
ESTIMACIÓN DE LA TASA DE RETORNO ENERGÉTICO PARA LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO Y GAS A PARTIR DE LOS DATOS SOBRE CONSUMO DE ENERGÍA REPORTADOS POR PEMEX

Desde 1999 Petróleos Mexicanos (Pemex) realiza un reporte sobre el consumo de energía asociado a sus actividades operativas.¹⁰ En él es posible encontrar el gasto energético de la extracción de hidrocarburos. A

¹⁰ Es el llamado *Informe de sustentabilidad*, donde pueden consultarse aspectos como su consumo de energía, uso de agua y emisiones de gases efecto invernadero, entre muchos otros. El último de estos informes correspondió al año 2020 (Pemex 2021).

partir de esta información, y en combinación con la energía potencialmente contenida en el petróleo y gas que se extrae, es posible realizar un estimado del EROI asociado a la explotación de petróleo y gas en nuestro país. Los resultados obtenidos pueden observarse en la figura 5, donde podemos apreciar cómo el indicador ha mostrado una tendencia negativa a lo largo de las últimas dos décadas, al pasar de un valor de 55 en 1999 a uno de 27 en 2019. Es necesario resaltar que antes de 2014 este indicador se refiere a la extracción de petróleo y gas a nivel nacional. Después, si bien el sector se abrió al capital privado como consecuencia de la reforma energética de 2013, se puede considerar que el EROI que se muestra sigue siendo representativo del valor nacional, a pesar de que sólo se refiere a las actividades de Pemex, debido a la casi absoluta dominancia de la empresa nacional en la producción de hidrocarburos. Otro punto crucial de esta primera estimación es que, al sólo tener en cuenta el consumo de energía directo y dejar fuera el indirecto –por ejemplo, el asociado a la construcción de la infraestructura empleada–, el EROI que se muestra subestima el verdadero costo energético de explotar petróleo y gas en nuestro país.

Figura 5. Estimación del EROI para la extracción de petróleo y gas en México a partir de los datos sobre consumo de energía publicados por Pemex (1999-2019)



Fuente: Elaboración propia.

ESTIMACIÓN DE LA TASA DE RETORNO ENERGÉTICO PARA LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO Y GAS A PARTIR DE LOS DATOS SOBRE EMISIONES DE CO₂ REPORTADOS POR PEMEX

Así como Pemex informa acerca de sus niveles de consumo de energía asociados a las actividades de extracción de hidrocarburos, también publica los niveles de emisiones de CO₂ asociados a las mismas. Es posible calcular el EROI a partir de esta información, pues una parte de dichas emisiones está asociada de forma directa al consumo de energía que se realiza durante las actividades de explotación de hidrocarburos y, por tanto, constituye una muestra indirecta del consumo de energía realizado. Por otro lado, al usar valores de conversión adecuados, es posible estimar la cantidad de CO₂ que contiene cada barril de petróleo y cada metro cúbico de gas recuperado. Si se combinan ambos aspectos podemos estimar el EROI de las actividades de extracción de petróleo y gas en nuestro país. Al igual que en el caso anterior, los resultados obtenidos muestran una tendencia general a la baja: el indicador habría pasado de un valor de 58 en 1999 a uno de 39 en 2014.

ESTIMACIÓN DE LA TASA DE RETORNO ENERGÉTICO PARA LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO Y GAS A PARTIR DE DATOS SOBRE EL PRECIO PROMEDIO DEL CRUDO MEXICANO

Distintos autores han estudiado la relación que existe entre el EROI y los precios de la energía, concluyendo de manera general que ésta es negativa o inversa.¹¹ La idea general consiste en aprovechar la intensidad energética del país bajo estudio –definida como el cociente entre el consumo nacional de energía y el producto interno bruto– para hacer una estimación del consumo energético correspondiente a las actividades

¹¹ Para la relación entre el EROI y el precio de la energía, véanse King (2010), King y Hall (2011), Court y Fizaine (2017) y Heun y De Wit (2012).

de extracción y comparar este último con la cantidad total de energía recuperada por dichas actividades. La intensidad energética representa la cantidad promedio de energía que se debe consumir dentro de la economía para generar una unidad de valor monetario, por lo que al conocer el valor económico que genera el volumen de hidrocarburos extraído del subsuelo es posible estimar su consumo energético. Este consumo estimado representa sólo una aproximación al consumo real, ya que el valor de intensidad energética empleado es un promedio nacional y puede no representar de manera fiel la intensidad del sector energético. Sin embargo, en comparación con los métodos de los dos apartados anteriores, donde sólo se considera el consumo directo, éste representa una extensión sobre los límites de estudio en cuanto a las entradas de energía hacia el sistema, ya que es posible argumentar que el precio del barril del petróleo –información a partir de la cual se construyen los datos de consumo– debe tener en cuenta todos los costos energéticos directos e indirectos asociados a los materiales y a la infraestructura utilizados, además de los gastos en salarios de los trabajadores.

De nueva cuenta, la tendencia general encontrada a partir de esta metodología es negativa al mostrar una evolución en el indicador que pasa de un valor de cerca de 37 en 1999 a uno de casi 11 en 2014. Si bien la magnitud de los valores encontrados es notablemente inferior a las obtenidas en los apartados anteriores, dicho comportamiento no debe ser una sorpresa cuando se tiene en cuenta que, al estar el indicador construido a partir del precio del crudo, teóricamente se espera que el mismo tenga en cuenta todos los costos asociados a su obtención.

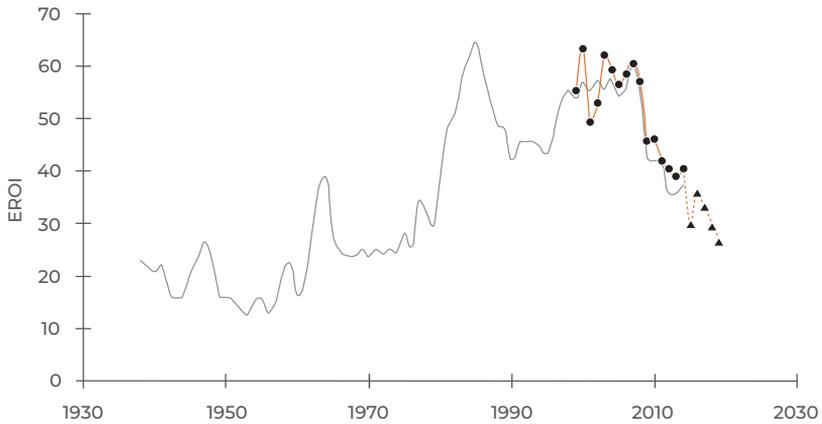
ESTIMACIÓN DE LA TASA DE RETORNO ENERGÉTICO PARA LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO Y GAS A PARTIR DE UN MODELO LINEAL MULTIVARIABLE PARA ESTIMAR EL CONSUMO DE ENERGÍA ASOCIADO

En nuestro análisis de los datos de consumo directo de energía reportados por Pemex hemos encontrado una correlación lineal positiva entre

éstos y variables como el número de campos y pozos en producción, además de la cantidad de pozos y kilómetros perforados. Dicha relación parece lógica y natural si se tiene presente que mantener más y más campos o pozos en producción debe resultar en un incremento en el consumo de energía necesario para mantener las actividades de operación y transporte de hidrocarburos que se obtienen de los mismos. Por otro lado, un alza en la intensidad de las actividades de perforación debe conducir directamente a un aumento en el consumo de energía, y es de esperar que este consumo crezca conforme sea mayor la profundidad de los pozos perforados (véase capítulo 1.2). Pemex no tiene un registro público sobre su consumo de energía antes de 1999, pero sí dispone de una amplia base de datos sobre indicadores petroleros donde se incluyen las variables mencionadas.¹² Con base en lo anterior, construimos un modelo lineal multivariable para estimar el consumo de energía asociado a las actividades de extracción de petróleo y gas en México, extendiendo nuestro análisis hasta 1938. Al comparar este consumo de energía con la energía potencialmente contenida en el petróleo y gas recuperados, construimos una serie histórica sobre la evolución del EROI en nuestro país entre 1938 y 2019 (figura 6). Como hemos mencionado, al estar basado únicamente en el consumo directo de energía, dicha serie sólo puede considerarse una estimación favorable del indicador. Los resultados muestran que el EROI habría experimentado una tendencia general positiva de 1938 a 1985, al pasar de un valor de 23 a uno de 64. Después de 1985, si bien hay un periodo de aumento durante la última década del siglo xx, la tendencia global es de naturaleza negativa. Un aspecto a resaltar es que el comportamiento del EROI parece mostrar una forma de campana: sube al principio, alcanza un máximo y declina después de manera terminal. Dicho comportamiento coincide con lo que se ha propuesto teóricamente y observado empíricamente a nivel global (véase por ejemplo figura 2).

¹² Estos y otros indicadores petroleros pueden consultarse en los *Anuarios Estadísticos de Pemex* (s.a.).

Figura 6. Estimación del EROI para la extracción de petróleo y gas en México al calcular el consumo de energía requerida a partir de distintos indicadores petroleros (1938-2014)



Nota: También se muestran las estimaciones del EROI hechas con base en los datos de consumo de energía reportados por Pemex (figura 5).

Fuente: Elaboración propia.

¿POR QUÉ DISMINUYE LA TASA DE RETORNO ENERGÉTICO DEL PETRÓLEO Y EL GAS EN MÉXICO?

Dar una explicación precisa y detallada sobre las causas del descenso del EROI del petróleo y del gas mexicanos es una tarea complicada, si no imposible. Se requeriría de información para cada pozo y cada yacimiento que se explota en el país, de tal suerte que pueda entenderse a profundidad cómo y en qué se concentra el consumo energético asociado a la explotación de hidrocarburos. No obstante, hay algunas tendencias generales que pueden ser fácilmente identificadas y a partir de las cuales se hace posible dar una explicación o entender, en principio, el fenómeno que se observa en el comportamiento del retorno energético asociado a la extracción de petróleo y gas.

Lo que resulta necesario considerar es que, en general, este decaimiento responde a la tendencia humana hacia el mínimo esfuerzo:

primero se explotan los yacimientos más accesibles y de mejor calidad, después aquellos que –por distintas condiciones físicas, químicas y geológicas– requieren de un mayor esfuerzo e inversión para ser aprovechados. En el caso mexicano, este avance hacia recursos mucho más costosos se manifiesta en cuestiones tales como la necesidad de perforar progresivamente a mayores profundidades para encontrar yacimientos de petróleo y gas; más aún, estos yacimientos no sólo se encuentran a una profundidad promedio mayor, sino que contienen un volumen menor de hidrocarburos, en comparación con los descubrimientos del pasado (véase capítulo 1.2). Esto hace que al aumentar los esfuerzos de perforación éstos no se vean recompensados con un incremento en el tamaño de los volúmenes descubiertos y, por tanto, se obtengan retornos decrecientes.

Además, un aspecto fundamental para explicar el declive en el EROI del petróleo y el gas en México es la anomalía geológica que representa el campo supergigante Cantarell, que en su auge fue el segundo más prolífico del mundo. En este sentido, parece que de la misma forma en que la producción proveniente de este complejo ha determinado el comportamiento de la producción de crudo durante las últimas cuatro décadas, el EROI asociado a su explotación también determina el comportamiento global del indicador. Esto es, el declive en el EROI del petróleo y del gas en México (véase figura 6) es un fiel retrato del deterioro de un campo sin igual en nuestro país. Este hecho se puede apreciar en dos aspectos. El primero es el incremento abrupto que sufre el EROI del petróleo y gas entre 1979 y 1985, periodo que coincide con la entrada en producción de Cantarell y durante el cual el EROI hubo de pasar de un valor de alrededor de 30 a uno de poco más de 60.¹³ Posteriormente, el declive continuo en el EROI del petróleo y el gas en México, que comienza alrededor del año 2000, coincide con el declive abrupto del EROI de la producción de

¹³ De acuerdo con las estimaciones de Tripathi y Brandt (2017) para el EROI de Cantarell, el indicador se habría situado alrededor de 65 y 70 durante este periodo.

petróleo y gas en Cantarell, que también comienza en 2000 (Tripathi y Brandt 2017). De acuerdo con estos autores, el declive del EROI, de 70 en 1979 a cerca de 10 en 2012, se debió a una combinación de factores. Entre ellos: 1) incremento en el consumo de energía debido a la implementación de sistemas artificiales de producción –procesos de *gas lift*¹⁴ para este caso en particular–; 2) incremento en el consumo de energía requerido para la inyección de nitrógeno –lo cual se inició en 2000–; 3) incremento en el consumo de energía requerido para la reinyección de gas natural –iniciado en 2004–, y 4) declive en la producción de petróleo y gas. La historia productiva de Cantarell y la evolución de su EROI son un ejemplo perfecto de cómo primero se explota el petróleo al aprovechar las condiciones que existen en la naturaleza –como la presión natural del yacimiento– y, más tarde, cuando esas condiciones se agotan y desaparece este “subsido energético” natural, se tienen que crear nuevas condiciones, aunque para crearlas primero hay que invertir energía.

POSIBLE EVOLUCIÓN DE LA TASA DE RETORNO ENERGÉTICO DEL PETRÓLEO Y EL GAS EN EL FUTURO

Hasta ahora se ha mostrado que el EROI asociado a las actividades de extracción de petróleo y gas en México está declinando. Pero, ¿podría en el futuro revertirse esta situación? Aunque nadie puede conocer con certeza el futuro, la evidencia sugiere que esta tendencia negativa es de naturaleza terminal y no podrá ser revertida. Por un lado, el comportamiento observado es el esperado de acuerdo con lo que se ha propuesto de forma teórica en la literatura científica, lo cual significa que el EROI de nuestros recursos petroleros ha entrado en una etapa

¹⁴ Proceso que consiste en inyectar gas en las tuberías con el objetivo de reducir el peso de la columna hidrostática para permitir que la presión de reservorio empuje el petróleo hacia la superficie.