



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estimación del Índice de Retorno
Energético para el Sector de
Hidrocarburos en México**

TESIS

Que para obtener el título de

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A

José Rafael Flores Hernández

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Luca Ferrari



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

Agradecimientos

Si hemos conseguido llegar tan alto que ahora podemos ver más y más lejos que nuestros predecesores*, esto no es porque tengamos mejor visión que ellos o porque contemos con una mayor estatura, sino porque nos encontramos sostenidos en sus hombros, apoyados sobre los hombros de verdaderos gigantes es la manera en la cual el esfuerzo individual consigue convertirse en grandes proezas. A continuación quiero agradecer y reconocer a todos y cada uno de esos gigantes en quienes me he sostenido, apoyado, guiado y acompañado durante mi formación profesional como ingeniero, sin ellas y ellos me hubiera sido imposible alcanzar esta meta, y aunque nunca existirán las palabras suficientes y adecuadas para poder expresarles todo mi agradecimiento, les ofrezco las líneas que siguen como un intento sincero de ello.

A mi madre, **Delfina Eugenia Hernández Herrera**, por su amor infinito, por su apoyo incondicional, por el esfuerzo y sacrificio diario para sacar a sus hijos adelante, pero sobre todo, por siempre confiar y creer en mí. En todo lo que soy, y en todo lo que pueda llegar a ser, siempre estará presente y siempre se manifestará la educación, amor y valores que me has dado. Gracias mamá.

A mi padre, **Hugo Miguel Flores y Fragoso**, por haber estado presente en todo momento, por siempre apoyarme en todo sentido, y principalmente, por su amor y cariño incondicional. Por enseñarme que un hombre debe cumplir con sus responsabilidades sin importar las circunstancias. Gracias papá, me dijiste “¡Sí se puede!”, y sí se pudo.

A mi abuela, **Emilia Herrera Mundo**, por el amor tan dulce que siempre me ha dado, por haberme cuidado como una segunda madre, por siempre querer y buscar lo mejor para mí, por tantas y tantas lecciones de vida. Gracias por tanto, abue, y perdón por tan poco.

A mis hermanos, **David Monterde Hernández y Edgar Flores Hernández**, porque para mí siempre han constituido un ejemplo a seguir, por mostrarme con el ejemplo el valor del trabajo duro y constante, por su amor y apoyo incondicional, por estar para mí en todo momento, por tantas risas. Gracias, carnales.

A mi compañera de aventuras, mi gran y mejor amiga, mi cómplice y confidente, mi gran amor, **Gabriela Vázquez Neri** y a su familia. A Gaby, por tanto amor, por todo el apoyo, por creer en mí y por siempre estar impulsándome para que me convierta en un mejor ser humano. También, porque si este trabajo es de alguna forma inteligible, esto se debe a que escuchaste mis ideas y argumentos hasta el cansancio, siempre obligándome a explicar las cosas de la forma más sencilla posible, de verdad gracias y perdón por haberte hecho sufrir tanto con mis conversaciones eternas sobre petróleo. Agradezco al Sr. **Sergio Vázquez**, a la Sra. **Alicia Neri** y a **Adriana Vázquez**, por siempre recibirme en su casa con las puertas abiertas, por siempre tratarme, en todo sentido, como un integrante más de su familia, porque son incontables las cosas que les he aprendido y porque sin duda alguna la oportunidad de convivir con ustedes ha enriquecido mi vida.

A mi familia. A mis tíos, **Rafael Hernández, Victoria Hernández y Alberto Leiva, Hugo Hernández y Aurora Serrano, Guillermo Hernández y Blanca Chávez**, A mi cuñada, **Sabrina Valencia**, y a mi querido sobrino, **Iker Monterde**, por todo su apoyo y por siempre haber estado pendientes de mis avances. Gracias.

A lo largo de mi vida he tenido la oportunidad de conocer a personas sumamente extraordinarias y he contado con la gran fortuna de que algunas de ellas hayan terminado por convertirse en mis amigas y amigos. No tengo aquí el espacio suficiente como para poder expresar de forma individual todo lo que quisiera decirles y todo lo que su amistad significa para mí, sin embargo, no quiero dejar pasar la oportunidad de nombrarlos y agradecerles por su amistad siempre sincera, por su amor y por su apoyo. Es de esta manera que agradezco, a mis grandes amigos de la vida, **Diego Aguilar, Alán Álvarez, Alejandro Venegas, Marco Ramírez, Dariel Sánchez, Marlén Gómez y Teresa Chaparro**. A mis primeros amigos de la carrera y sobre quienes se me advirtió terminarían por convertirse en amigos para toda la vida, a **Víctor Alcantar, Ángel Espinoza, Simón Cruz y Antonio Mendoza**. De manera muy especial, agradezco a **Iyari Alcalá, Emmanuel Torres, Miguel Canchola** y a **Moisés Tirado**, por haber sido mi equipo y apoyo durante toda la carrera y por haber hecho de esta etapa una de las mejores de mi vida.

A mi asesor de tesis y gran maestro, el **Dr. Luca Ferrari**, por haberme dado su voto de confianza para elaborar bajo su tutela este trabajo, por todo el apoyo que me brindó en todos los sentidos y en todo momento, por todas las oportunidades otorgadas y sobre todo por haberme enseñado tanto (algunas veces sin darse cuenta). Mi vida, mi forma de pensar, de ver y de entender el mundo, tienen un antes y después de este trabajo, gracias por ello doctor.

A los sinodales de este trabajo, la **Dra. Irma Glinz**, la **Dra. Paulina Gomora**, el **Lic. Favio Barbosa** y el **Ing. Yaniak Cedro**, por haberse tomado el tiempo de revisarlo, por sus consejos y comentarios. De forma especial agradezco las observaciones y correcciones hechas por la Dra. Paulina Gomora, sin duda alguna estos cambios contribuyeron a mejorar de forma sustancial el documento. Gracias.

Finalmente quiero agradecer, a mi *Alma Mater*, mi segundo hogar, la **Universidad Nacional Autónoma de México** y a la **Facultad de Ingeniería**, por mi educación profesional y por todas las oportunidades que me fueron brindadas. Siempre estaré orgulloso de haber podido formar parte de esta institución.

JR

* *“Pararse sobre hombros de gigantes”* es una metáfora empleada, comúnmente dentro del ámbito científico, para expresar el cómo los grandes logros científicos siempre se encuentran sostenidos sobre los trabajos de autores previos. Aunque usualmente esta expresión se asocia con Isaac Newton, el concepto se remonta al siglo XII y se atribuye al filósofo Bernardo de Chartres. Aquí me he tomado la libertad de tomar esta idea para agradecer y reconocer a otro tipo de gigantes.

Dedicatoria

Llegar a este punto hubiera sido imposible sin el amor, apoyo y confianza de mi madre, **Eugenia Hernández**, de mi hermano, **Edgar Flores** y de mi gran amor, **Gabriela Vázquez**. A ustedes tres, les ofrezco todo el esfuerzo, toda la pasión, todo el trabajo, toda la dedicación y todo el amor que he colocado en este trabajo, como una ofrenda de eterno agradecimiento por haber estado para mí en todo momento, por confiar y creer en mí incluso cuando yo no lo hice.

JR

Resumen

Obtener energía cuesta dinero, pero también cuesta energía. Antes de que se pueda rellenar con gasolina el tanque de nuestro automóvil y conducir algunos kilómetros hay que explorar para encontrar el petróleo, construir la infraestructura para extraerlo, refinarlo y transportar la gasolina al punto de uso. Además hay que considerar la construcción del carro y las calles. Todos y cada uno de estos procesos requieren de una inversión de energía en forma directa o indirecta que, al igual que una inversión financiera, solo tiene sentido si se obtiene un beneficio. Esto implica que la única razón para explotar un yacimiento de petróleo o gas es porque la energía que podemos obtener de este es mayor a la que requerimos invertir en el proceso. El costo energético de la energía es un factor crítico para evaluar la viabilidad de cualquier fuente de energía, ya que solo aquellas fuentes con altos retornos son capaces de crear sociedades prósperas.

Desde hace más de tres décadas existe el concepto de Energy Return On Investment (EROI) o Índice de Retorno Energético (IRE), cuya idea general es mostrar la realidad de que obtener energía cuesta energía. El IRE es el cociente entre la energía que puede obtenerse de una fuente en particular y la que debe invertirse de obtenerle; entre mayor sea este indicador, mayor es el beneficio que puede obtener una sociedad de una fuente energética. Por lo tanto, el IRE es un medio para evaluar y comparar la productividad de las distintas fuentes energéticas disponibles para las sociedades humanas. Existen una gran cantidad de trabajos en donde se ha estudiado el IRE para la extracción de petróleo y gas en distintas regiones del mundo, la conclusión general de los mismos es que el indicador se encuentra disminuyendo con el paso del tiempo. Además, se ha determinado que el IRE de los recursos petroleros no convencionales o en campos donde se aplican técnicas de recuperación mejorada, es notablemente inferior al del petróleo convencional. Lo anterior implica que con el tiempo se tiene que invertir una mayor cantidad de energía y recursos para obtener un barril de petróleo, las consecuencias son que los costos de producción, y por ende, el precio del recurso deben incrementar para justificar su explotación. Además de lo anterior se tiene que la energía neta disponible para las

economías disminuye, comprometiendo con ello la existencia de dos factores que han sido clave para el desarrollo económico de los últimos 200 años, a saber, la energía abundante y barata.

En este trabajo se ha realizado una estimación del IRE para el sector hidrocarburos en México a partir de cinco metodologías: 1) Empleando la información publicada por PEMEX para la producción de petróleo y gas y el correspondiente gasto energético; 2) usando las estimaciones de emisiones de CO_2 asociadas a la extracción y refinación de hidrocarburos como una medida aproximada de la energía consumada durante la realización de estas actividades; 3) utilizando el precio promedio del crudo y la intensidad energética de la economía mexicana; 4) mediante una estimación del gasto monetario nacional en hidrocarburos y 5) mediante un modelo lineal de múltiples variables para estimar el consumo de energía asociado a la extracción de petróleo y gas en México. Los resultados obtenidos con el método: 1) indican una disminución en el IRE al pasar de un valor alrededor de 55 en 1999 a uno de 40 en 2014; para el caso 2) se tiene un valor de 58 en 1999 y uno de 39 en 2014; en el caso 3) una caída de 36 a 8 entre 1999 y 2012, aunque posteriormente hay un ligero incremento para llegar a 20 en 2016; el caso 4) muestra una disminución entre 1999 y 2010 al pasar de 11 a 8, y da evidencia de que el máximo valor para el IRE ocurrió entre finales de los años 70 y principios de los 80; finalmente el caso 5) muestra una tendencia general declinante después de 1985 al pasar de un valor de 64 en dicho año a 37 en 2014. Cada uno de estos métodos tiene limitaciones y las discrepancias entre los valores pueden explicarse tomando en cuenta los diferentes datos y suposiciones. Sin embargo, lo más relevante es que en todos los casos se muestra que el IRE está disminuyendo desde inicios del siglo XXI. La disminución en el IRE junto con las tendencias actuales en la producción de petróleo y gas en el país confirman que la era del petróleo abundante y barato ha llegado a su fin y nos estamos enfrentando a las consecuencias de la naturaleza humana del “mínimo esfuerzo”.

Índice

Agradecimientos	I
Dedicatoria	III
Resumen.....	IV
Índice.....	VI
Introducción.....	1
Motivación.....	1
Objetivos	3
Organización del Trabajo.....	4
CAPÍTULO I - El Índice de Retorno Energético	5
Introducción	5
1.1. Energía Neta	5
1.2. El Concepto de EROI	9
1.3. El Índice de Retorno Energético (IRE).....	10
1.3.1 Delimitación de las Salidas y Entradas de Energía al Sistema	13
1.3.2 Construcción del IRE en Función de Distintas Entradas y Salidas de Energía	19
1.3.3 Consideraciones Temporales al Estudiar el IRE.....	22
1.4. El IRE de Algunas Fuentes de Energía.....	26
1.5. La Relación Entre el IRE y la Energía Neta	36
1.6. Energía Neta, IRE y calidad de vida	39
1.7. El IRE, el Precio y Gasto en Energía y sus Efectos sobre la Economía	42
1.7.1 La Relación entre el IRE y el Precio de la Energía	45
1.7.2 La Relación entre el IRE y el Gasto en Energía	52
1.7.3 Consumo de Energía y Crecimiento Económico.....	61
1.7.4 Precio de la Energía y Crecimiento Económico	69
1.7.5 Gasto en Energía y Crecimiento Económico	77
1.7.6 Los Efectos del IRE sobre el Crecimiento Económico.....	82
1.8. Las Fases del IRE	85
1.8.1 El Desfase Temporal entre el IRE Máximo y la Recuperación Energética Máxima	92
1.8.2 El Desfase Temporal entre la Recuperación Energética Total y la Energía Neta	94
1.9. El Efecto de la Adición de Nuevas Fuentes de Energía sobre el IRE.....	95

1.10. El IRE Mínimo para una Sociedad.....	99
1.10.1 El IRE Mínimo y el Incremento en la Eficiencia Tecnología.....	103
1.11. Modelos Matemáticos para Calcular el IRE.....	108
1.11.1 Modelo de Dale, Krumdieck, Bodger.....	109
1.11.2 Modelo de Court y Fizaine.....	112
CAPÍTULO II - Algunos estudios realizados sobre el Índice Retorno Energético para la Extracción de Petróleo y Gas.....	114
Introducción	114
2.1. Global	115
2.2. Estados Unidos	120
2.2.1 Petróleo Pesado en California	122
2.2.2 Aguas Profundas en el Golfo de México.....	123
2.2.3 Oil Shale.....	125
2.2.4 Shale Oil.....	127
2.2.5 Shale Gas	128
2.2.6 Tigth Gas	130
2.3. Noruega.....	130
2.4. China.....	131
2.4.1 Shale Gas	135
2.5. Canadá.....	136
2.5.1 Tar Sands	139
2.6. Rusia	143
2.7. Ecuador.....	145
CAPÍTULO III - Caso de Estudio: Índice de Retorno Energético para el Sector de Hidrocarburos en México	146
Introducción	146
Antecedentes	148
3.1. Cálculo del Índice de Retorno Energético en el periodo 1999-2014.....	152
3.1.1 Fuentes de Información y Preparación de Datos	154
3.1.2 Metodología	158
3.1.3 Resultados	160
3.2. Cálculo del Índice de Retorno Energético en el periodo 1999-2014 Mediante Emisiones de CO₂	171
3.2.1 Fuentes de Información y Preparación de Datos	172

3.2.2 Metodología	177
3.2.3 Resultados	178
3.3. Cálculo del Índice de Retorno Energético en el periodo 1979-2018 Mediante Precios Promedio de Crudo	180
3.3.1 Fuentes de Información y Preparación de Datos	182
3.3.2 Metodología	183
3.3.3 Resultados	184
3.4. Cálculo del Índice de Retorno Energético en el periodo 1938-2010 Mediante Gasto en Petrolíferos	186
3.4.1 Fuentes de Información y Preparación de Datos	187
3.4.2 Metodología	191
3.4.3 Resultados	193
3.5. Cálculo del Índice de Retorno Energético en el periodo 1938-2014 Mediante un Modelo Lineal de Múltiples Variables para Estimar el Consumo Directo de Energía	195
3.5.1 Fuentes de Información y Preparación de Datos	196
3.5.2 Metodología	196
3.5.3 Resultados	198
CAPÍTULO IV - Algunas Implicaciones para la Economía Nacional	201
Introducción	201
4.1. Consumo de Energía y Crecimiento Económico en México	202
4.2. Precio de la Energía y Crecimiento Económico en México	207
4.2.1 Precios Altos	210
4.2.2 Precios Bajos	222
4.3. Gasto en Energía y Crecimiento Económico	233
4.4. El IRE y el Crecimiento Económico	240
4.4.1 El IRE Mínimo para que Exista Crecimiento Económico	246
4.4.2 Precio Máximo para que Exista Crecimiento Económico	249
4.4.3 El Fin del Petróleo Barato y Abundante en México	251
Conclusiones	257
Referencias	260

Introducción

Motivación

Cuando en México se habla de energía, generalmente o en la mayoría de los casos, se está hablando de petróleo y gas natural como consecuencia de la alta dependencia que nuestro país guarda con respecto a dichos recursos energéticos. Los combustibles fósiles constituyen la fuente de energía que mueve, calienta, enfría, ilumina y asiste en sus actividades diarias a la gran mayoría de la población mexicana. Es esta energía fósil la encargada de poner en marcha y accionar la economía nacional ya que la creación de cualquier bien o servicio requiere del consumo de energía en mayor o menor medida. No debe tomarse como una exageración el decir que, si los mexicanos alguna vez fuimos los hijos del maíz, hoy somos los hijos del petróleo, pero hoy también es cierto que tenemos que enfrentarnos a una serie de cuestiones y situaciones que ponen en duda la viabilidad de un modelo de desarrollo basado en el uso de combustibles fósiles.

Por supuesto que lo primero que debe tenerse en cuenta es la naturaleza finita y no renovable de los recursos fósiles, lo cual, de entrada determina que el tiempo que puede funcionar una sociedad o economía que tiene como base energética el petróleo y gas no es indeterminado. Pero quizá mucho más importante que el agotamiento inevitable de este tipo de recursos es el hecho de que toda producción de petróleo y gas, no importando si se trata de aquella que proviene de un pozo, de un campo, de un país o de un grupo de países, natural y eventualmente alcanzará un punto máximo de producción para después declinar. Este aspecto tiene consecuencias importantes ya que, hasta hoy, el crecimiento económico siempre ha venido acompañado de un incremento en el uso de energía, lo cual trae como corolario asociado que si la producción de petróleo y gas no puede seguir aumentando entonces el crecimiento basado en ellos tampoco. Sumado a los aspectos anteriores otra cuestión que resulta fundamental respecto a la viabilidad del petróleo y gas como fuentes de energía para la sociedad, aunque casi siempre es ignorada, se refiere al costo energético de obtenerlos. Obtener energía cuesta dinero, sí, pero mucho más importante es que también cuesta energía, y los costos energéticos son un factor crítico

para determinar los beneficios potenciales que una fuente energética puede traer a una sociedad en vista de que solo los recursos energéticos con altos retornos de energía son capaces de crear y sostener sociedades complejas y prósperas. La energía que usamos y dedicamos para producir energía ya no está disponible para satisfacer otras necesidades, es energía que ya no podemos dedicar a operar un tractor en el campo o que ya no está disponible para poder alimentar la red eléctrica de nuestras casas y cargar nuestros celulares. La única razón para explotar un nuevo yacimiento de gas o de petróleo es porque la energía que podemos obtener de ellos es mayor a la que invertimos en el proceso de explotarles. Es por lo anterior que la cuestión más fundamental acerca de los recursos fósiles que nos quedan por explotar no se encuentra en cuántos hidrocarburos quedan en el subsuelo o a qué ritmo se pueden extraer, sino que se halla en cuánto de ellos representa un superávit energético o lo que es lo mismo cuánta es la energía neta que contienen, energía que podemos destinar a todas aquellas otras actividades que valoramos y que dan sentido a nuestra existencia.

Dentro de la literatura científica se ha desarrollado el concepto de EROI¹ (Energy Return On Investment) el cual se refiere simplemente a la relación entre la energía que se obtiene de un recurso energético y la que se invierte en el proceso de explotarlo, dicho indicador permite precisamente poder estudiar el costo energético de obtener energía. Los estudios realizados sobre esta línea de investigación apuntan indiscutiblemente a que con el paso del tiempo la explotación de petróleo y gas se ha hecho energéticamente mucho más costosa al mostrar que el EROI de los recursos petroleros que se aprovechan en diferentes regiones del mundo se encuentra disminuyendo, más aún, aunque en algunos casos todavía existe cierto grado de incertidumbre, como lo es el caso de la fracturación hidráulica, todo apunta, y como sería de esperar, que recursos como aquellos localizados en aguas profundas o en los que se requiere de la aplicación de técnicas de recuperación especiales como lo es la aplicación de procesos térmicos tienen asociados niveles de EROI mucho menores comparados con los de recursos convencionales. La disminución del EROI del petróleo y gas a nivel mundial es una prueba contundente de que la era de

¹ En la sección 1.3 del presente documento se expondrá que una forma más general de referirse al EROI es a través del concepto de IRE aunque ambos pueden utilizarse de forma intercambiable.

la energía fósil barata ha llegado a su fin. Aunque es difícil conocer con precisión cuáles serán los efectos potenciales que esto pueda tener sobre las sociedades y economías humanas, no hay duda de que estas serán importantes debido al simple y llano hecho de que las sociedades modernas han sido construidas a partir de energía barata, creciente y abundante.

Es precisamente dentro de este contexto de alta dependencia de los combustibles fósiles, del declive en la producción nacional del petróleo y gas y del aparente encarecimiento energético que ha sido observado en su explotación en distintas regiones del mundo, que nace la motivación por desarrollar el presente trabajo en cual se busca conocer, al menos en principio, cuál es la situación mexicana respecto al costo energético de obtener petróleo y gas, y cuáles son las posibles implicaciones que puede tener para la economía nacional el seguir apostando por un modelo de desarrollo basado en el uso de combustibles fósiles en una era en la que petróleo y gas abundantes y baratos parecen haber llegado a su fin.

Objetivos

1. Elaborar un documento que reúna, resuma y en algunos casos explique de manera sencilla los conceptos e ideas básicas sobre el estudio del índice de retorno energético y sus implicaciones para las sociedades humanas. Con ello se busca que parte de este documento pueda servir como fuente de consulta o como un punto de introducción para adentrarse a las discusiones más elaboradas que existen dentro de la literatura académica.
2. Estudiar la situación del IRE para los hidrocarburos en México.
3. Entender, al menos en principio, qué efectos puede tener sobre la economía mexicana el hecho de que el IRE de los recursos fósiles que explota y consume se encuentre disminuyendo.

Organización del Trabajo

El presente trabajo está organizado en cuatro capítulos y una sección de conclusiones; a continuación se da un breve resumen de lo que se presenta en cada uno de los distintos apartados:

- En el Capítulo I: Se presentan y desarrollan los conceptos de energía neta y de índice de retorno energético (IRE), los cuales, constituyen el núcleo base de la presente investigación. Además se revisan las relaciones que guardan estos indicadores con otras variables económicas como lo son el precio de la energía y el gasto en energía. A partir de dichas relaciones se pueden inferir los efectos económicos potenciales que tiene la disminución en el IRE.
- En el Capítulo II: Se revisa y resume la literatura científica que ha estudiado IRE asociado a la explotación de petróleo y gas en distintas regiones del planeta.
- El Capítulo III: Constituye el caso de estudio. Aquí se realiza una estimación del IRE para el sector de hidrocarburos en México a través de 5 distintas metodologías. También se hace una revisión de algunos trabajos previos que han tratado el caso mexicano.
- En el Capítulo IV: Se analizan los efectos potenciales que puede tener sobre la economía nacional el hecho de que el IRE de los recursos petroleros se encuentre disminuyendo.

CAPÍTULO I - El Índice de Retorno Energético

Introducción

En este primer capítulo se presentan y discuten las ideas y conceptos básicos sobre los cuales se sostiene el presente trabajo, tales como el concepto de energía neta y su importancia para las sociedades y la economía, se presenta la definición del EROI y el por qué una forma más general del mismo puede ser llamarlo IRE, además se discuten las principales consideraciones y los problemas que existen a la hora de medir este indicador. Posteriormente se revisan algunos trabajos en donde se ha estimado el EROI o IRE para distintas fuentes de energía, incluyendo tanto renovables como no renovables, para el caso particular del petróleo y gas esta discusión se amplía y detalla más en el siguiente capítulo. Se prosigue revisando los puntos más generales de la relación que existe entre la energía y la economía, aquí se verán aspectos sobre el cómo los precios de la energía y el gasto monetario en energía parecen afectar al desempeño económico y a partir de ello se vislumbran los efectos potenciales que puede tener sobre una economía la reducción en el IRE de las fuentes energéticas de las cuales se alimenta. Hacia la parte final del capítulo se presenta una discusión sobre el IRE mínimo que una sociedad moderna requiere para mantenerse y funcionar. Finalmente se concluye con una revisión de los modelos matemáticos que han sido propuestos para estudiar el IRE.

1.1. Energía Neta

La energía es un recurso esencial para el desarrollo y bienestar de las sociedades humanas, pero antes de que cualquier recurso energético pueda ser utilizado para satisfacer una necesidad social o individual, primero debe ser obtenido (capturado o recolectado), transformado y transportado hasta el punto de uso, además de que se deben crear los medios que permitan utilizarle. Todos y cada uno de estos procesos requieren de una inversión energética que se realiza de forma directa o indirecta, por ejemplo, al operar la maquinaria involucrada en las actividades de captura o al construir la misma, lo

anterior junto con todos los insumos demandados bajo el concepto de explotación del recurso energético natural. Al igual que una inversión financiera, esta inversión energética solo tiene sentido si es que se puede obtener un beneficio de la misma, es decir, que la única razón para explotar una fuente energética es porque la energía que podemos capturar y aprovechar es mayor a la que se invierte en el proceso. Este exceso de energía que queda disponible una vez que todos los costos energéticos se han tenido en cuenta es lo que se conoce como energía neta o superávit energético y representa el verdadero valor de un recurso energético, ya que esta es la energía que una sociedad puede emplear para todas aquellas otras actividades que no están relacionadas de forma directa con la obtención de la energía, en esta categoría se encuentra la producción de alimentos, los servicios de educación, los servicios de salud, la producción de computadoras, celulares, ropa, construcción de casas y edificios, etc. Todo en el quehacer humano requiere de energía neta.

En la Figura I-1 se ha ilustrado un esquema de los flujos energéticos entre el sistema o sector energético y la sociedad. El sistema energético se encarga de capturar los flujos energéticos naturales presentes en el medio ambiente y transformarlos en una forma que sea útil para ser utilizada por las sociedades humanas que hemos denotado con la letra *E*, parte de esta energía es utilizada por el propio sector para mantener todas sus operaciones en marcha, debe entenderse que este consumo energético se compone no solo por el realizado de forma directa utilizado, por ejemplo, en la operación de la maquinaria involucrada, sino que también queda integrado por todos los costos energéticos indirectos, como lo puede ser la propia construcción de la maquinaria. La energía que queda una vez que la demanda propia del sistema energético ha sido cubierta es la energía neta disponible para la sociedad.

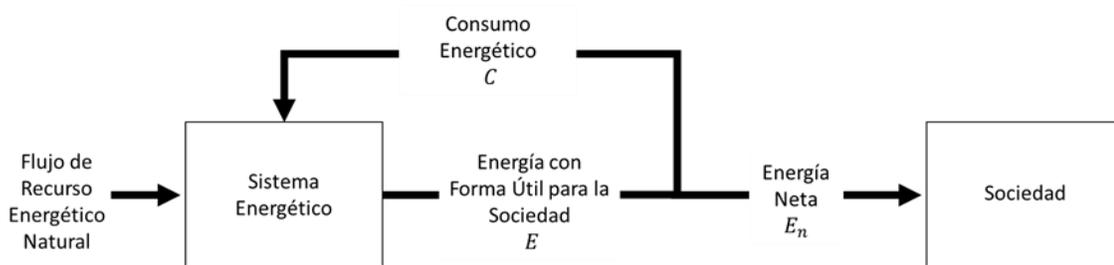


Figura I-1 Flujos energéticos entre el sistema energético y la sociedad.

La construcción del concepto de energía neta y el entendimiento de su importancia para el desarrollo de las sociedades humanas es un trabajo que ha sido realizado por distintos autores cuyos campos de conocimiento abarcan la antropología, la sociología, la ecología, la economía, entre otros. Por ejemplo, en un trabajo de 1943 el antropólogo Leslie White [1] argumenta que el desarrollo de las sociedades humanas solo se hace posible incrementando la cantidad de energía que se consume per cápita, aumentando la eficiencia de los mecanismos con los cuales se utiliza la energía disponible o una combinación de ambos factores. White deja claro en su trabajo que una sociedad humana solo puede hacerse de energía invirtiendo primero una cierta cantidad de la misma y que la diferencia entre ellas debe ser siempre positiva, de otra forma la sociedad sencillamente perece. Para este autor el gran desarrollo que ha experimentado la civilización humana está en función del incremento en las cantidades de energía que se utilizan, la eficiencia con la cual se hace lo anterior y el aumento en el retorno de las inversiones energéticas, en este contexto la invención de la agricultura representa un punto clave en la historia de la humanidad al incrementar no solo la cantidad de energía disponible para los humanos, en forma de alimentos, sino también al aumentar los retornos energéticos por cada unidad de energía invertida en el proceso. Otro ejemplo se encuentra en el trabajo del sociólogo Fred Cottrell [2], quien define en 1955 el concepto de superávit energético para referirse a la diferencia entre la cantidad de energía que se recupera de un proceso de captación de energía y la invertida en el mismo. Cottrell identifica dos aspectos importantes en la relación entre la energía y el desarrollo de las sociedades humanas: (1) para encontrar nuevas fuentes de energía y extraerlas del medio ambiente es necesario invertir una

cantidad de energía previamente obtenida y (2) es necesario invertir una fracción de la energía disponible para poder proteger esta última de otros que quieran tomarla y utilizarla para su propio beneficio. En línea con la primera de estas características Cottrell argumenta que el superávit energético es la característica más importante de una fuente energética y es precisamente debido al gran superávit energético que entregan los combustibles fósiles que ha sido posible la gran expansión económica y social experimentada desde la Revolución Industrial, por esta misma razón es el superávit energético un límite para la expansión económica. De manera similar a Cottrell, el ecologista Howar Odum [3] define en 1973 el término de energía neta como la diferencia entre la energía total que puede obtenerse de una fuente energética y el costo total del proceso de obtención, señalando que la energía neta representa el verdadero valor de un recurso energético. Otros ejemplos de la noción de energía neta son expuestos por el economista Nicholas Georgescu-Roegen [4] y el experto en energía Vaclav Smil [5]. En 1975 Georgescu-Roegen apunta que si una fuente energética disponible tiene algún valor para el ser humano es porque dicha fuente es accesible. De acuerdo a este autor un recurso energético no es accesible para el ser humano si la cantidad de energía que se tiene que invertir para poder aprovecharle es mayor o igual a la que puede obtenerse del mismo, por lo que pueden existir muchos recursos energéticos disponibles pero no todos ellos son accesibles y por tanto no todos tienen valor para el ser humano. Por su parte Smil señala que la adquisición de energía por parte de las sociedades humanas no solo requiere de la creación y manipulación de infraestructura que por sí sola consume cantidades de energía considerables, sino que además se requieren de sistemas intangibles como la organización y logística para poder operar el sistema energético, todo ello implicando un costo energético adicional. Para Smil el costo energético de la energía es un factor crítico para evaluar la viabilidad de cualquier fuente de energía ya que solo aquellas fuentes con altos retornos son capaces de crear sociedades prósperas en donde los individuos puedan gozar de tiempo libre para dedicarse a otras actividades.

Matemáticamente el superávit energético o energía neta se define de acuerdo a la expresión (I-1), en donde E se refiere a la energía total que se obtiene de un recurso energético y C es la cantidad total de energía invertida en el proceso.

$$E_n = E - C \quad (I-1)$$

1.2. El Concepto de EROI

Basado en la idea de energía neta, Charles Hall [6] desarrolló el concepto de EROI (Energy Return On Investment) que se refiere al cociente entre la energía obtenida mediante un proceso de captación de energía y la invertida en dicho proceso (ver adelante), aquí tanto el numerador como el denominador se miden con las mismas unidades (e.g. calorías, joules, barriles, etc.) y por tanto se trata de un valor adimensional. El EROI se refiere a la cantidad de energía que se gana en algún proceso de obtención energética y no debe ser confundido con el concepto de eficiencia energética el cual se refiere a un proceso de transformación, por lo que un valor de EROI, por ejemplo de 25, debe interpretarse como: una ganancia de 25 unidades de energía por cada unidad invertida en el proceso de obtenerle. De acuerdo a la definición matemática del EROI cualquier fuente que cuente con un valor mayor a la unidad entrega más energía de la que se invierte en explotarle, por el contrario si el EROI es menor o igual a uno, entonces se tiene que la inversión energética es mayor o igual a la ganancia.

$$EROI = \frac{\text{Energía obtenida mediante un proceso de captación de energía}}{\text{Energía invertida en el proceso}}$$

Antes de aplicar el concepto de retorno energético a las fuentes de energía que utilizan las sociedades humanas Hall [7] lo concibió y utilizó para estudiar y entender los costos y ganancias energéticas del proceso de migración de los peces, concluyendo que dicho proceso resulta en una ganancia de energía neta para las especies involucradas. Tal y como explica Hall [8], desde una perspectiva biológica para que un organismo vivo pueda sobrevivir, adaptarse a su medio ambiente, explotar los recursos naturales y reproducirse, debe ser capaz de obtener más energía de la que invierte en los procesos

de obtención, ya que de otra manera dicho organismo perece. El termino EROI apareció por primera vez en 1979 y aunque el concepto fue bastante popular en aquel tiempo la caída en los precios del petróleo durante la segunda mitad de los años 80 disminuyo el interés académico en el mismo [6]. No fue hasta el año 2005, con el incremento continuo en los precio del petróleo, que se reanudo el interés por el concepto de EROI y con ello la publicación de una gran cantidad de artículos al respecto [6]. En el año 2011 la revista suiza de libre acceso Sustainability publicó un número completo sobre el tema [9].

1.3. El Índice de Retorno Energético (IRE)

Como se ha mencionado antes, el EROI resulta de realizar el cociente entre la energía que se obtiene de una fuente energética y aquella invertida en el proceso de explotarle. Un aspecto de suma importancia durante este tipo análisis son las consideraciones que se tienen en cuenta al determinar cuestiones como: la delimitación del sistema bajo estudio, los diferentes tipos de entradas y salidas de energía que ocurren desde y hacia la fuente de energía que se explota, consideraciones temporales o la implementación de perspectivas “top-down” o “bottom-up”. Es debido a la existencia de esta gran cantidad de variables que se pueden tomar en cuenta al estudiar la explotación de un recurso energético que dentro de la literatura especializada se han calculado y medido una gran variedad de indicadores energéticos, todos ellos comparando flujos de entrada y salida de energía, y los cuales, están en función de las distintas consideraciones y metodologías adoptadas por el autor que los mide. Es por lo anterior que una forma mucho más general de referirse a la idea o concepto de EROI es mediante el término de índice de retorno energético (IRE) [10] [11] [12]². De esta manera, aunque conceptualmente dos IRE pueden referirse a lo mismo, el costo energético de obtener energía o dicho de otra manera ambos comparan flujos de entrada y salida, cuantitativamente pueden resultar no ser del todo comparables como consecuencia de las

² La formulación original de este concepto es en el idioma inglés y se puede encontrar como ERR (energy return ratio), aquí se ha utilizado el término IRE como traducción de este término.

consideraciones hechas por el autor que mide el indicador, teniendo como consecuencia que pueda surgir cierta ambigüedad entre los resultados obtenidos. En este contexto existen, por ejemplo, amplios debates académicos alrededor de fuentes energéticas como el biocombustible generado a partir de maíz en Estados Unidos o la energía eléctrica generada a partir de sistemas fotovoltaicos. En el caso de los biocombustibles existe la discusión respecto a si son o no una fuente de energía neta, con lo que se quiere decir que si la energía que se puede obtener de ellos es mayor a la que debe invertirse para obtenerle. Al respecto existen trabajos como el de Pimentel y Patzek [13] quienes calculan un IRE de 0.82 para la producción etanol a partir del maíz, resultado a partir del cual no es posible considerar este recurso como una fuente de energía debido a que debe invertirse más energía para obtenerle de la que se puede aprovechar del mismo. Por otro lado existen trabajos como el de Kim y Dale [14] quienes, contrario a lo anterior, lo posicionan como un claro productor marginal de energía neta al calcular un IRE con un valor de 1.73. En una revisión realizada en 2011 por Hall, Dale y Pimentel [15] respecto a los dos trabajos mencionados anteriormente se concluye que la diferencia en los resultados obtenidos ocurre principalmente debido a las distintas consideraciones hechas en cuanto a los costos energéticos, aunque también contribuyen las diferencias en la información utilizada y los límites del sistema estudiado. Otro ejemplo es el caso de la energía solar fotovoltaica. Aquí se tienen por ejemplo trabajos como el de Ferroni y Hopkirk [16] cuyas estimaciones para el IRE del sistema fotovoltaico en regiones con niveles de insolación moderada se encuentran por debajo de la unidad ($IRE < 1$), lo cual implica que se invierte más en energía en este tipo de sistemas de la que se puede obtener de los mismos. Por otro lado, Weißbach y colaboradores [17] calculan un IRE para este sistema en Alemania con un valor de 3.9, aunque este se ve reducido a 1.6 cuando se tienen en cuenta los costos energéticos asociados a los sistemas de almacenamiento de energía necesarios para hacer frente a momentos de alta demanda. Resultados similares son reportados por Prieto y Hall [18] quienes obtienen un valor de 2.45 para el caso de la energía fotovoltaica en España. El trabajo realizado por estos autores es quizá el más completo en cuanto a la inclusión de los costos energéticos asociados a este tipo de sistema energético ya que se basa en la experiencia concreta de 10 años de desarrollo de

esta fuente en el país ibérico. Del otro lado se tienen trabajos como el realizado por Raugei y colaboradores [19] quienes reportan valores para el IRE asociado a esta fuente energética con rangos entre 6 y 12 e incluso mayores. De acuerdo con Hall [8] la diferencia en los resultados de estos trabajos radica en el costos energéticos que se están incluyendo y dejando fuera del análisis.

La posibilidad de obtener distintos resultados al medir el IRE de un recurso energético dependiendo de la metodología, procedimiento y consideraciones acuñadas por cada autor constituye una de las críticas que ha recibido el concepto [8] [6] [20], en respuesta a ello se ha sugerido la estandarización de los indicadores y procedimientos utilizados (por ejemplo en [10] [12] [20] [11] [21] [22] [23]) con la finalidad de contar una herramienta práctica que permita comparar de manera adecuada las distintas fuentes energéticas disponibles para las sociedades humanas. Dentro de las principales conclusiones de estos esfuerzos se encuentran: dejar claros los límites del sistema estudiado, utilizar metodologías transparentes, hacer uso de la mejor información disponible y una comparación justa entre diferentes fuentes de energía solo es posible mediante el uso de metodologías y conceptos estandarizados. En vista de lo expuesto anteriormente parece que se debe aceptar el hecho de que no existe una única manera de realizar el análisis de una fuente de energía y el cálculo del IRE depende de la metodología y consideraciones adoptadas por cada autor, a su vez la utilidad e información que se puede extraer de los IRE calculados depende de su formulación y de las preguntas en cuestión [10].

Aunque la aplicación práctica del concepto de IRE se ha y sigue enfrentando ciertas dificultades, la formulación teórica del concepto junto con sus implicaciones para las sociedades humanas resultan sencillas e intuitivas y no pierden validez frente a las dificultades técnicas. La idea general detrás de todo IRE es capturar la realidad de que obtener energía cuesta energía, por lo que todo IRE compara la cantidad de energía que puede obtenerse o extraerse mediante un proceso y recurso dado contra la que debe invertirse en este proceso, entre mayor sea este indicador, todo lo demás igual, mayor es el beneficio que puede obtener una sociedad de una fuente energética, por lo tanto el IRE es un medio para evaluar y comparar la productividad de las distintas fuentes energéticas

disponibles para las sociedades humanas. Matemáticamente el IRE puede formularse de acuerdo a la expresión (I-2), en donde E se refiere a la cantidad total de energía que puede obtenerse de un proceso de captura y C a la energía que se consume durante ejecución de dicho proceso, en las siguientes subsecciones se revisan algunas de las distintas consideraciones que pueden contemplarse al construir estos términos. Por su formulación matemática solo puede considerarse como fuente de energía a aquellos sistemas, recursos o tecnologías que cuenten con un $IRE > 1$, por el contrario cuando el indicador sea menor o igual a la unidad se está frente a un sumidero de energía, esto es, un recurso en el que se invierte más energía de la que puede obtenerse de él.

$$IRE = \frac{E}{C} \quad (I-2)$$

Tal y como se discute en los trabajos de Brandt y Dale [10], Mulder y Hagens [21], King y colaboradores [12] y con mayor detalle por Murphy y colaboradores [23], existen tres dimensiones principales sobre las cuales se pueden trazar los límites al estudiar una fuente energética y definir el IRE que la caracteriza: las salidas del sistema, las entradas al sistema y el tiempo. Como se ha expuesto, parte de la controversia alrededor de los resultados obtenidos para fuentes energéticas como la energía solar fotovoltaica o los biocombustibles surge como consecuencia de las diferencias realizadas al establecer estos límites, a continuación se presentan las principales características de ellos.

1.3.1 Delimitación de las Salidas y Entradas de Energía al Sistema

Dentro de un proceso de extracción y conversión de energía se toman recursos energéticos del medio ambiente y se procesan mediante una serie de etapas para posteriormente ser transportados y así suministrar a la sociedad de un conjunto de distintos productos energéticos terminados. Un punto crucial al estudiar estos procesos y calcular el IRE asociado es delimitar de forma explícita la etapa en la cual se estudia al

sistema. Para los autores Hall, Balogh y Murphy [24] existen tres niveles básicos que se pueden diferenciar dentro del proceso de obtención de energía, el primero de estos niveles compromete el punto de extracción incluyendo los requerimientos energéticos para encontrar y extraer el recurso, el segundo nivel contempla los procesos de conversión y transporte junto con los costos energéticos asociados a ello y finalmente el tercer nivel además de todo lo anterior incluye los requerimientos energéticos que se necesitan cubrir para hacer uso de la energía obtenida (e.g. la construcción de un automóvil, carreteras, etc.). Hall, Balogh y Murphy utilizan los términos “mine-mouth”, “point-of-use” y “extended” para referirse al primer, segundo y tercer nivel, respectivamente. La Figura I-2 se ha adaptado del trabajo de Court [25] y sirve para ilustrar dichos niveles de estudio, aquí en un primer nivel durante la extracción del recurso, en este caso petróleo, se obtiene un equivalente energético de 100 [MJ], para ello se requiere una inversión total de 4 [MJ] compuesta por 2 [MJ] que se consumen de forma directa y 2 [MJ] en forma de capital (e.g. energía requerida para fabricar tuberías), con estos números es posible definir el IRE_{mm} como el cociente entre la energía obtenida y la energía total invertida resultando en un valor de 25 (100/4). En el siguiente nivel se requieren un total de 6 [MJ] para poder refinar los 100 [MJ] de petróleo provenientes de la etapa anterior, este consumo total está compuesto por 5 [MJ] que se utilizan de forma directa y 1 [MJ] en forma de capital, por lo tanto para entregar 95 [MJ] de combustible fósil refinado se tienen que consumir un total de $2+2+1+5 = 10$ [MJ], lo anterior resulta en un IRE_{pou} con un valor de 9.5 (95/10). Finalmente para poder utilizar esos 95 [MJ] de combustible fósil por el resto de la sociedad esta requiere realizar una inversión extra de 9 [MJ] para poder construir los medios y mecanismos que se lo permitan, contemplando estos costos energéticos se define IRE_{ext} con un valor igual a 5 (95/(10+9)). Tal y como puede observarse en este ejemplo conforme se extienden los límites de estudio el índice de retorno energético se reduce, por lo anterior se tiene que $IRE_{mm} > IRE_{pou} > IRE_{ext}$.

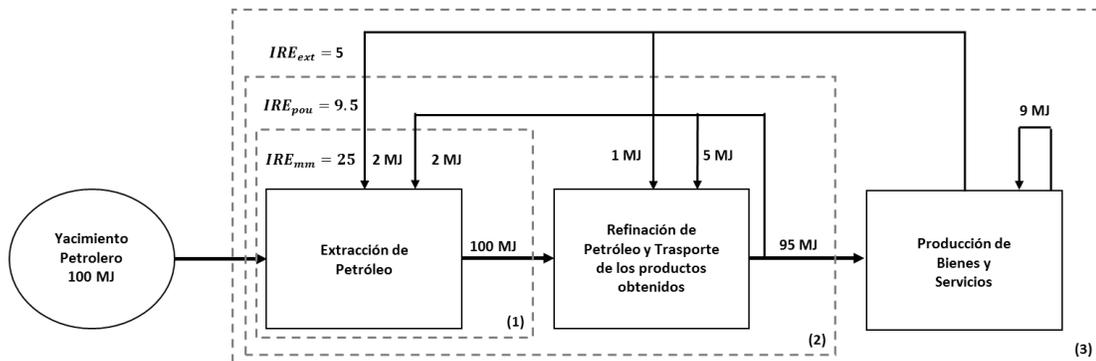


Figura I-2 Distintos límites dentro de los cuales se puede estudiar el IRE de un proceso de captación de energía. Adaptado de [25].

De acuerdo con Murphy y colaboradores [23] una vez que uno de estos niveles ha sido seleccionado entonces se puede definir qué es lo que se debe contar como salida del sistema. Una de las problemáticas recurrentes al definir esta salida del sistema gira alrededor de los coproductos obtenidos, por ejemplo, es normal que durante la extracción de petróleo también se obtenga gas y si bien este último también es una fuente de energía y puede incorporarse al numerador que define al IRE, surge la cuestión de cómo deben repartirse los costos energéticos entre estos productos, esto es, cuánto del consumo energético debe asignarse exclusivamente a la extracción del petróleo y cuánto es propio del aprovechamiento del gas. De forma similar durante la etapa de refinación se obtienen productos que no son o no pueden ser aprovechados como recursos energéticos (e.g. lubricantes, ceras, asfalto, etc.) y al igual que en el ejemplo anterior se tiene la situación de cómo deben considerarse los costos energéticos asociados a estos. Algunas propuestas para hacer frente a esta situación son: realizar la asignación de costos energéticos de acuerdo a la masa, el contenido energético o de acuerdo al precio del producto, en cada caso la división de los costos es diferente y no es claro cuál de los procedimientos es el mejor [23]. Otro enfoque para tratar esta cuestión se discute en el trabajo de los autores Mulder y Hagens [21] quienes proponen la creación de un IRE mucho más complejo al incorporar los coproductos no energéticos, pero útiles para la sociedad, haciendo uso de factores de conversión apropiados (e.g. contenido energético por unidad de masa).

La segunda dimensión sobre la cual se pueden establecer los límites dentro de los que se estudian los procesos de captación de energía está constituido por las entradas al sistema, cada una de las etapas involucradas en el proceso de extracción, conversión y transporte de energía consume energía, este consumo se realiza tanto de forma directa como indirecta y define el denominador que construye al IRE, la Figura I-3 es una ilustración de estos flujos. En cuanto al consumo directo de energía este puede cubrirse tomando cierta cantidad del flujo que se está produciendo y por tanto constituye un autoconsumo (e.g. quema de gas extraído para generar energía eléctrica en el punto de extracción) o puede satisfacerse incorporando recursos energéticos que se generan fuera del ciclo bajo estudio (e.g. consumo de energía eléctrica generada fuera del ciclo bajo estudio), Brandt y Dale [10] definen estos flujos de energía hacia el sistema como internos y externos, respectivamente. También se debe considerar el consumo de energía que ocurre fuera del sistema bajo estudio, este consumo sucede en otro punto de la economía y es necesario para poder suministrar al sistema de todos los materiales e infraestructura que requiere para llevar a cabo sus labores (e.g. fabricación de tuberías, construcción de plataforma petrolera, etc.). Calcular el consumo de energía que se realiza de forma indirecta es una tarea complicada y habitualmente se realiza transformando información que se encuentra en unidades monetarias (e.g. dólares invertidos en tuberías) a unidades de energía mediante el uso de un valor de intensidad energética (e.g. joules/dólar) apropiado [23]. Otro tipo de costo energético lo representa la fuerza laboral, esto es la energía que se consume para que el trabajador pueda cubrir sus necesidades básicas y las de su familia como lo es el alimento, hogar y ropa y así pueda mantenerse en sus actividades económicas, si bien resulta un hecho claro que los trabajadores deben consumir cierta cantidad de energía para poder mantenerse, parece no existir un consenso sobre si se debe o no incorporar este consumo al estudiar un proceso de obtención de energía y de hacerse cuál es la mejor manera de realizarlo [26] [27].

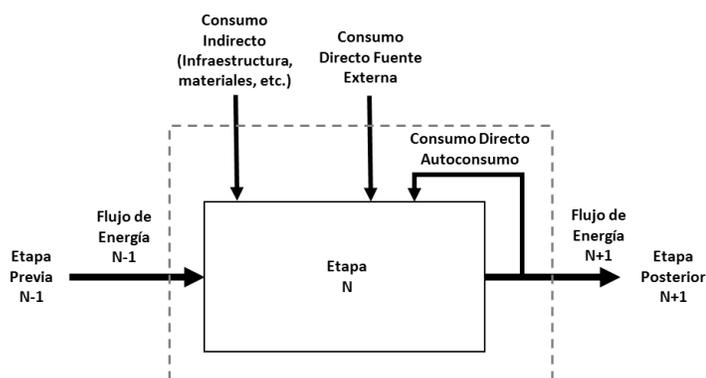


Figura I-3 Representación de los distintos flujos de energía que pueden ocurrir durante la extracción de un recurso energético del medio ambiente. Adaptado de [10].

De forma adicional a las consideraciones que se han subrayado arriba es posible incluir aquellos eventos denominados como externalidades [23] [21]. Durante la explotación de cualquier recurso energético natural suceden una serie de situaciones que no son deseables para la sociedad ya que pueden llegar a impactar de forma negativa sobre la calidad de vida que esta dispone en el presente o en el futuro, como ejemplo de esto se puede pensar en la contaminación del aire, del agua, erosión del suelo, pérdida de hábitats naturales, etc. De acuerdo con los autores Mulder y Hagens [21] existen dos maneras de incorporar estos impactos durante el estudio del índice de retorno energético particular de una fuente de energía. En el primer caso se propone la creación de indicadores separados en donde se considere el cociente entre la energía que se obtiene y la externalidad que se genera. Como segunda opción se propone la incorporación del equivalente energético de la externalidad considerada, lo anterior se logra al calcular la cantidad de energía que se requiere consumir para poder prevenir o mitigar este evento, una vez calculado este consumo indirecto debe ser incluido en el denominador del IRE.

Como consecuencia de las distintas opciones que se pueden tener al considerar el consumo energético que ocurre durante un proceso de obtención de energía se generan varios niveles de estudio dentro de los cuales se incorporan o dejan fuera alguno o varios de estos costos energéticos. Murphy y colaboradores [23] ilustran este hecho mediante una clasificación de cinco niveles (ver Figura I-4) dentro de la cual cada nivel expande la cantidad de entradas al sistema, en el primer nivel solo se considera el consumo directo

que ocurre por autoconsumo, en el segundo nivel además de lo anterior se incluye el consumo directo que se satisface con recursos energéticos que provienen del resto del sistema energético, en el tercer nivel se incorpora la energía utilizada para proveer todos los materiales utilizados, mientras que los niveles cuatro y cinco consideran el consumo energético realizado para mantener a los trabajadores y otros servicios económicos utilizados respectivamente.

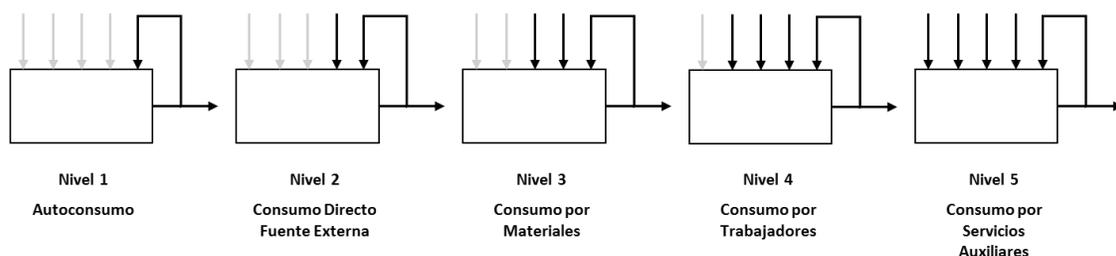


Figura I-4 Distintos niveles de estudio para el consumo de energía. Adaptado de [23].

Con lo expuesto hasta este momento es posible apreciar la gran variedad de entradas y salidas de energía que ocurren desde y hacia una fuente energética que se explota, una de las situaciones que surge alrededor de este hecho es la problemática de cómo comparar distintas fuentes de energía que dan origen a estos flujos. Por ejemplo, durante la extracción del petróleo también puede ocurrir que se obtengan gas y líquidos del gas, por lo que si bien es posible reducir la salida del sistema a una unidad de energía común (e.g. joules, barriles de petróleo equivalente, etc.) mediante un valor de conversión adecuado, regularmente poder calorífico, dicho procedimiento ignora por completo las diferencias en, por ejemplo, calidad y utilidad que tienen cada uno de los recursos energéticos obtenidos. Para el caso de las entradas al sistema o consumo de energía realizado, la situación es similar toda vez que este consumo puede satisfacerse con energía proveniente de distintas fuentes. Con la finalidad de hacer frente a esta situación se han propuesto distintos métodos de corrección que pueden aplicarse tanto a las entradas como a las salidas del sistema y que tienen como objetivo lograr capturar las diferencias cualitativas que existen entre los distintos recursos energéticos, estos métodos

hacen uso de propiedades económicas como el precio del recurso en el mercado o propiedades físicas como la exergía³ para determinar el factor de ponderación que debe ser asignado a cada unidad de energía que se entrega o utiliza durante los procesos de obtención de energía según sea la fuente de origen. Discutir con detalle los argumentos detrás de la necesidad de realizar correcciones por cualidad así como los métodos propuestos para ello queda más allá de los objetivos y alcances del presente trabajo. Los trabajos de Cleveland [26] y Murphy y colaboradores [23] representan buenas referencias en donde este tema se discute a profundidad.

1.3.2 Construcción del IRE en Función de Distintas Entradas y Salidas de Energía

Como se ha discutido existen una amplia variedad de opciones que se pueden incluir o dejar fuera al estudiar los flujos de energía que ocurren durante la obtención de la misma, por lo anterior aunque conceptualmente dos IRE se refieran a los mismo, cuantitativamente pueden resultar no ser comparables como resultado de las diferencias que se tienen al construir el numerador y denominador que dan forma a este cociente. Autores como Mulder y Hagens [21], Murphy y colaboradores [23] y Brandt y Dale [10] han propuesto algunas clasificaciones para los mismos. Mulder y Hagens [21] proponen una clasificación de dos dimensiones, la primera de ellas define qué es lo que se va a incorporar al estudio y la segunda cómo va a ser incorporado. Respecto a la primera dimensión se tiene la clasificación del EROI como de primer, segundo y tercer orden. El EROI de primer orden considera solo la producción de energía y el consumo directo de recursos energéticos y no energéticos. El EROI de segundo orden además de lo anterior debe incorporar el consumo indirecto (tanto energético como no energético) además de dar un valor a los coproductos obtenidos. Finalmente el EROI de tercer orden incluye las externalidades. En cuanto a la segunda dimensión propuesta por Mulder y Hagens se tiene

³ De acuerdo con Cleveland [26], la exergía se puede definir como la cantidad máxima de trabajo útil que se puede extraer de un flujo de energía.

una distinción entre EROI, EROI Total y EROI Multicriteria dentro de cada uno de los cuales se trabaja de forma distinta la incorporación de recursos no energéticos como el uso de agua o tierra y las externalidades, en el primero de ellos estos factores sencillamente son ignorados, en el segundo se incorporan de acuerdo a algún equivalente energético (e.g. energía requerida para mitigar las emisiones de gas efecto invernadero) y en el tercero se tratan como factores independientes (e.g. cantidad de energía producida por litros de agua utilizados).

Otro ejemplo de clasificación se puede encontrar en el trabajo de Murphy y colaboradores [23] quienes también proponen una clasificación de acuerdo a dos dimensiones, las entradas y salidas del sistema, la Tabla I-1 es una reproducción de dicha clasificación. Aquí la primera dimensión define el tipo de entradas que se están incorporando al estudio, estas entradas se corresponden con las ilustradas en la Figura I-4. La segunda dimensión indica el punto en el cual se están evaluando las salidas del sistema, esto de acuerdo a la Figura I-2. De acuerdo con estos autores el indicador estándar y que sirve como herramienta de comparación entre distintas fuentes de energía se define en el punto de extracción e incluye el consumo de energía directo, tanto interno como externo, así como el consumo de energía indirecto que ocurre por el uso de materiales dentro del punto de extracción. En la literatura existe cierta discusión respecto a esta estandarización, se tienen por ejemplo posturas como la de Hall [8], creador del concepto de EROI, quien argumenta que el indicador debe ser medido en el punto de extracción o generación (e.g. extracción de petróleo, generación de energía eléctrica a partir de fuente eólica) ya que el interés al calcular el EROI es conocer el costo energético de obtener la energía desde su fuente de origen en la naturaleza, mientras que para autores como Raugei [28] no resulta posible una comparación haciendo uso de este indicador estándar entre fuentes renovables, como la energía eólica, cuyo producto es energía eléctrica la cual es directamente utilizable por la sociedad y fuentes como el petróleo el cual no tiene utilidad alguna para la sociedad sin antes ser refinado, además de que para el caso de las energías renovables es difícil establecer la diferencia entre el punto de extracción y punto de uso. En sintonía con esto último, autores como Brandt y

Dale [10] apuntan a que los IRE tienen mayor utilidad cuando se utilizan para comparar dos procedimientos que tienen como resultado final recursos energéticos similares.

Tabla I-1 Distintas clasificaciones del EROI en función de las entradas y salidas que se incorporan al estudio. Adaptado de [23].

<i>Entradas Salidas</i>	1) Extracción (mm)	2) Proceso (pou)	3) Uso Final (ext)
Consumo Interno y Materiales	$EROI_{1,d}$	$EROI_{2,d}$	$EROI_{3,d}$
Consumo Externo y Materiales	$EROI_{standar}$	$EROI_{2,i}$	$EROI_{3,i}$
Consumo Indirecto por Trabajadores	$EROI_{1,lab}$	$EROI_{2,lab}$	$EROI_{3,lab}$
Consumo Indirecto por Servicios Auxiliares	$EROI_{1,aux}$	$EROI_{2,aux}$	$EROI_{3,aux}$
Externalidades	$EROI_{1,env}$	$EROI_{2,env}$	$EROI_{3,env}$

La clasificación de los autores Murphy y colaboradores [23] resulta un tanto estricta al incorporar el consumo indirecto presente en los materiales utilizados durante los procesos de obtención de energía, Court [25] ofrece una adaptación de esta clasificación que parece un poco más relajada mostrando una incorporación de los consumos energéticos mucho más acorde a los niveles ilustrados en la Figura I-4. El EROI estándar de la Tabla I-1 está representado como $EROI_{1,ind}$ en la Tabla I-2.

Tabla I-2 Adaptación de la clasificación presentada en la Tabla I-1. Adaptado de [25].

<i>Entradas Salidas</i>	1) Extracción (mm)	2) Proceso (pou)	3) Uso Final (ext)
Consumo Interno	$EROI_{1,int}$	$EROI_{2,int}$	$EROI_{3,int}$
Consumo Externo	$EROI_{1,ext}$	$EROI_{2,ext}$	$EROI_{3,ext}$
Consumo Indirecto por Materiales	$EROI_{1,ind}$	$EROI_{2,ind}$	$EROI_{3,ind}$
Consumo Indirecto por Trabajadores	$EROI_{1,lab}$	$EROI_{2,lab}$	$EROI_{3,lab}$
Consumo Indirecto por Servicios Auxiliares y Externalidades	$EROI_{1,aux}$	$EROI_{2,aux}$	$EROI_{3,lab}$

Otras construcciones para el IRE se pueden encontrar en el trabajo de los autores Brandt y Dale [10] quienes definen cuatro indicadores diferentes. Estos autores definen el NER (Net Energy Return) y el GER (Gross Energy Return), el primero de ellos se refiere

a un cociente entre la energía neta que entrega un sistema de captación de energía y la energía total invertida en este proceso, en donde se incluye consumo directo, interno y externo, y consumo indirecto. Por su parte el GER a diferencia del anterior considera el total de energía obtenida. Por otro lado estos autores ofrecen las definiciones de NEER (Net Energy External Ratio) y GEER (Gross Energy External Ratio), estos indicadores consideran únicamente el consumo de energía que proviene de fuentes externas a la que se está explotando, y al igual que el par anterior uno considera la energía total obtenida mientras que el otro solo las cantidades netas.

Otros indicadores definidos dentro de la literatura se pueden encontrar en el trabajo de Brandt, Dale y Barnhart [22], aquí se incluyen el índice de intensidad energética el cual mide la cantidad de energía que es necesario invertir para obtener una unidad de energía para demanda final y por tanto es equivalente al inverso del índice NER. También se tiene el índice FER (Fossil Energy Ratio) el cual compara la cantidad de energía que se obtiene de una fuente energética contra la que se consume y es exclusivamente de origen fósil. El AER (Absolute Energy Ratio) es equivalente a una eficiencia a nivel sistema, este indicador incorpora junto con los costos energéticos la energía que se está procesando y por ello siempre es menor a la unidad, al inverso de este indicador se le denomina como UER (Upstream Energy Ratio).

1.3.3 Consideraciones Temporales al Estudiar el IRE

La tercera dimensión sobre la cual se pueden establecer los límites al estudiar un proceso de obtención de energía es el tiempo. La Figura I-5 es una representación de los flujos que pueden ocurrir a lo largo de la vida de un proyecto. En un inicio es necesario invertir cierta cantidad de energía $E_{c,c}$ para construir y establecer las instalaciones que permitirán extraer energía del medio ambiente. Una vez que el proyecto comienza entonces se obtiene cierta cantidad de energía \dot{E}_o de forma anual, esta cantidad puede variar a lo largo de la vida útil del proyecto. A la par de esta producción se requiere cierta cantidad de consumo $\dot{E}_{c,op}$ que permite operar la infraestructura y llevar a cabo todas las

actividades necesarias para mantener un flujo de energía hacia la sociedad. Finalmente, una vez que se cumple el tiempo de vida útil, es necesario un consumo de energía adicional $E_{c,d}$ con el objetivo de poder desmantelar toda la infraestructura y equipos instalados.

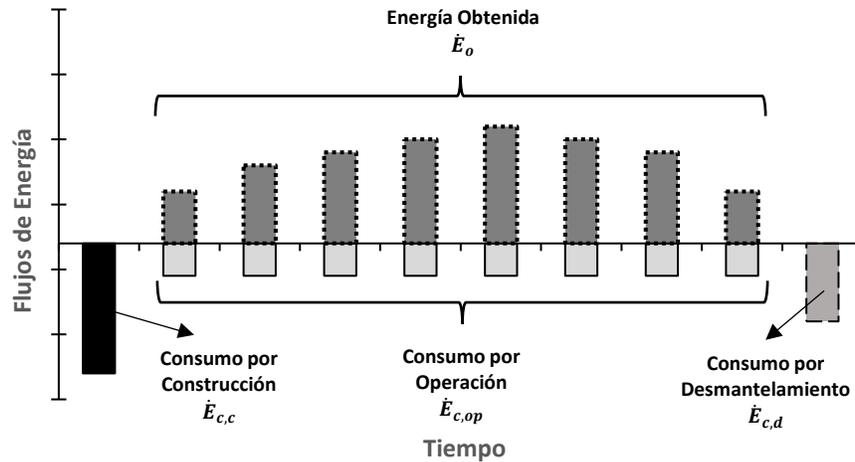


Figura I-5 Flujos de energía durante el ciclo de vida de un proyecto de extracción de energía. Adaptado de [27].

Considerando lo anterior es necesario resaltar que existen dos enfoques para trabajar la dimensión temporal de un proceso de obtención de energía, dichos enfoques consisten en considerar flujos anuales o cantidades acumuladas totales a lo largo del ciclo de vida [23] [12]. Si se define E_o como la cantidad total de energía recuperada a lo largo de la vida útil del proyecto bajo estudio, esto es la suma de las cantidades anuales \dot{E}_o , y $E_{c,op}$ como el consumo de energía total acumulado durante el tiempo de operación, que a su vez se corresponde con la suma de las cantidades $\dot{E}_{c,op}$, entonces es posible definir a la cantidad total de energía neta (acumulada) obtenida como:

$$E_{n,tot} = E_o - (E_{c,c} + E_{c,op} + E_{c,d})$$

Siguiendo lo anterior se define el IRE correspondiente al ciclo de vida total de proyecto como:

$$IRE_{tot} = \frac{E_o}{E_{c,c} + E_{c,op} + E_{c,d}}$$

Por otro lado, si se desea estudiar el comportamiento dinámico del proceso, entonces se requiere trabajar con los flujos anuales de estas cantidades. De acuerdo con Murphy y colaboradores [23] una de las grandes suposiciones que se realiza al utilizar este enfoque dinámico, es que los retornos energéticos de estas inversiones ocurren al mismo tiempo, situación que no necesariamente es verdadera ya que una inversión energética en el presente puede encontrar su beneficio en un tiempo posterior. Una de las problemáticas que surge alrededor de las dos perspectivas dentro de las cuales se puede trabajar la dimensión temporal es que matemáticamente cuentan con construcciones distintas y por lo tanto no es posible utilizar el mismo término para referirse a ellas. Esta situación ha sido señalada por King y colaboradores [12] quienes apuntan que dentro de la literatura especializada el término EROI ha sido utilizado de forma arbitraria sin hacer diferencia cuando se trata de flujos anuales o cantidades acumuladas totales, lo cual, de acuerdo con estos autores, genera ambigüedad alrededor del concepto. En respuesta a lo anterior King y colaboradores han propuesto el uso de los términos PRR (Power Return Ratio) y ERR (Energy Return Ratio) en donde el primero trabaja con flujos anuales, flujos de energía por unidad de tiempo y por ende el término potencia, mientras que el segundo trabaja con cantidades totales de energía durante el ciclo de vida.

Teniendo presente lo anterior resulta evidente que no es posible hacer una comparación estricta entre un IRE que ha sido calculado utilizando flujos anuales y otro obtenido haciendo uso de cantidades totales. Antes de finalizar esta sección mostraremos que bajo ciertas suposiciones matemáticas es posible obtener un resultado que, al menos en forma teórica, permite comparar el ERR de una fuente con el PRR de otra. Para comenzar supóngase que las funciones $P(t)$ y $C(t)$ ambas continuas y positivas describen el comportamiento de la producción y consumo de energía durante el proceso de explotación de una fuente energética dada, durante el tiempo t_o que marca el inicio del proyecto y el tiempo t_f que marca el final del mismo. Para dicha fuente es posible definir

el PRR como el cociente entre la energía obtenida y la invertida en el proceso, esto es $PRR(t) = P(t)/C(t)$. Por otro lado si se denota con E_o y E_c a la cantidad total de energía recuperada y consumida con este fin respectivamente, durante el periodo entre t_o y t_f , entonces el ERR se define como $ERR = E_o/E_c$. Para relacionar los términos PRR y ERR se debe notar que la cantidad E_o es igual a la integral entre t_o y t_f de la función $P(t)$, esto es:

$$E_o = \int_{t_o}^{t_f} P(t) dt$$

Si se utiliza la definición funcional para el PRR es posible establecer que:

$$E_o = \int_{t_o}^{t_f} PRR(t) \cdot C(t) dt$$

Haciendo uso del Primer Teorema del Valor Medio para integrales es posible establecer que:

$$E_o = \overline{PRR} \cdot \int_{t_o}^{t_f} C(t) dt$$

En esta última expresión \overline{PRR} es igual al valor promedio ponderado de la función $PRR(t)$ en el intervalo entre t_o y t_f con respecto de la función $C(t)$. Además, si se nota que por definición $E_c = \int_{t_o}^{t_f} C(t) dt$ entonces se establece lo siguiente:

$$\overline{PRR} = \frac{E_o}{E_c} = ERR$$

Este último resultado nos indica que, bajo las suposiciones hechas, el ERR medido para una fuente energética es equivalente a un valor PRR promedio de la misma fuente. Con lo anterior se gana un poco de intuición sobre como comparar IRE que han sido medidos bajo consideraciones temporales distintas.

1.4. El IRE de Algunas Fuentes de Energía

Como se ha hecho notar en párrafos anteriores existe un amplio debate respecto a las metodologías y consideraciones que se deben tener al estudiar y determinar el IRE de una fuente energética, a pesar de ello se han llevado a cabo una gran cantidad de trabajos respecto al tema, en la Tabla I-3 se han resumido los resultados de algunos de ellos. Si bien una comparación justa y estricta entre distintas fuentes o regiones requiere de revisar a detalle los procedimientos y límites de estudio adoptados por cada autor para concluir las cifras aquí presentadas, los resultados de estos trabajos permiten establecer algunas conclusiones importantes. En primer lugar se tiene que el IRE para la extracción de petróleo y gas a nivel mundial se encuentra disminuyendo, lo anterior quiere decir que con el tiempo extraer estos recursos requiere de una mayor cantidad de energía y por ende es de esperar que el precio al cual es rentable su extracción también debe incrementar. Quizá la mejor explicación a este fenómeno sea la naturaleza humana del mínimo esfuerzo [29] [30] que conllevaría a explotar primero aquellos recursos que son de más fácil acceso y de menor inversión energética, conforme estos se van agotando las actividades tienden a mudarse hacia recursos que debido a sus características físicas, químicas, geográficas y geológicas requieren de un incremento en la cantidad de recursos que se deben invertir para poder aprovecharlos. Lo anterior queda retratado por el IRE que se ha medido para recursos clasificados como no convencionales dentro de los cuales se tiene a las arenas bituminosas en Canadá o las lutitas bituminosas en la Formación Green River en Estados Unidos, estos recursos tienen valores de retorno energético alrededor de 5 y 2 respectivamente valores que claramente resultan inferiores al promedio para la extracción de petróleo a nivel mundial con un valor estimado de 17 en 2012 y un máximo de 42 en 1942 (ver Tabla I-3). Otro tipo de recursos no convencionales son los denominados shale oil y shale y tight gas, recursos que para su explotación requieren de la implementación

de la técnica de fracturamiento hidráulico, el IRE estimado para este tipo de recursos deja ver que se trata de un claro aportador de energía neta, esto quiere decir que la energía que puede obtenerse de ellos es mucho mayor que la se invierte con esta finalidad, si bien estos resultados pueden mostrarse favorables para este tipo de recursos, se tiene que mencionar que en su gran mayoría los estudios realizados al respecto utilizan distintos modelos indirectos para estimar el consumo energético y no están basados en reportes hechos por las empresas que explotan estos recursos u organismos especializados, por lo anterior, aunque parece existir un conceso en la magnitudes encontradas (e.g. shale gas en Estados Unidos y China ver Tabla I-3) estas deberían tomarse con cierta cautela hasta que no existan nuevos trabajos sobre el tema. Sumado a lo anterior este tipo de recursos tienen en contra otras situaciones como una tendencia en la producción a declinar rápido y se encuentran asociados a una gran variedad de impactos ambientales directos, impactos que al igual que en el resto de los estudios citados no están contabilizados en términos energéticos. En resumen la situación para el petróleo y gas apunta a que el IRE de estos recursos está disminuyendo y que el valor máximo alcanzado ocurrió en algún punto en el pasado. Para el caso del carbón la situación no es igual toda vez que las estimaciones realizadas para este recurso no solo apuntan a que cuenta con altos valores de retorno energético sino que el valor máximo aún no se ha presentado [31], las implicaciones de este hecho deberían estudiarse a fondo.

Un aspecto quizá mucho más interesante es la comparación entre las fuentes fósiles y otras fuentes energéticas, como las nuevas energías renovables, de las cuales se supone dependerá el futuro de las sociedades humanas. Sobre esta línea parecen existir dos posturas dentro de la literatura, por un lado se tiene la perspectiva de autores como Hall [8] [6] quien propone que dicha comparación debe realizarse en el punto en el que se extrae el recurso de la naturaleza, en este sentido la estandarización del EROI se ha modelado para medir el retorno energético sobre este límite [23]. Por otro lado se tienen posturas como las de Raugei [28] quien sostiene que la comparación de dos fuentes energéticas distintas solo es posible en el punto en el que se genera un producto energético que tiene una forma útil para la sociedad (e.g. gasolina, electricidad). Siguiendo

el primer enfoque⁴ resulta claro que las nuevas renovables están lejos de alcanzar valores como los que se han estimado para la extracción de petróleo, gas y carbón, una diferencia que se incrementa cuando se tienen en cuenta los requerimientos energéticos necesarios para poder almacenar la energía eléctrica, aspecto que resulta necesario para poder hacer frente a los momentos de alta demanda y la intermitencia natural de estas fuentes, así mientras las estimaciones globales para la extracción de los combustibles fósiles muestran indicadores con un rango entre 17 y 95 en la actualidad, las energías renovables como la solar fotovoltaica tiene un rango estimado entre 1.6 y 10. Dentro del grupo de las energías renovables también se encuentra la energía hidroeléctrica, geotérmica y la eólica, todas con valores de retorno energético comparables a los de las fuentes fósiles, sin embargo, en el caso de la primera los mejores lugares para su explotación parecen ya haberse ocupado, para la segunda la explotación en volúmenes comerciales solo es posible en algunos pocos lugares del mundo y para la tercera considerar el costo energético para crear infraestructura que permita almacenar la energía eléctrica generada reduce considerablemente el IRE estimado de 16 a 3.9. Finalmente, la elaboración de combustibles líquidos a partir de biomasa reporta índices de retorno energético seriamente inferiores en comparación con los de los combustibles fósiles.

La postura tomada por Raugei invita a la comparación de fuentes energéticas en el punto en que éstas tienen su forma final y son útiles para la sociedad, siguiendo este argumento el autor sostiene que las fuentes renovables como la solar fotovoltaica compite en términos de energía neta con las fuentes fósiles como el petróleo una vez que este ha sido refinado y utilizado para la generación eléctrica [19]. Si bien el enfoque de Raugei parece aceptable en cuanto a la comparación de productos energéticos en su etapa final, comparar electricidad que es el producto final de las nuevas renovables contra la conversión de combustibles líquidos como el diésel o la gasolina en electricidad no lo parece tanto, debido a que según datos de BP [32] durante 2018 solo el 3% de la electricidad a nivel mundial fue generada a partir de derivados de petróleo, mientras que la generación a partir de renovables, sin incluir la energía hidroeléctrica, constituyó el 9%,

⁴ Aquí se debe notar que se está comparando el IRE asociado a la obtención de petróleo, gas y carbón contra el mismo indicador medido para fuentes energéticas, como las energías renovables, cuyo producto es energía eléctrica.

por otro lado carbón y gas constituyen el 61%, mientras que las fuentes nuclear e hidroeléctrica suman el 26%. Lo anterior deja claro que en la actualidad los combustibles líquidos no son un componente fuerte en lo que se refiere a la generación de electricidad, por lo que esto último no es el verdadero uso final que se da a estos productos energéticos, por ende una comparación de los mismos con las nuevas renovables quizá no es tan válida y de hecho de cierta manera resulta lógico que hoy, como muestran Raugei y colaboradores [28] [19] [33] [34], la generación de electricidad a partir de estas fuentes arroje IRE en rangos similares e incluso inferiores a fuentes como la solar fotovoltaica, de no ser así quizá las fuentes renovables no resultarían viables para su comercialización, contrario a la situación actual.

Siguiendo lo anterior parece más prudente comparar fuentes energéticas que tengan un uso final similar, derivados de petróleo con biocombustibles y fuentes de generación eléctrica entre ellas. En el caso de los primeros, son escasos los trabajos que estudian el IRE en el punto en el que el petróleo ha sido refinado, algunos resultados se han expuesto en la Tabla I-3, lo primero que debe notarse aquí es que hay una caída drástica en el IRE cuando el límite de estudio se extiende hasta la etapa de transformación, por ejemplo las estimaciones de Brockay y colaboradores [35] apuntan que a nivel mundial todos los combustibles fósiles refinados tenían un IRE alrededor de 7.5 en 2011, resultados similares se tienen para China y Chile durante años cercanos (ver Tabla I-3). Sin bien esto indica que los procesos de transformación y distribución consumen grandes cantidades de energía, disminuyendo drásticamente la cantidad de energía neta que se puede obtener de fuentes como el petróleo, se debe tener presente que el IRE no es de una naturaleza estática, tal y como lo reportan Brockway y col. [35], Feng y col. [36], y Brandt [37]. A nivel mundial el IRE de los combustibles refinados paso de un valor de 8 en 1995 a 7.5 en 2011, en China de 8 en 1996 a 6.5 en 2015, el periodo más extenso es el que reporta Brandt para el caso de California en Estados Unidos con un valor de 6.5 en 1955 y 3.5 en 2005, indicando que en el pasado la refinación del petróleo en esta región dejaba casi dos veces la ganancia energética que entregaba en tiempos relativamente recientes y aunque los valores reportados por Brandt para el IRE contemplando la etapa de refinación pueden parecer bajos, se debe tener presente que el petróleo al cual se hace referencia en ese

trabajo es petróleo pesado, el cual no solo es más difícil de extraer y requiere de técnicas especiales como la inyección de vapor, sino que además resulta más complicado de refinar por la baja cantidad de hidrogeno que contiene tal y como reporta el autor. Con esto último es lógico pensar que en el pasado los valores para el IRE de los productos refinados pudo haber sido el doble, e incluso mayor, que las estimaciones actuales. Con este panorama general es posible comparar los combustibles refinados con el mismo producto pero proveniente de fuentes alternativas como recursos no convencionales y biocombustibles. Para los primeros, la obtención de productos refinados a partir de arenas bituminosas o petróleo de esquisto, se tienen rangos reportados entre 1.2 y 2.8, en el caso de los biocombustibles los valores alcanzan un máximo de hasta 2.1 para el caso de la elaboración de biodiesel en México [38], estas cifras indican que mientras la explotación entre recursos petroleros no convencionales y biocombustibles es comparable en términos de ganancia energética, y quizá esto explique porque en la actualidad se explotan, ambas fuentes aún se muestran inferiores a los niveles de IRE que se han reportado históricamente para la refinación de petróleo. Para el caso del shale oil aún no existen trabajos que contemplen la etapa de refinación por lo que aunque los valores de IRE estimados para la etapa de extracción de este recurso son altos, podrían verse seriamente disminuidos si se incluyen los costos de refinación y distribución. En lo que se refiere al IRE para el gas una vez que se han tenido en cuenta los costos energéticos de distribución para hacerlo llegar al punto de uso, los valores reportados indican que, al menos en Estados Unidos, el gas convencional y no convencional resultan comparables.

En lo que se refiere a la generación eléctrica la energía nuclear y la energía hidroeléctrica se muestran de forma contundente como las mejores opciones en cuanto retorno energético. El IRE calculado para la generación eléctrica a partir de combustibles fósiles es variable, por ejemplo si se observan los valores reportados para el uso de carbón, mientras que Weißbach y col. [17], reportan un valor de 30 situándolo entre las mejores opciones, el estudio de esta misma tecnología pero aplicada a el caso específico de Chile [33] y Reino Unido [34] arroja un rango entre 3.6 y 6.2, de acuerdo con los autores de estos últimos dos estudios esta situación se debe principalmente a que en estos países gran parte del carbón que se utiliza es importado, por lo que aunque en el punto de

extracción el IRE de este recurso puede ser alto, una vez que se incluyen los costos energéticos necesarios para transportarle hasta el punto de uso y se consideran las pérdidas por transformación (a energía eléctrica) el retorno energético se ve seriamente afectado. La situación anterior aplica tanto para el gas como para el petróleo, por ejemplo, para el caso del primero según el estudio realizado por Raugei y col. [33] sobre el sistema eléctrico chileno, este parece mostrar un mejor comportamiento cuando se transporta por ducto que cuando es licuado para transportarlo en forma líquida, en el primer caso el retorno energético es de 28 mientras que en el segundo el indicador se reduce hasta 2.3. En lo que se refiere al petróleo y sus derivados las estimaciones hechas por Raugei y col. [34] [33] lo posicionan como la peor opción en cuanto a generación de energía eléctrica se refiere con un rango de valores alrededor de 2 para los casos específicos de Chile y Reino Unido. Como se ha argumentado arriba el IRE de los combustibles fósiles es un factor dinámico por lo que es válido pensar que en el pasado la generación eléctrica a partir de estos recursos haya tenido un mejor desempeño, sobre todo cuando los mismos provenían principalmente de una producción interna, aunque el trabajo de Brockway y col. [35], parece mostrar que el IRE de la generación eléctrica a partir de combustibles fósiles ha tenido un comportamiento constante desde 1995 y hasta 2011 permaneciendo alrededor de un valor de 3. Respecto a las energías renovables como lo son la energía eólica y la energía solar, la primera exhibe bastante consistencia en las estimaciones del IRE (entre 16 y 19) particular de esta fuente, aunque como se ha señalado antes cuando se incorpora el requerimiento energético necesario para almacenar la energía eléctrica el IRE de esta fuente se ve seriamente afectado. En cuanto a la energía solar se tiene el aprovechamiento mediante sistemas termo solar y fotovoltaico. Weißbach y col. [17] posicionan el primero de estos sistemas como la mejor opción entre las renovables con un IRE de 9 cuando se incluyen los costos de almacenamiento. En el caso de la energía eléctrica fotovoltaica existe bastante debate, con rangos reportados entre 1.6 y 10. Finalmente se tiene la generación eléctrica a partir de energía geotérmica, si bien los trabajos realizados sobre este recurso no son abundantes, los estudios existentes muestran que se trata de una fuente de energía neta importante, sobre todo cuando además de electricidad se aprovecha el agua caliente que resulta durante los procesos de

operación, el IRE estimado para la energía eléctrica en este caso se encuentra en un rango entre 9 y 12.6, cuando se aprovecha el calor contenido en el agua el indicador se eleva hasta 33.

En términos generales, esta breve revisión nos permite concluir que el IRE asociado a las fuentes de energía disponibles para las sociedades humanas está disminuyendo, lo anterior implica que aparentemente en el futuro se tendrá que invertir más y más recursos y energía hacia la obtención de la misma, disminuyendo con ello la disponibilidad de la energía neta y aunque para algunas fuentes energéticas, como la energía eólica y solar, se reportan resultados prometedores no se debe olvidar ni dejar de lado que hoy por hoy antes de poder aprovechar estos recursos se requiere una inversión de petróleo, gas y carbón para lograr construir la infraestructura necesaria que permita alcanzar estos objetivos. Principalmente el petróleo, debido a los combustibles que pueden obtenerse del mismo, juega un papel fundamental en las economías actuales, el petróleo tiene un rol tan importante que puede llegar a asegurarse que es el eje principal de todo el sistema energético, sin importar la fuente o recurso del que se hable todos requieren en algún momento de los servicios de transporte y en la actualidad este recurso satisface alrededor del 90% de esta demanda, los IRE reportados para fuentes alternativas como los biocombustibles parecen dejar claro que muy difícilmente estos puedan tomar el lugar de los derivados del petróleo. La disminución en el IRE de nuestras principales fuentes de energía debería ser una justificación suficiente para utilizar de la forma más racional posible los recursos fósiles que aún están disponibles para la sociedad.

Tabla I-3 IRE publicados para varias fuentes de energía bajo diferentes límites de estudio.

Fuente Energética	Año	Región	IRE⁵	Autores	Año de Publicación
Petróleo y Gas					
	<i>1862</i>		<i>18.5</i>		
<i>Extracción Solo Petróleo</i>	<i>1942</i>	<i>Global</i>	<i>42.3</i>	<i>Court y col. [31]</i>	<i>2017</i>
	<i>2012</i>		<i>17.6</i>		

⁵ Originalmente estos índices fueron publicados bajo el nombre de EROI, GER, NER ó NEER.

<i>Extracción Solo Gas</i>	1890		32.6		
	1941		138.2		
	2012		36.8		
<i>Extracción Petróleo y Gas</i>	2007	<i>E.U.A</i>	10.6	<i>Guilford y col. [39]</i>	2011
	2008	<i>Noruega</i>	40	<i>Grandell y col. [40]</i>	2011
	2010	<i>China</i>	10	<i>Hu y col. [41]</i>	2013
	2009	<i>Canadá</i>	20	<i>Freise [42]</i>	2011
	2012	<i>Rusia</i>	30	<i>Nogovitsyn y col. [43]</i>	2014
<i>Extracción Solo Petróleo</i>	2008	<i>Noruega</i>	20	<i>Grandell y col. [40]</i>	2011
	2016	<i>Ecuador</i>	24	<i>Parra [44]</i>	2019
<i>Extracción Solo Gas</i>	2009	<i>Canadá</i>	20	<i>Freise [42]</i>	2011
	n.a	<i>E.U.A</i>	14 - 25	<i>Yaritani y col. [45]</i>	2014
	2012	<i>Gazprom, Rusia</i>	70	<i>Nogovitsyn y col. [43]</i>	2014
	2013	<i>Novatek, Rusia</i>	74		
	<i>Extracción de Petróleo y Gas Aguas Profundas</i>	2009	<i>Golfo de México, E.U.A</i>	7	<i>Moerschbaecher y col. [46]</i>
<i>Extracción de Petróleo Aguas Profundas</i>			4		
<i>Petróleo Pesado</i>	1955	<i>California, E.U.A.</i>	60	<i>Brandt [37]</i>	2011
	2005		5		
<i>Petróleo Pesado</i>	2016	<i>Ecuador</i>	18	<i>Parra [44]</i>	2019
<i>Petróleo Medio</i>			36		
<i>Oil Shale (conversión In Situ)</i>	2008	<i>Formación Green River, E.U.A</i>	1.6 - 2	<i>Brandt [47]</i>	2008
<i>Oil / Tar Sands</i>	2010	<i>Canadá</i>	5.23	<i>Brandt y col. [48]</i>	2013
<i>Shale Oil</i>	n.a	<i>Formación Bakken, E.U.A</i>	13.3 - 52	<i>Brandt y col. [49]</i>	2015
	n.a	<i>E.U.A</i>	6.7 - 81	<i>Lior [50]</i>	2015
	n.a	<i>E.U.A</i>	13 - 23	<i>Yaritani y col. [45]</i>	2014
<i>Shale Gas</i>	n.a	<i>Formación Marcellus, E.U.A</i>	64 - 112	<i>Aucot y col. [51]</i>	2013
	n.a	<i>Formación Sichuan, China</i>	31 - 42	<i>Wang y col. [52]</i>	2017

	<i>n.a</i>	Vaca Muerta, Argentina	20 - 67	Ferrante y col. [53]	2014
Tight Gas	1980	Campo Bradford-Venango-Elk, Pensilvania, E.U.A	120		
	2003		67	Sell y col. [54]	2011

Carbón

Extracción	1800	Global	17.5	Court y col. [31]	2017
	1940		25.3		
	2012		95		
Extracción	1995	China	35	Hu y col. [41]	2013
	2010		27		
Extracción	<i>n.a</i>	Brasil	30 - 57	Freitas y col. [55]	2019

Refinación y/o Distribución

Combustibles Fósiles	1995 2011	Global	8 7.5	Brockway y col. [35]	2019
Petróleo	1996 2015	China	8 6.5	Feng y col. [36]	2018
Petróleo	2017	Chile	6.2	Raugei y col. [33]	2018
Petróleo Pesado	1955	California, E.U.A	6.5	Brandt [37]	2011
	2005		3.5		
Oil Shale (conversión In Situ)	2008	Formación Green River, E.U.A	1.2 -1.6	Brandt [47]	2008
Oil Shale (conversión Ex Situ)	2009		1.6 - 1.8		
Oil / Tar Sands	2010	Canadá	2.79	Brandt y col. [48]	2013
Gas	<i>n.a</i>	E.U.A	10 - 18	Yaritani y col. [45]	2014
Gas	2007	China	6.5	Feng y col. [36]	2018
	2015		5		
Gas	2017	Chile	65	Raugei y col. [33]	2018
Shale Gas	<i>n.a</i>	E.U.A	9 - 16	Yaritani y col. [45]	2014
Shale Gas	<i>n.a</i>	Formación Marcellus, E.U.A	8 - 12	Aucot y col. [51]	2013

Biocombustibles

Etanol a partir de Maíz	<i>n.a</i>	E.U.A	0.83	Pimentel y col. [13]	2008
-------------------------	------------	-------	------	----------------------	------

<i>Etanol a partir de Maíz</i>	<i>n.a</i>	<i>E.U.A</i>	<i>1.73</i>	<i>Kim y col. [14]</i>	<i>2005</i>
<i>Biodiesel a partir de Jatropha curcas</i>	<i>n.a</i>	<i>México</i>	<i>1.6 – 2.1</i>	<i>Fuentes y col. [38]</i>	<i>2018</i>
Generación Eléctrica					
<i>Combustibles Fósiles</i>	<i>2011</i>	<i>Global</i>	<i>3</i>	<i>Brockway y col. [35]</i>	<i>2019</i>
<i>Nuclear</i>			<i>75</i>		
<i>Hidroeléctrica</i>			<i>49</i>		
<i>Hidroeléctrica c/almacenamiento</i>			<i>35</i>		
<i>Carbón</i>			<i>30</i>		
<i>Gas</i>			<i>28</i>		
<i>Termo Solar</i>	<i>n.a</i>	<i>n.a</i>	<i>19</i>		
<i>Termo Solar c/almacenamiento</i>			<i>9</i>	<i>Weißbach y col. [17]</i>	<i>2013</i>
<i>Eólica</i>			<i>16</i>		
<i>Eólica c/almacenamiento</i>			<i>3.9</i>		
<i>Biogas</i>			<i>3.5</i>		
<i>Fotovoltaica</i>			<i>3.9</i>		
<i>Fotovoltaica c/almacenamiento</i>	<i>n.a</i>	<i>Alemania</i>	<i>1.6</i>		
<i>Fotovoltaica</i>	<i>n.a</i>	<i>España</i>	<i>2.4</i>	<i>Prieto y col. [18]</i>	<i>2013</i>
<i>Fotovoltaica</i>			<i>5.9 – 11.8</i>		
<i>Carbón</i>	<i>n.a</i>	<i>n.a</i>	<i>12.2 – 24.6</i>	<i>Raugei y col. [19]</i>	<i>2012</i>
<i>Derivados de Petróleo</i>			<i>3.7 – 10.6</i>		
<i>Hidroeléctrica</i>			<i>66</i>		
<i>Carbón</i>			<i>5.4 – 6.2</i>		
<i>Derivados de Petróleo</i>			<i>1.7 - 2</i>		
<i>Gas</i>			<i>28</i>		
<i>Gas Natural Licuado</i>	<i>2017</i>	<i>Chile</i>	<i>2.3</i>	<i>Raugei y col. [33]</i>	<i>2018</i>
<i>Biomasa</i>			<i>4.3</i>		
<i>Eólica costa dentro</i>			<i>19</i>		
<i>Fotovoltaica</i>			<i>10</i>		
<i>Carbón</i>			<i>3.6</i>		
<i>Derivados de Petróleo</i>			<i>1.7</i>		
<i>Gas</i>			<i>11 – 14</i>		
<i>Nuclear</i>			<i>30</i>		
<i>Biomasa</i>	<i>n.a</i>	<i>Reino Unido</i>	<i>1.1</i>	<i>Raugei y col. [34]</i>	<i>2016</i>
<i>Hidroeléctrica</i>			<i>58</i>		
<i>Eólica costa dentro</i>			<i>17</i>		
<i>Eólica costa fuera</i>			<i>18</i>		
<i>Fotovoltaica</i>			<i>3.3 – 8.6</i>		

<i>Geotérmica Solo Electricidad</i>	<i>n.a</i>	<i>Planta Nesjavellir, Islandia</i>	<i>9.5</i>	<i>Atlason y col. [57]</i>	<i>2013</i>
<i>Geotérmica Electricidad y Agua Caliente</i>	<i>n.a</i>	<i>Islandia</i>	<i>33</i>		
<i>Geotérmica Solo Electricidad</i>	<i>n.a</i>	<i>n.a</i>	<i>10.7 – 12.6</i>	<i>Gilliland [58]</i>	<i>1975</i>

1.5. La Relación Entre el IRE y la Energía Neta

En la sección anterior se han revisado algunas estimaciones realizadas para el IRE de algunas fuentes de energía y se observó que este indicador tiende a la declinación, ya se ha expuesto de forma breve que la principal implicación de este fenómeno es una reducción en la disponibilidad de la energía neta, aquí se explorara con un poco más de detalle dicha situación. Para comenzar se debe exponer de forma explícita la relación que existe entre la energía neta y el índice de retorno energético, esto se puede lograr de forma sencilla combinando la ecuación (I-1) y la (I-2) que son las definiciones matemáticas respectivas a dichos conceptos, el resultado de esta combinación es la ecuación (I-3), en donde E_o se refiere a la energía total obtenida, se debe observar que esta expresión nos permite apreciar a la energía neta como una fracción de la energía total que se obtiene, esto es, qué cantidad de la energía total que puede extraerse del medio ambiente se puede emplear para actividades distintas a las de la obtención de la energía, resulta claro que esta fracción será mayor entre más grande sea el IRE y disminuirá conforme este último se vea reducido.

$$\frac{E_n}{E_o} = \left(1 - \frac{1}{IRE}\right) \quad (I-3)$$

Una de las características más importantes de la expresión (I-3) es que se trata de una relación no lineal, esta cuestión se puede apreciar con mayor claridad cuando se grafica esta ecuación para distintos valores del IRE como lo hemos hecho en la Figura I-6,

aquí es posible observar como conforme el valor en el IRE se reduce el porcentaje de la energía total obtenida que puede ser utilizado en actividades distintas a las de la obtención de la misma también disminuye aunque no de forma lineal, por ejemplo, si el IRE asociado a todo el sistema energético de una sociedad pasa de 80 a 20, implicando una reducción del 75%, se tiene como resultado que el porcentaje de la energía extraída que es invertido en el sistema energético para que este pueda llevar a cabo todas sus actividades crece del 1.25% al 5%, aunque esto es un cambio significativo no necesariamente representa un problema para la sociedad. Siguiendo el ejemplo pero esta vez ilustrando un cambio en el IRE de 20 a 5, nuevamente un decremento del 75%, se tiene que la energía que se queda y consume en el sistema energético crece hasta el 20%, el 80% restante representa la energía neta disponible. Si el IRE cae por debajo de 5, la cantidad de energía que debe suplirse al sistema energético para que este pueda ejecutar sus labores crece de forma exponencial, dejando sin disponibilidad de energía a la sociedad para realizar otro tipo de actividades, esto es, solo habría suficiente energía como para satisfacer la demanda del sector energético. Esta caída drástica en la disponibilidad de energía neta se ha denominado popularmente como “The Net Energy Cliff” [8].

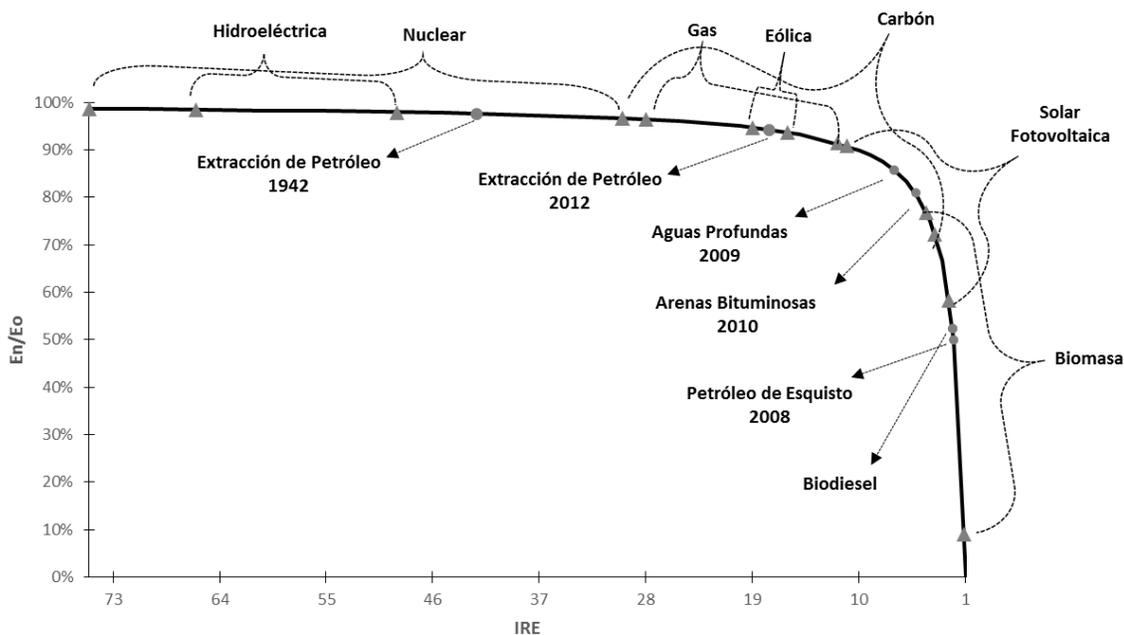


Figura I-6 Efectos de la disminución en el IRE sobre la disponibilidad de energía neta: "The Net Energy Cliff". El IRE de las distintas fuentes energéticas se corresponde con los reportados en la Tabla I-3.

En la Figura I-6 se han integrado algunos de los valores presentados en la Tabla I-3, de esta manera resulta mucho más claro que con el tiempo la extracción de petróleo se ha hecho mucho más costosa en términos energéticos moviéndose hacia el lado derecho de la gráfica. En lo que respecta a los sistemas de generación eléctrica también es claro que las energías renovables se encuentran sobre esta área. Debido a esta tendencia aparente en la reducción en el IRE de las fuentes energéticas disponibles para la sociedad es fundamental determinar cuáles son las mejores opciones de cara a futuro, con suerte previniendo el derroche de recursos valiosos en fuentes energéticas que realmente no valen la pena en el largo plazo, si el IRE de las nuevas fuentes de energía resulta ser considerablemente menor al de las fuentes fósiles indudablemente las sociedades humanas tendremos que enfrentarnos al declive energético en donde no solo disminuirá la cantidad de energía disponible sino que el precio de la misma será elevado debido a la relación inversa que existe entre estos elementos (ver sección 1.7.1), en realidad es poco claro cómo van a ser afectadas las economías humanas por la reducción en el IRE y al

día de hoy tampoco hay un consenso académico sobre cuál es el IRE mínimo que se requiere para sostener la dinámica de una sociedad moderna, aunque sí es claro que este factor está relacionado con el bienestar que estas sociedades pueden gozar (ver sección 1.6). La naturaleza no lineal de estos posibles impactos hace sencillo pensar que es muy probable que puedan llegar a ser subestimados e incluso ignorados hasta que sea demasiado tarde como para poder estar preparados para los mismos. Trabajos como el de Brockway y colaboradores [35] sobre el IRE para los combustibles fósiles en la etapa de refinación muestran que el indicador se encuentra alrededor de 5, razón por la cual estos autores concluyen que es muy probable que la escasez energética sea perceptible en el futuro cercano, lo anterior puede ocurrir sin necesidad de que se presente un pico en la producción de los recursos fósiles (ver sección 1.8), por tanto puede ser más urgente de lo que se piensa acelerar la transición hacia fuentes renovables.

En las siguientes secciones se exploran algunos aspectos claves del IRE y la relación que guarda con otros indicadores como el índice de desarrollo humano o el precio de la energía, los términos IRE y EROI se utilizan de forma indistinta en un intento de respetar los trabajos citados, como hemos dicho arriba el primero puede ser utilizado como una generalización del segundo y solo cuando existen detalles importantes sobre la formulación del indicador estas se han hecho notar.

1.6. Energía Neta, IRE y calidad de vida

Ya que la energía neta es aquella energía que como sociedad podemos dedicar a todas aquellas otras actividades que no están relacionadas con la obtención de energía, la energía neta es la energía que podemos utilizar para generar bienestar, por otro lado, ya que el EROI es una medida de la disponibilidad de energía neta, este indicador también constituye una medida de esta misma capacidad. En general, es de esperar que aquellas sociedades con mayor retorno energético y por tanto con mayor disponibilidad de energía neta, gocen de una mejor calidad de vida. Este último punto ha sido comprobado por autores como Lambert y colaboradores [59] quienes han calculado el EROI para un amplio

conjunto de países y lo han comparado contra varios indicadores de bienestar humano como lo son el índice de desarrollo humano (IDH), el acceso a agua potable, la inversión monetaria en salud y la alfabetización de mujeres, sus resultados muestran que existe una relación positiva entre el EROI y la calidad de vida.

En esta sección se realizara una estimación del IRE para un conjunto de 137 países, los resultados obtenidos se compararan contra el IDH de cada país para verificar la existencia de una relación positiva entre las variables. Para calcular el IRE de cada país se ha utilizado la ecuación (I-4) la cual relaciona al IRE con el precio de la energía p y la intensidad energética de la economía i (para ver los detalles sobre esta ecuación véase secciones 1.7.1 y 3.3).

$$IRE = \frac{1}{p \cdot i} \quad (I-4)$$

En lo que respecta a los datos necesarios que se requieren para calcular el IRE a partir de la ecuación anterior se tiene que, en el caso del precio de la energía se ha utilizado un valor de precio promedio, tomado del trabajo de Fizaine y Court [60] quienes, como parte de su investigación sobre los gastos monetarios en energía a nivel mundial, han construido series históricas para aproximar el precio promedio de la energía (fósil y no fósil). Como explican los autores, estimar un precio promedio de la energía para cualquier recurso energético en una escala global es una tarea sumamente complicada, es por ello que esta labor se ha aproximado haciendo uso de los precios de la energía vigentes en Estados Unidos. El precio promedio a nivel global se obtiene ponderando dichos precios a través de la participación relativa de cada fuente energética en la producción total de energía a nivel global. Para el 2012, que es el año para el cual hemos calculado el IRE, el precio promedio de la energía a nivel mundial, teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas, fue igual a 10580.27 [dólares/TJ]. El resto de la información utilizada se refiere a los niveles de consumo de energía y al PIB de cada economía, en ambos casos la información se ha tomado de las series que mantiene el Banco Mundial

[61], en el caso del consumo de energía las series se reportan en consumo per cápita y por tanto también fue necesario utilizar los datos sobre la población que también fueron tomados la misma fuente. Finalmente los datos referentes al IDH corresponden a los valores reportados para el año 2012 en página oficial del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [62].

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura I-7, en ella podemos apreciar que en efecto, y como habría de esperarse, existe una relación positiva entre el IRE el IDH, en este caso el ajuste logarítmico estima que se requiere un IRE mayor o igual a 10.28 para poder alcanzar un IDH alto, esto es, un IDH con un valor mayor o igual a 0.72.

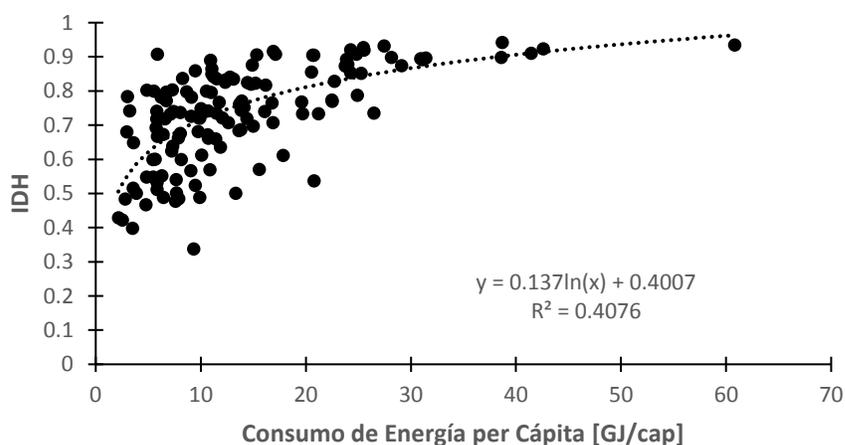


Figura I-7 Índice de Desarrollo Humano (IDH) vs el IRE de varios países.

Una vez calculados los valores del IRE se pueden utilizar estos datos para estimar la cantidad de energía neta que consumen los habitantes de cada país estudiado haciendo uso de la relación que existe entre ambas variables (ver ecuación (I-3)), recordemos que la energía neta es aquella que puede utilizarse para todas aquellas otras actividades no relacionadas con la obtención de la energía, por lo cual, esta energía es la que precisamente se aplica en prestar servicios de salud, de educación, en la producción de alimentos, en actividades recreativas, etc. A partir de este razonamiento es de esperar que

el consumo de energía neta sea un mejor predictor de la calidad de vida de lo que puede llegar a ser el consumo total de energía. Para verificar esta intuición se han comparado los niveles de consumo de energía y los de consumo de energía neta contra los valores del IDH, en la Figura I-8 pueden verse los resultados. Tal y como sería de esperar, se comprueba que los niveles de consumo de energía neta per cápita describen mejor la variación en el IDH.

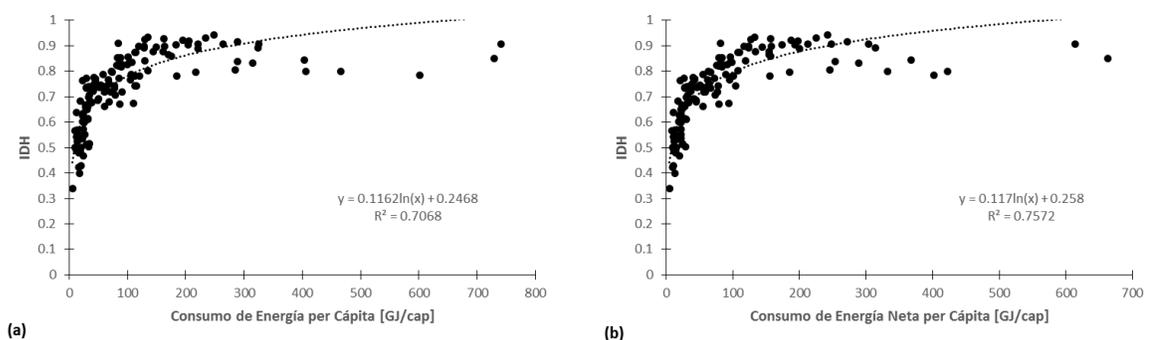


Figura I-8 (a) Consumo de energía per cápita vs IDH y (b) Consumo de energía neta vs IDH.

1.7. El IRE, el Precio y Gasto en Energía y sus Efectos sobre la Economía

Todos los bienes y servicios que pueden ser adquiridos mediante el dinero son producto de una inversión energética hecha en el pasado, en el presente o en el futuro [63]; dentro de cualquier proceso económico está involucrada la transformación o transporte de materia y esto necesariamente requiere de energía [6]. De forma mucho más explícita se puede decir que todos los bienes y servicios son una reorganización (no natural) de materia y los humanos solo pueden lograr esta reorganización o reacomodo mediante una transferencia energética [64]. De manera sorprendente, a pesar de estos hechos la energía no tiene un lugar, o no el que debería, dentro de la teoría económica preponderante. Esta última afirmación resume de cierta manera las ideas sobre las cuales se crean y desarrollan algunas líneas del pensamiento humano como lo son la economía

ecológica, biológica y biofísica [6] [65] [66] para las cuales el verdadero valor e importancia que tiene la energía, junto con otros recursos naturales [67], para el desarrollo económico y por tanto social, no está representando de manera adecuada dentro del pensamiento económico más popular conocido bajo el nombre de teoría económica neoclásica. Dentro de dicha teoría la energía ha sido tratada como se haría con cualquier otra mercancía o producto, realmente útil, pero en última instancia sustituible por otra mercancía [6]. Este concepto de sustitución es clave para el enfoque económico neoclásico y a través de él se justifica que la escasez de un bien o recurso no es realmente un problema para la sociedad ya que este puede ser siempre sustituido por otro [66], situación que únicamente se encontraría limitada por el ingenio humano.

La omisión o interpretación inadecuada del papel que desempeña la energía para el desarrollo económico dentro de la perspectiva neoclásica conlleva a ignorar y no entender de manera correcta las relaciones que existen entre las sociedades humanas, el medio ambiente y los recursos naturales [66] [6] [65] [67], pero quizá mucho más importante es que propone un sistema económico que está en contra de leyes físicas y biológicas como lo son por ejemplo las leyes de la termodinámica y los límites que estas leyes imponen sobre cualquier sistema físico [6] [66] [67] [4]. Lo anterior resulta en la falsa percepción de que la economía, junto con sus leyes y estructuras, puede escapar a estos principios básicos de carácter universal, estableciendo creencias erróneas como lo son la posibilidad del crecimiento económico infinito [4] [66] [6], situación sobre la cual la evidencia deja claro que la disponibilidad de energía junto con la de otros recursos naturales impone límites [68]. Comúnmente y de manera errónea desde la perspectiva neoclásica se interpreta a la economía como un sistema aislado y autosuficiente [4] [6], cuando en realidad se trata de un sistema abierto en el que tienen lugar flujos constantes de materia y energía por un lado, del ambiente hacia la economía, y un flujo de desechos por el otro, de la economía hacia el ambiente. Este intercambio continuo de flujos altera el medio ambiente de manera acumulativa lo que necesariamente y en forma inversa, altera y afecta a la economía [4]. Dichas carencias dentro del modelo neoclásico terminan por ofrecer un modelo que no representa de manera fiel el comportamiento real de las economías [6].

El hecho de que con las herramientas de la teoría económica neoclásica no pueda representarse de manera adecuada el comportamiento real de las economías supone un gran problema al considerar que se acude a ella en busca de orientación adecuada que permita crear estructuras políticas, sociales y económicas que permitan hacer frente a los problemas que hoy enfrentamos como lo son la crisis ambiental, la pérdida de biodiversidad, agotamiento de los recursos naturales, los grandes niveles de desigualdad junto con otras crisis sociales [6] [69]. Lo anterior no quiere decir que la teoría neoclásica deba ser abandonada por completo y pierda su valor [6] [66], sino que esta debe ser utilizada para lo que fue creada, esto es entender y describir las reglas que gobiernan el intercambio y distribución de bienes y servicios dentro de un mercado y reconocer, como se propone desde la escuela de la economía ecológica, biológica y biofísica, que este enfoque tiene límites al tratar de entender y describir las interacciones que tienen lugar entre las economías humanas, el medio ambiente y la importancia que tienen los recursos naturales en ello. Es por lo anterior que desde estas perspectivas alternativas se propone, entre otras cosas, la comunicación entre los economistas y científicos de otras ramas como lo son la ecología, la geología y la biología, entre otras, además de la incorporación de modelos que consideren tanto leyes físicas como biológicas de tal suerte que se pueda contar con marcos teóricos mucho más ricos y nutridos dentro de los cuales sea posible hacer una mejor descripción y estudio del comportamiento real de la economía [4] [66] [6] [67] [65]. Resolver los problemas actuales requiere, en primer lugar, aceptar el hecho de que la economía es un subconjunto del mundo natural, que no es ajeno a las leyes físicas y cuyo impacto en el ambiente, producto de la naturaleza propia de las actividades que se llevan a cabo dentro de la economía, son ya de una magnitud que no es despreciable [65] [6]. Para algunos autores es sencillamente inconcebible una teoría económica que no tenga como punto central a la energía ya que como hemos dicho al principio de esta sección ningún bien o servicio puede ser creado sin ella, al ser todos ellos una reorganización no natural de la materia [6] [64]. El éxito que se pueda tener en un futuro al modelar y entender sistemas tan complejos como lo son la economía y sus relaciones e impactos sobre el medio ambiente y los recursos naturales depende en gran medida de la incorporación de aspectos tanto biofísicos como financieros dentro de dichos modelos.

En esta línea se encuentra el índice de retorno energético y aspectos como el precio y costo monetario de la energía. En esta sección se resumen algunos de los trabajos realizados al respecto, mostrando los resultados que se han obtenido sobre el estudio de las relaciones que guardan estos indicadores, estos trabajos constituyen un esfuerzo por establecer un puente de comunicación entre una visión económica y biofísica de los recursos energéticos.

1.7.1 La Relación entre el IRE y el Precio de la Energía

Existe una conclusión común entre los trabajos que han estudiado la relación entre el índice de retorno energético y el precio de la energía. Dicha conclusión es que existe una relación inversa entre el primero y el segundo, esto es, cuando uno de ellos incrementa, el otro disminuye. Carey King [70], Charles Hall [71] y posteriormente Victor Court junto con Florian Fizaine [31], siguiendo el trabajo de los primeros, han formulado expresiones explícitas que muestran esta relación inversa. En un trabajo del año 2010 [70], King define el índice de intensidades energéticas (EIR) para un recurso energético, el EIR relaciona la cantidad de energía que puede obtenerse gastando una unidad monetaria dentro de una economía, estando esto representado por el precio (p) de la energía, con la energía que es necesario invertir para generar dicha unidad monetaria dentro de la misma economía, situación que se refleja en la intensidad energética (i) de esta. El EIR está definido de acuerdo a la expresión (I-5). De acuerdo a King el EIR es proporcional y funciona como un representante o aproximado del EROI de dicho recurso, obteniendo esta conclusión al comparar sus resultados con los valores de EROI disponibles para algunos recursos como el petróleo, gas y carbón.

$$EROI_i \approx EIR_i = \frac{1}{p_i \cdot i} \quad (I-5)$$

King y Hall [71], posteriormente King, Maxwell y Donovan [12], señalan que para un valor de EIR o EROI dado, no existe un único precio para la energía ya que este depende de qué estructura tengan las inversiones que se hacen en una tecnología o sistema energético. Dicha estructura puede medirse o representarse mediante la intensidad energética de las inversiones, de tal manera que dado un EIR o EROI constante, el precio de la energía será mayor conforme el valor de la intensidad energética disminuya (ver Figura I-9). Los sistemas energéticos con grandes requerimientos de capital y servicios por lo regular tendrán bajos niveles de consumo de combustibles durante su vida operativa (e.g. generación eléctrica eólica o solar), y estarán por lo tanto relacionados con una intensidad energética baja. Por otro lado, si el sistema es intensivo en cuanto al consumo de energía, su intensidad energética tenderá a ser alta. Estas relaciones tienen implicaciones importantes para las fuentes de energía renovables, que son por lo general altamente dependientes de la inversión inicial en capital.

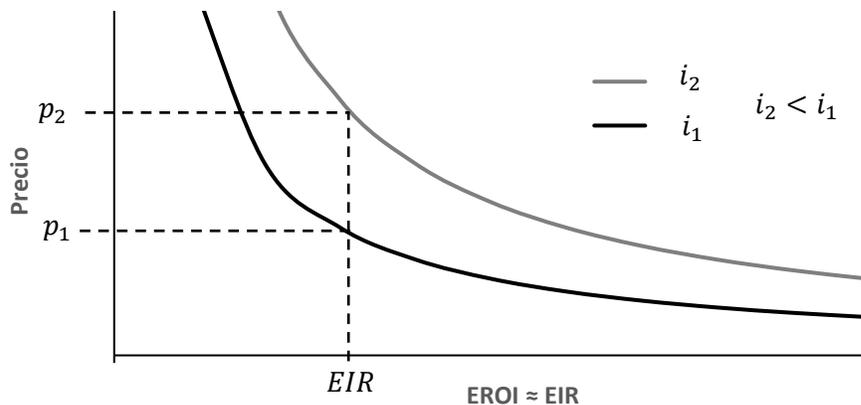


Figura I-9 Variación en el EROI ≈ EIR según la intensidad energética. Elaboración propia basado en [71] [12].

En el trabajo de King y Hall del año 2011 [71] los autores derivan una expresión que relaciona de forma explícita al EROI de un recurso energético y el retorno monetario sobre la inversión (MROI), estando este último definido como el cociente entre la cantidad monetaria total generada y la invertida en el proceso. Cuando solo se considera un tipo de

recurso energético como salida del proceso de obtención de la energía, dicha expresión puede escribirse de acuerdo a la ecuación (I-6), en donde el término e_i se refiere al contenido energético de una unidad del recurso energético recuperado (e.g. MJ/barril), \bar{p}_i es el precio del recurso en unidades monetarias por unidad de recurso (e.g. \$/barril) y $e_{inversión,i}$ se refiere a la intensidad energética de la inversión (e.g. MJ invertido/\$ invertido), siendo este último factor particular del sector energético en el que se está obteniendo el recurso.

$$EROI_i = \frac{MROI_i \cdot e_i}{\bar{p}_i \cdot e_{inversión,i}} \quad (I-6)$$

King y Hall utilizan la expresión (I-6) para estimar el precio del petróleo y gas, utilizando valores representativos para el resto de las variables basados en la información disponible para los Estados Unidos. Al comparar sus resultados con las series disponibles para el EROI de la extracción de crudo y el precio asociado a este para cada año en el que existe un cálculo del indicador, los autores concluyen que sus ecuaciones actúan como representaciones válidas que pueden ayudar a comprender las tendencias en el largo plazo. En la Figura I-10 reproducimos los resultados referentes a la extracción de petróleo, en ella las líneas continuas se obtienen al considerar un $MROI = 1.1$, mientras que en las líneas discontinuas este valor es de 1.5, por su parte en la línea a puntos el valor es de 2.1. En cuanto al color se refiere, las líneas negras corresponden a un valor de intensidad de inversión de 33 [MJ/\$], mientras que el color gris hace referencia a una intensidad de 19 [MJ/\$]. Los marcadores a triangulo y cruz representan los valores del EROI disponibles dentro de la literatura para la extracción de petróleo en los Estados Unidos asociados al precio vigente durante su año de estimación. La Figura I-10 no solo ilustra la relación inversa que existe entre el precio de la energía y su EROI, sino que también nos muestra que por debajo de valores de 10 para el EROI, dicha relación se comporta de forma no lineal produciendo incrementos dramáticos los precios de la energía.

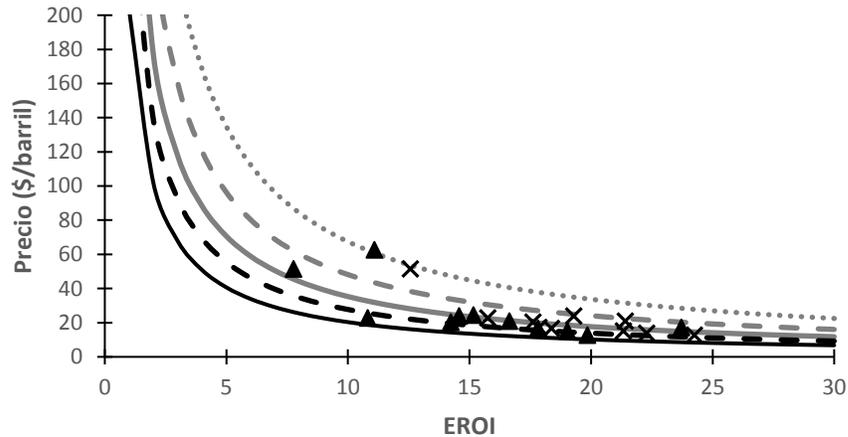


Figura I-10 Estimación del precio del barril de crudo en los Estados Unidos como función del EROI. Elaborado con los datos de [71]. Ver descripción de la figura en el texto inmediato anterior.

En un trabajo publicado en el 2017, Court y Fizaine [31] derivan de forma explícita la ecuación (I-7), en donde p_i es el precio de la energía en unidades monetarias por unidades de energía, i es la intensidad energética de la economía y $MROI$ es el retorno monetario sobre la inversión promedio del sector energético fósil, el cual los autores consideran representativo para todo el sector energético.

$$EROI_i = \frac{MROI}{p_i \cdot i} \tag{I-7}$$

Haciendo uso de la ecuación (I-7) y de series históricas para los datos que involucran, Court y Fizaine obtienen el EROI para la producción de carbón, petróleo y gas (ver Figura II-2 en el siguiente capítulo) desde sus inicios, 1800, 1860 y 1890 respectivamente, además de obtener el valor del indicador para el sector fósil en conjunto haciendo uso de un precio promedio ponderado. Al comparar sus resultados con los obtenidos en otros trabajos que también contemplan una escala global, aunque de menor temporalidad, los autores concluyen que existe consistencia entre los estudios.

Vale la pena hacer notar que la ecuación (I-7) puede obtenerse directamente de la ecuación (I-6) al utilizar la intensidad energética de toda la economía (i) en lugar de la

específica del sector energético ($e_{inversión,i}$), aunque como señalan King y Hall [71] se debe tener en cuenta que por lo general la intensidad energética de las industrias energéticas está por encima de la intensidad de toda la economía, intensidad que representa un valor promedio de los sectores que la componen. Teniendo en cuenta lo anterior y observando que el término p_i en la ecuación (I-7), que se refiere al precio de la energía en unidades monetarias por unidades de energía (e.g. \$/MJ), es igual al cociente entre los términos \bar{p}_i y e_i presentes en la ecuación (I-6), se obtiene el resultado mencionado. Además de lo anterior note que la ecuación (I-7) sugiere que, bajo las condiciones mencionadas, el MROI funciona como una constante de proporcionalidad entre el EROI y el EIR, de tal forma que se tiene la siguiente expresión:

$$EROI_i = MROI_i \cdot EIR_i \quad (I-8)$$

Las expresiones descritas anteriormente ilustran la naturaleza inversa que existe en la relación entre el EROI y el precio de la energía, más allá de esto, proponen que dicha relación no siempre es lineal, especialmente en valores de EROI cercanos a 10, lo anterior tiene implicaciones importantes al considerar que durante gran parte de la historia el EROI de los combustibles fósiles, tanto en su conjunto como por separado, ha permanecido por encima de este punto, por lo cual los efectos en la pérdida de la calidad en los recursos energéticos no ha tenido gran influencia en los precios de los mismos. Aunque en dichas expresiones pudiera parecer que las variables involucradas son independientes unas de otras, en la realidad existen interacciones entre ellas, este hecho genera por ejemplo que la relación existente entre el EROI y el precio no actúe de forma unidireccional, esto es, así como un cambio en la calidad del recurso, medible por su EROI, puede generar cierta magnitud de precios, un cambio en los precios del recurso energético generado por eventos externos que nada tengan que ver con calidad de este, puede propiciar la disminución de la misma al incentivar su explotación, en el trabajo del año 2011 de los autores Heun y de Wit [72] se puede encontrar ejemplos de dichas relaciones las cuales se describirán a continuación.

Heun y de Wit, proponen un modelo para la relación entre el EROI y el precio de la energía, que al igual que los modelos anteriores refleja la relación inversa entre los indicadores. La ecuación (I-9) corresponde a dicho modelo, en ella el término p se refiere al precio de la energía, c es el costo monetario de producir esa energía y m es un índice de margen de ganancia sobre los costos de producción.

$$p_i = \frac{m \cdot c_i}{1 - EROI^{-1}} \quad (I-9)$$

Además de lo anterior Heun y de Wit, proponen tres posibles interacciones entre las variables de dicho modelo, denotadas por I_i , que posteriormente evalúan para el caso de la extracción de petróleo en Estados Unidos, haciendo uso de series de datos históricas. La interacción I_1 supone que un incremento en la tecnología de explotación resulta en una disminución en el consumo de energía, lo que significa una disminución en los costos de producción, incrementos en el EROI y por tanto una disminución en los precios, ilustramos dicha interacción en la Figura I-11.

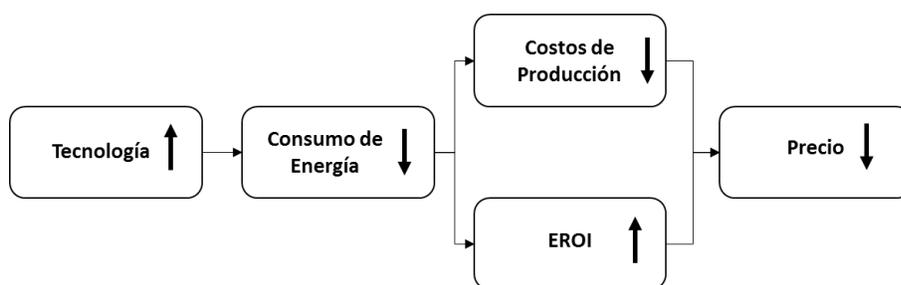


Figura I-11 Esquema de la interacción I_1 muestra como un incremento en la tecnología puede incrementar el EROI y disminuir el precio. Basado en [72].

La interacción I_2 , ilustrada en la Figura I-12, ocurre cuando el recurso energético se agota en relación a la demanda, los requerimientos de energía incrementan para explotar los recursos marginales, generando incrementos en los costos de producción y

disminuyendo el EROI. Las interacciones, I_1 e I_2 , describen la competencia entre el desarrollo tecnológico y el agotamiento del recurso natural.

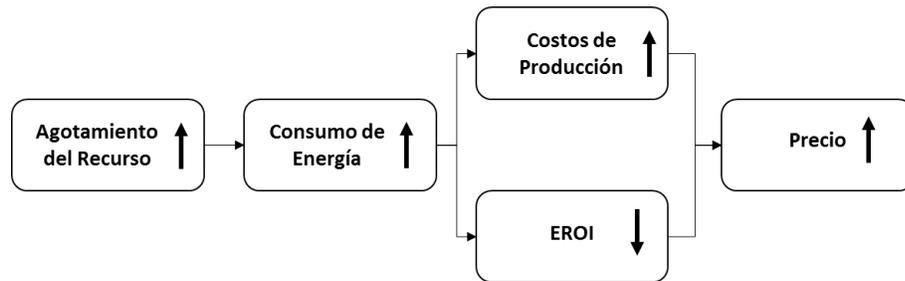


Figura I-12 Esquema de la interacción I_2 muestra como el agotamiento del recurso puede disminuir el EROI y aumentar el precio. Basado en [72].

La tercera interacción I_3 , ocurre al cambiar la dirección de acción en las interacciones anteriores, esto es tomando como inicio el precio y observando los efectos en el EROI. Esta interacción indica que una variación en los precios puede generar una variación en el EROI del recurso, actuando de alguna de las dos siguientes formas: I_{3a} un incremento en los precios provoca un incremento en el margen de ganancia y por tanto provee de capital para incrementar la explotación, lo cual necesariamente requiere incrementar el consumo de energía, disminuyendo el EROI; la segunda posibilidad $I_{3,b}$, puede ocurrir al disminuir el precio del recurso, generando el efecto inverso que la anterior.

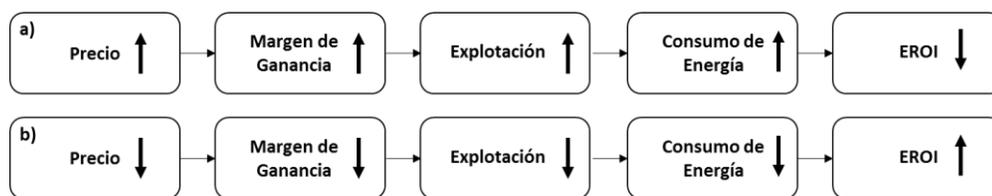


Figura I-13 Esquema de la interacción I_3 muestra como una variación en los precios puede afectar al EROI de un recurso. Basado en [72].

Al revisar las tendencias en los datos existentes para el EROI, el precio del barril, los costos de producción y los márgenes de ganancia, las conclusiones de Heun y de Wit indican que en el presente el ritmo de mejora tecnológica no es suficiente para revertir la tendencia a la baja en el EROI que exhiben los datos tanto para el mundo como para Estados Unidos, esto es, la interacción I_2 tiene mayor presencia que la interacción I_1 . Durante la década de los años 70 es posible observar la dinámica esperada y descrita por la interacción $I_{3,a}$, el rápido incremento en los precios dio lugar a un aumento en los márgenes de ganancia, lo que promovió la inversión en exploración y perforación, esto es, un aumento en el consumo de energía que junto a una producción declinante, resultó en una disminución en el EROI. Ya en los años 80, los precios del crudo comenzaron a disminuir y junto con ellos los grandes márgenes de ganancias observados en la década anterior desaparecieron, sin este estímulo se redujo la intensidad de perforación y exploración lo cual propició la recuperación del EROI, sin llegar estos a alcanzar los niveles vistos antes de los años 70, por último los datos históricos sugieren que desde 1990 parece estar teniendo lugar la interacción I_2 .

1.7.2 La Relación entre el IRE y el Gasto en Energía

El gasto en energía, también llamado costo de la energía, se refiere a la cantidad de dinero requerido para comprar energía y usualmente se expresa como una fracción del producto interno bruto [60]. Matemáticamente podemos expresarlo de acuerdo a la ecuación (I-10), en donde p_i se refiere al precio de la energía y E_i a la cantidad de energía consumida, el subíndice i se utiliza para indicar que esta energía puede provenir de distintas fuentes. En la siguiente sección se discutirá sobre la relación que guarda esta fracción y el desarrollo económico, aquí nos limitaremos a mostrar la relación matemática que existe entre los gastos en energía y el índice de retorno energético.

$$f_{EC_PIB} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \cdot E_i}{PIB} \quad (I-10)$$

En la sección 1.9 se mostrará que el IRE de un sistema energético compuesto por varios subsistemas (e.g. producción petrolera que proviene de distintas regiones) puede aproximarse mediante la ecuación (I-11), en donde E_i se refiere a la producción energética proveniente del subsistema i , el cual tiene asociado un índice de retorno energético IRE_i .

$$IRE = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{IRE_i}} \quad (I-11)$$

Suponga ahora que el IRE_i de cada subsistema puede ser calculado mediante la ecuación (I-7) de la subsección anterior, haciendo esta consideración y sustituyendo en la anterior se deduce que:

$$EROI = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i \cdot (p_i \cdot i)}{MROI}} = \frac{MROI \cdot \sum_{i=1}^n E_i}{i \cdot \sum_{i=1}^n E_i \cdot p_i} \quad (I-12)$$

Se debe notar que en la expresión (I-12) se está considerando que la intensidad energética de cada subsistema energético se puede representar mediante la intensidad energética de la economía en su conjunto, además de que el MROI para todos y cada uno de los subsistemas es el mismo. Utilizando la definición usual de intensidad energética, esto es, energía total consumida entre producto interno bruto, se puede expresar lo anterior como:

$$EROI = \frac{PIB \cdot MROI \cdot \sum_{i=1}^n E_i}{E_{consumo_total} \cdot \sum_{i=1}^n E_i \cdot p_i} \quad (I-13)$$

Existen distintas formas de interpretar este último resultado, una de ellas consiste en notar que la energía total generada por un sistema energético, denotada por el término $\sum_{i=1}^n E_i$, no es necesariamente igual al consumo total de energía que existe dentro de la economía $E_{consumo_total}$, se puede pensar por ejemplo en un país exportador neto. En dicha situación tendríamos que $\sum_{i=1}^n E_i > E_{consumo_total}$, y la suma $\sum_{i=1}^n E_i \cdot p_i$, sería algo más parecido al valor monetario generado por sector energético, dadas estas consideraciones es posible expresar al EROI de acuerdo a la expresión (I-14). En dicha expresión e_E se refiere al cociente entre la energía producida y la energía consumida y f_{E_PIB} es algo aproximado a la fracción del PIB que genera el sector energético.

$$EROI = \frac{MROI \cdot e_E}{f_{E_PIB}} \quad (I-14)$$

Ahora bien si sucede que se restringe el estudio no a la energía total que entrega el sistema, sino únicamente a la que se consume en la economía ocurre $\sum_{i=1}^n E_i = E_{consumo_total}$, esto puede ocurrir por ejemplo al considerar al mundo en su conjunto ya que es posible suponer que toda la energía producida es consumida, en esta situación la suma $\sum_{i=1}^n E_i \cdot p_i$ se refiere al gasto en energía y por lo tanto podemos expresar al EROI de acuerdo a la expresión (I-15).

$$EROI = \frac{MROI}{f_{Ec_PIB}} \quad (I-15)$$

Este último resultado nos indica que el EROI de una sociedad, esto es, el EROI de su sistema energético completo, es inversamente proporcional a los gastos en energía vistos como una fracción del PIB. En la Figura I-14 hemos obtenido el valor del término f_{Ec_PIB} en función del EROI teniendo en cuenta distintos valores de MROI, aquí es posible

apreciar de nueva cuenta que no solo se trata de una relación inversa, sino que esta exhibe características no lineales cuando se tienen valores de EROI menores a 10, punto en el cual dependiendo del valor asignado de MROI los gastos en energía podrían ser equivalentes al 25% del PIB.

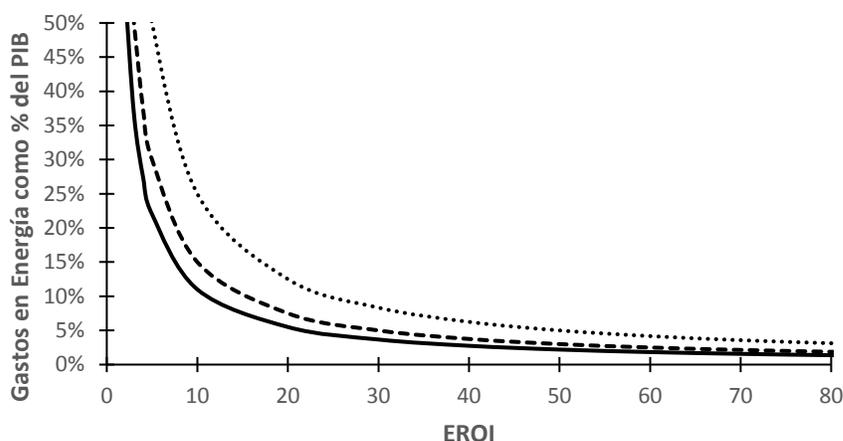


Figura I-14 Gastos en Energía como % del PIB en función del EROI. Línea continua considera MROI = 1.1, línea discontinua MROI = 1.5, línea punteada MROI = 2.5.

Esta relación entre el EROI, o algún índice equivalente, y los gastos en energía no ha pasado desapercibida dentro de la literatura especializada en el tema. Por ejemplo King [73], posteriormente King y colaboradores [12], muestra que al tomar el promedio de los valores EIR asociados a cada fuente de energía ponderado de acuerdo a la proporción que representa el gasto en cada una de ellas con respecto al total, se deduce que EIR de una sociedad es inversamente proporcional a los gastos en energía vistos como una fracción del PIB; se puede llegar al mismo resultado, y quizá de una forma más natural, siguiendo el procedimiento descrito en los párrafos anteriores pero considerando que el IRE de cada fuente queda descrito de acuerdo a la ecuación (I-5). King [73], y King y colaboradores [74], utilizan este resultado por ejemplo para calcular el EIR del Reino Unido (R.U.) [73] y el mundo [74] en su conjunto basados en series históricas sobre gastos en energía. Para el R.U. sus resultados indican que el EIR se mantuvo por debajo de 10 hasta antes de 1930 y tuvo su pico a principios de los 2000 con un valor cercano a 20. Se debe mencionar que estos resultados no consideran el gasto en energía en forma de comida y

forraje que en el pasado representó la principal fuente de energía, al tenerse en cuenta estos gastos extra el EIR debería ser menor. Para el caso del mundo se utilizan los gastos en energía considerando 44 países, que juntos representan entre el 93 y 95% del PIB mundial y producen entre el 73 y 79% de la energía primaria a nivel mundial de acuerdo a la lista de la Agencia Internacional de Energía, y se calcula el EIR para un periodo que va de 1978 a 2010, los resultados muestran que el EIR global tocó un mínimo alrededor de 9.7 en 1979 para recuperarse hasta un máximo de 33.3 en 1998, momento desde el cual ha declinado hasta mostrar una pequeña recuperación después de 2008 y continuar declinando hacia el 2010.

Otro ejemplo explícito de la relación entre el EROI y los gastos en energía lo encontramos en el trabajo de Fizaine y Court [60], aquí los autores mediante una regresión lineal múltiple definen una función para la tasa de cambio en el PIB de los E.U. que tiene como variables independientes a los gastos en energía como fracción del PIB, la formación de capital también como fracción del PIB, población y la tasa de desempleo. A partir de esta función son capaces de determinar el valor de los gastos en energía como fracción del PIB que ocasiona un crecimiento nulo en la economía estadounidense, en otras palabras este es el gasto en energía máximo por encima del cual el crecimiento económico es imposible; los autores denominan a esta fracción como β para la cual determinan un valor de 0.11, que es igual a un gasto máximo en energía equivalente al 11% del PIB, a partir de esto son capaces de determinar el EROI mínimo requerido para que exista crecimiento económico en E.U., para calcular este EROI mínimo los autores utilizan la ecuación (I-16), considerando un valor de MROI representativo para el sector energético de 1.158, de acuerdo con los autores este promedio es el del sector fósil de los E.U. durante el periodo de 1800 a 2012 y se considera representativo para todo el sistema energético, con estos datos el EROI calculado resulta ser de 10.5.

$$EROI_{min} = \frac{MROI}{\beta} \quad (I-16)$$

A pesar de que en el trabajo de Fizaine y Court [60] se muestra como calcular un valor para el EROI en función de los gastos en energía y cuentan con series de datos históricas sobre esta información para el caso mundial, Estados Unidos y el Reino Unido, los autores no utilizan estos para estimar el EROI de la sociedad. A continuación se muestran los resultados obtenidos siguiendo la ecuación (I-15) y utilizando la información para los gastos en energía como fracción del PIB de los autores Fizaine y Court.

Para el caso del R.U. los datos sobre gastos en energía vistos como fracción del PIB van desde el año 1300 y hasta el año 2010, aquí los autores han incluido el gasto no solo en fuentes fósiles, sino que consideran también el gasto en comida y forraje, elementos que en el pasado representaron la principal fuente de energía y no considerarlos puede subestimar los gastos en energía realizados ya que no es hasta después de 1900 que los gastos en este tipo de energía parecen despreciables (ver Figura I-15).

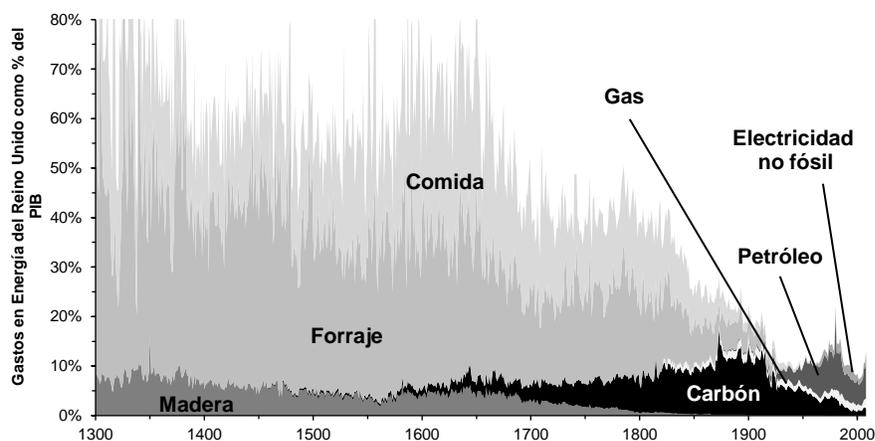


Figura I-15 Gastos en Energía del Reino Unido como % del PIB. Adaptado de [60].

Tomando el inverso de estos valores es posible estimar el EROI de la sociedad en el Reino Unido de acuerdo a la ecuación (I-15), aunque esta también indica que es necesario contar con los valores MROI asociados al sistema energético, lamentablemente estos datos no están disponibles y el cálculo se ha hecho considerando el valor promedio

reportado por Fizaine y Court de 1.158 para el sector energético fósil. Los resultados se muestran en la Figura I-16, estos son consistentes con los encontrados por King [73] en 2014 y por Brand-Correa y colaboradores [75] en 2017. De acuerdo a los resultados el EROI no alcanzó un valor cercano a 10 hasta 1930 y tuvo su pico en el año 2002 con un valor de 15.7, este último valor es menor al encontrado previamente por King que reporta un pico cercano a 20, es entendible que sea menor toda vez que aquí se están considerando los gastos en comida y forraje. Brand-Correa y colaboradores estimaron el EROI para el R.U., utilizando una metodología de entrada-salida para estimar los costos energéticos indirectos del sector energético, durante un periodo que va de 1997 a 2012, obteniendo que el indicador está disminuyendo desde comienzos de este siglo, presentando un valor cercano a 12 en 1997, disminuyendo a 5.6 en el 2012. Para 1997 el EROI del R.U. que hemos calculado habría sido de 13.4, mostrando también la tendencia declinante desde inicios del siglo. La precisión de los resultados aquí obtenidos debe tomarse con cautela, aunque la tendencia ciertamente debe estar cercana a la realidad, en este aspecto vemos que la sociedad del R.U. no gozó de altos retornos de energía hasta después del año 1800 momento en el que el uso del carbón comenzó a hacerse notable, a partir de este punto hay una tendencia creciente en el indicador hasta su pico en el año 2002.

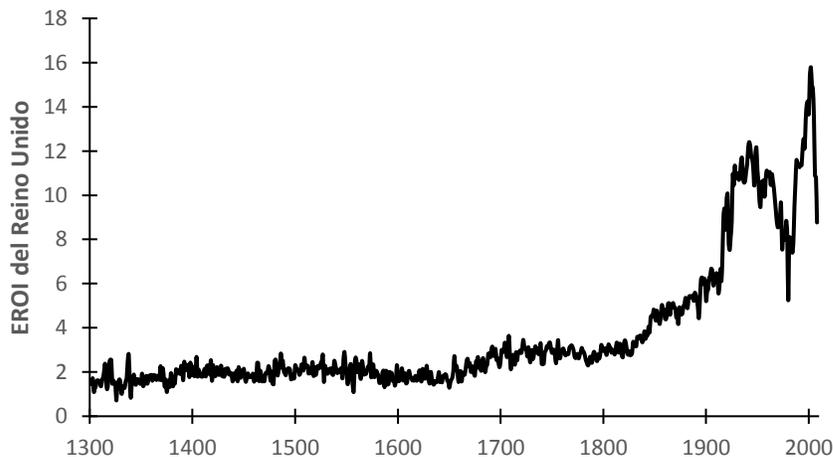


Figura I-16 EROI para la sociedad del Reino Unido del año 1300 al 2008.

En el caso de Estados Unidos se consideraron los datos de MROI proporcionados por Fizaine y Court para el sistema energético fósil y al igual que los autores se considera que estos son representativos para todo el sistema energético, a diferencia del caso de R.U. aquí el gasto en energía no está considerando lo correspondiente a comida y forraje, pero sí el asociado a madera. Los resultados se muestran en la Figura I-17, aquí se puede apreciar una tendencia creciente hasta alcanzar un valor máximo de 30.8 en 1970, posteriormente el indicador cae abruptamente hasta un valor de 8.2 en 1979, después de ello existe una recuperación alcanzando un segundo pico de 27.8 en 1998, en 2012 el indicador tendría un valor de 15.7. Nuevamente estos resultados están en el orden de magnitud calculado por King [73] quien también encuentra un pico cerca del año 2000 con un valor alrededor de 35 y una tendencia a la baja desde entonces.

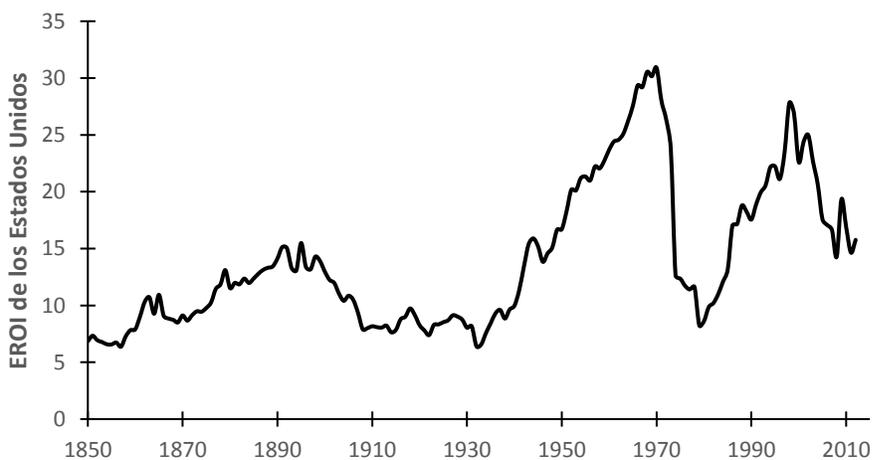


Figura I-17 EROI para la sociedad de Estados Unidos del año 1850 al 2012.

Finalmente, el EROI para la situación global se muestra en la Figura I-18, los valores de MROI utilizados son los mismos que para el caso de E.U., en cuanto a los gastos en energía tampoco se incluye lo respectivo a comida y forraje pero sí el asociado a madera, además incluimos el EROI calculado por Court y Fizaine [31] para los combustibles fósiles, siendo claro que el EROI de la sociedad ha seguido la tendencia de estos. Previamente King y colaboradores [74] habrían observado a nivel global un pico de 33 en el año de

1998, aquí sucede en el mismo año pero con un valor de 27. Al observarse la magnitud de los valores en el EROI, sobre todo antes del año 1900, debe tenerse en cuenta que no se está considerando los gastos en comida y forraje, que en el pasado ciertamente representaron una fuente importante de energía, y por ello es muy probable que estos valores sean mucho menores sobre todo en el pasado.

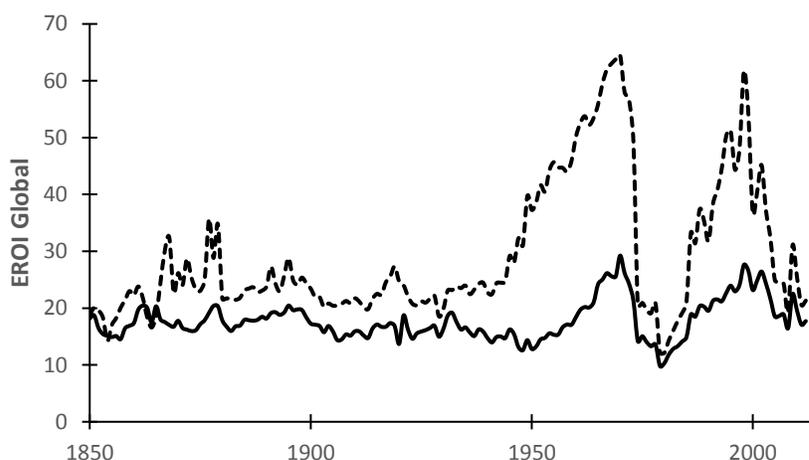


Figura I-18 EROI de la sociedad a nivel global del año 1850 al 2012. La línea discontinua representa el EROI para los combustibles fósiles a nivel global basado en los datos [31].

Otros estimados del EROI a nivel mundial se pueden encontrar en el reporte del año 2013 de la firma Tullet Prebon [63], firma especialista en análisis financieros de mercados energéticos, quienes estiman que en 1990 el EROI del sistema energético a nivel mundial era de 40 y en 2010 este ya era de 17, los mismos estiman que para el año 2020 el EROI global será de 11.5. En el mismo trabajo se citan los valores de EROI a nivel global estimados por Andrew Lees, otro analista financiero, quien sugiere que estos serían del orden de 40, 20 y 5 en 1990, 2010 y 2020, respectivamente. Los valores de EROI mencionados anteriormente son todos calculados o estimados con base en los gastos en energía como fracción del PIB, aunque en ninguno de los trabajos especifican ni citan fuente alguna para conocer cómo es que han llegado a la conclusión de la relación inversa entre el EROI y los gastos en energía. Comparando los resultados que se han obtenido

en el presente trabajo (ver Figura I-18) y los citados previamente, solo coinciden los estimados para el año 2010 que hemos calculado de 19.5, mientras que para 1990 el obtenido es igualmente de 19.5 muy por debajo de los estimados por los analistas financieros.

1.7.3 Consumo de Energía y Crecimiento Económico

La relación positiva que existe entre el consumo de energía y el tamaño y desarrollo de una economía, representado por su producto interno bruto, es un hecho bien conocido. Por ejemplo, Brown y colaboradores [68] han estudiado un conjunto de 220 países utilizando datos sobre su consumo de energía y producto interno bruto para un periodo que en total abarca 24 años, específicamente de 1980 a 2003, concluyendo que a lo largo de este tiempo y entre las naciones, ricas y pobres, existe una clara relación directa entre el consumo de energía y el PIB, ambos indicadores per cápita. En la Figura I-19 se muestra dicha relación para el caso mundial abarcando un periodo que va de 1965 a 2018. Aquí se puede observar como el crecimiento económico de los últimos 50 años ha ido a la par de un crecimiento en el consumo de energía, cuando se observan la tasas de variación anual tanto para el PIB como para el consumo energético a nivel mundial se vuelve mucho más claro que el incremento en la actividad económica va ligado a un incremento en el uso de energía. Finalmente tanto el coeficiente de correlación, como el coeficiente de determinación del modelo lineal ajustado, confirman la existencia de una fuerte relación positiva entre ambas variables, mostrando que una crece casi de forma lineal con la otra. A pesar de la extensa evidencia que existe respecto a la relación positiva que hay entre el consumo de energía y el crecimiento económico aún no existe un consenso académico sobre la causalidad de estos fenómenos [76] [77], esto es, no ha sido posible determinar la dirección de los sucesos. ¿Es el crecimiento económico lo que genera el incremento en el consumo de energía?, ¿esto ocurre de forma inversa? o ¿es un fenómeno de acción bidireccional? Sin embargo, esta falta de consenso no constituye prueba, ni argumento suficiente como para negar el hecho de que el crecimiento económico requiere de energía, tal y como lo señalan los autores Kalimeris, Richardson y Bithas [76] en un trabajo del año

2014 en donde se revisan 158 estudios sobre el tema: “la imposibilidad de determinar una regla general que establezca la direccionalidad del crecimiento económico y energético no puede cuestionar el hecho de que el crecimiento requiere de energía y que los avances en cuanto a eficiencia no han logrado disminuir este vínculo”.

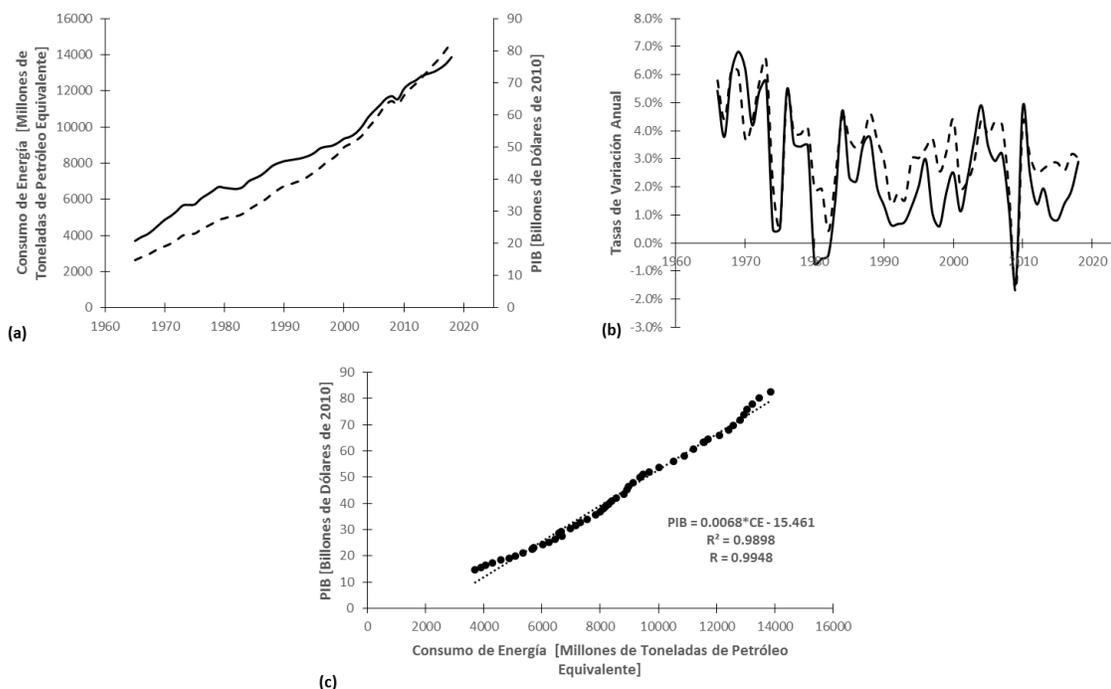


Figura I-19 (a) Evolución en el consumo global de energía primaria (línea sólida) y el PIB 1965-2018 (línea punteada), (b) tasas de variación anual en el consumo global de energía (línea sólida) y el PIB (línea punteada) 1965-2018 y (c) PIB mundial vs consumo global de energía 1965-2018. Elaborado con los datos de [32] [61].

Las tendencias mostradas en la Figura I-19 son prueba de uno de los últimos puntos expuestos en el párrafo anterior, el crecimiento requiere de energía, y aunque aquí se limita el análisis a un periodo de poco más de 50 años, las estimaciones históricas de los últimos 200 años no muestran algo diferente (ver Figura I-20) aunque sí nos dicen algo más, y es que el rápido crecimiento de la economía a nivel mundial ha estado soportado hasta nuestros días por el uso intensivo de los combustibles fósiles, ya que antes de utilizar estas fuentes energéticas la humanidad solo tenía a su disposición la energía proveniente de la comida que podía aprovechar mediante el cuerpo humano, la energía de los

animales, la madera, la energía presente en las corrientes de viento y de agua aprovechada a través de molinos. La incorporación de las fuentes fósiles trajo consigo un incremento exponencial en la energía disponible para el ser humano y con ello la capacidad de realizar trabajo. Lo anterior puede ser explicado por la gran densidad energética de estos combustibles. Por ejemplo, el petróleo tiene en promedio cerca de 6 [GJ/barril] y teniendo en cuenta que un hombre sano de 85 [kg] puede realizar actividades de gran esfuerzo con una potencia de hasta 100 [W] [5], implica que después de 365 días de trabajo con jornadas de 8 horas diarias, suponiendo que se puede mantener dicha potencia constante, se habría entregado una cantidad de energía equivalente a 1 [GJ]. Lo anterior implica que se requiere el trabajo de 6 hombres por un año para obtener la misma cantidad de energía que se encuentra contenida en un barril de petróleo. La relación positiva entre la economía y el consumo de energía tampoco es una sorpresa, ya que la economía, grosso modo, se trata del reordenamiento, transformación o reubicación de materia con la finalidad de ofrecer bienes y servicios que puedan satisfacer las necesidades de los seres humanos y todo reordenamiento, transformación o reubicación de materia requiere necesariamente de energía. Análogo a un organismo biológico, la economía consume energía en primer lugar para el mantenimiento de sus funciones más esenciales y utiliza el restante, si es que existe, para su crecimiento. Los datos empíricos sostienen la teoría energética del crecimiento económico.

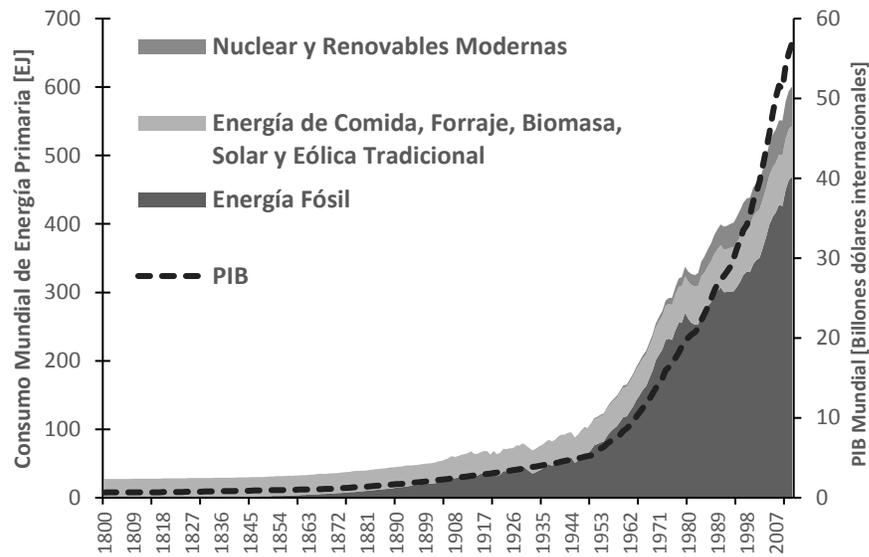


Figura I-20 Evolución en el consumo de energía primaria y el PIB a nivel mundial 1800-2012. Elaborado con los datos recopilados en [25] [60].

Kalimeris, Richardson y Bithas [76] también hacen referencia a los efectos que ha traído la eficiencia en el uso de la energía sobre la relación entre el crecimiento económico y el consumo energético. Dicha cuestión ha sido explorada en un trabajo conjunto de dos de estos autores, Bithas y Kalimeris [78], donde se ha explorado la relación energía-PIB a través de la llamada intensidad energética. Si la intensidad energética de una economía aumenta quiere decir que con el tiempo se requiere más energía para generar una unidad monetaria del PIB, por el contrario, si disminuye, entonces es una señal de que se está requiriendo menos energía para generar la misma unidad y por tanto la eficiencia del proceso económico ha incrementado. Por lo anterior, la intensidad energética funciona como un indicador de la dependencia en energía del crecimiento económico. Los resultados de Bithas y Kalimeris [78] muestran que cuando se estudia la economía desde esta perspectiva parece claro que desde la segunda mitad del siglo XX existe un desacoplamiento entre el crecimiento económico y el consumo de energía, esto debido a que la intensidad energética ha disminuido desde entonces, sin embargo, los autores hacen notar que el PIB como indicador ha sido ampliamente criticado por su incapacidad de representar de manera real el bienestar que goza una economía y argumentando que

como el fin último de todo proceso económico es satisfacer las necesidades de los seres humanos y con ello crear bienestar, evaluar dicho proceso requiere necesariamente hacer referencia a una escala humana, situación que no puede lograrse utilizando la medida del PIB de manera aislada. Entonces se justifica que la intensidad energética de la economía debe medir la cantidad de energía que se requiere para generar bienestar, siendo el PIB per cápita el mejor medio disponible para aproximar esta situación en la actualidad. Cuando se calcula la intensidad energética como el cociente entre el consumo de energía y el PIB per cápita, interpretado como la cantidad de energía requerida para generar bienestar, se muestra que a escala global no existe un desacoplamiento toda vez que el indicador muestra una tendencia creciente hasta el año 2000 en donde parece estabilizarse. A escala individual, Bithas y Kalimeris, han estudiado distintos países, encontrando que los llamados países “desarrollados” sí parecen mostrar el fenómeno de desacoplamiento, caso contrario son aquellos países que se categorizan como “en vías de desarrollo”, lo cual sugiere la posible existencia de un efecto de compensación. La razón por la que la intensidad energética de algunos países ha disminuido en la actualidad es porque han mudado a otras regiones aquellas actividades que son de una naturaleza energéticamente intensiva, como los procesos de manufactura. Para ilustrar lo anterior hemos utilizando los datos de la Figura I-19 para calcular la intensidad energética a nivel global en un periodo que va de 1965 a 2018 considerando dos casos, en el primero únicamente se tiene presente los valores del PIB y en el segundo se incorpora los asociados al PIB per cápita, los resultados se han indexado al año 1965 con un valor inicial igual a la unidad, esto con la intención de eliminar las diferencias en magnitud y poder apreciar únicamente las tendencias en el comportamiento durante el periodo estudiado. En la Figura I-21 mostramos los resultados de este ejercicio. En ella resulta claro lo señalado por Bithas y Kalimeris, las tendencias de la intensidad energética calculada en su forma estándar sostienen la idea de que el crecimiento económico a nivel mundial ha disminuido su dependencia energética, mientras que si se hace referencia a la creación de bienestar, medido por la magnitud del PIB per cápita, la situación es completamente diferente al exhibir un comportamiento creciente que parece estabilizarse hacia el año 2010. Esta discusión sugiere que en el último de los casos definir si se puede o no hablar

de un desacoplamiento económico depende mucho de cómo se mida e interprete el producto final de la economía, pero incluso si se decide solo tener presente la magnitud de esta, representada por el PIB e ignorando toda escala humana, el hecho de que con el tiempo se puedan generar más unidades monetarias del PIB por cada unidad de energía que se consume en la economía, hace que contar con esta unidad energética sea indispensable.

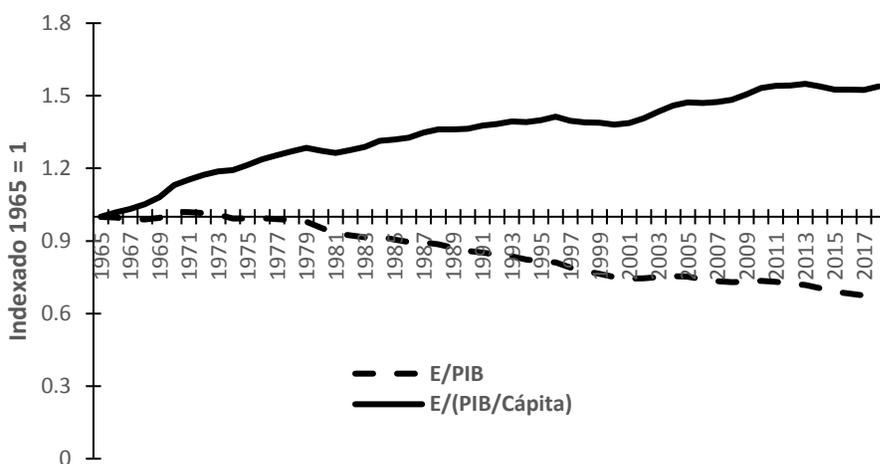


Figura I-21 Evolución en la intensidad energética a nivel global 1965-2018, ver descripción en el párrafo anterior. Elaborado con los datos de [61] [32].

En vista de lo expuesto hasta el momento es claro que la disponibilidad y acceso a cantidades crecientes de energía es y ha sido un factor crítico para el desarrollo, mantenimiento y evolución de las economías. En la actualidad el petróleo, gas y carbón constituyen la fuente principal de esta energía, siendo que en 2018 los combustibles fósiles constituyeron el 84.7% del consumo total de energía primaria, el 15.3% restante corresponde a la participación conjunta de la energía nuclear, energía hidroeléctrica y las fuentes renovables [32]. Los combustibles fósiles son el resultado de una serie de procesos naturales en los cuales mediante presión y temperatura, restos de materia orgánica del pasado han sido transformados en petróleo, gas y carbón. El tiempo necesario para llevar a cabo estos procesos tiene una escala de millones de años, por lo

que, petróleo, gas y carbón son recursos finitos no renovables, como bien ha señalado Ferrari: “se trata de una herencia geológica que una vez consumida no volveremos a tener” [79]. El hecho de que el petróleo, gas y carbón sean de una naturaleza finita claramente implica que la energía que las sociedades humanas pueden aprovechar de estas fuentes también lo es, pero, quizá un aspecto mucho más relevante que la cantidad total que existe de estos recursos en el subsuelo, es que el ritmo con el cual pueden ser explotados no es indefinidamente creciente, lo cual implica que en el largo plazo es imposible sostener las tendencias observadas a lo largo de los últimos 200 años, en donde se ha mantenido una producción continuamente creciente de estos recursos. Esta situación fue en primer lugar señalada por el geólogo estadounidense Marion King Hubbert (1956) quien [80] propuso un modelo para la producción de petróleo en el cual la tasa de extracción del recurso presenta una forma de campana, al principio se tiene un crecimiento exponencial hasta alcanzar un punto de inflexión después del cual el crecimiento se hace cada vez más lento hasta que finalmente se alcanza un punto máximo en la tasa de producción, posteriormente la producción declina hasta agotarse por completo. Haciendo uso de su modelo Hubbert predijo de manera correcta en 1956 que la producción de petróleo en los Estados Unidos alcanzaría su punto máximo en el año 1970. Desde entonces el tiempo se ha encargado de darle la razón a Hubbert y su modelo ha resultado ser efectivo para modelar el comportamiento de la producción de petróleo. Por ejemplo Brandt [81] ha estudiado un conjunto de 139 regiones petroleras que van desde una escala estatal, pasando una nacional y hasta un nivel continental, los resultados de su estudio son que el modelo original de Hubbert reproduce bien las trayectorias de producción de petróleo observadas, aunque también demuestra que para algunas regiones se logra una mejor descripción mediante el uso de modelos matemáticos diferentes, todos ellos describiendo un patrón de crecimiento, pico y declinación, por lo que aunque no exista una única forma para el comportamiento de la producción de petróleo, el pico en ella es inevitable. Otro ejemplo de la validez del modelo de Hubbert se puede encontrar en el trabajo Hallock y colaboradores [82] quienes en 2002 modelaron la posible evolución en la trayectoria de la tasa de producción de petróleo para un conjunto de 46 países y el mundo utilizando un enfoque basado en el modelo de Hubbert. En 2013 estos autores hicieron una revisión de

sus predicciones originales concluyendo que sus estimaciones previas son consistentes con los datos empíricos observados a lo largo de la década que transcurrió después de su primer trabajo. Por lo anterior debe ser claro que la eventual ocurrencia de un pico en la producción de petróleo a nivel mundial no está sujeta a dudas, la cuestión verdadera es cuándo va a suceder y esto último es en realidad ciertamente difícil de contestar. Algunas investigaciones relativamente recientes en el tema realizadas por Maggio y Cacciola [83] y Mohr y colaboradores [84], dan cuenta de la dificultad e incertidumbre que se encuentra alrededor de este tema. Las proyecciones realizadas por Maggio y Cacciola en 2012 apuntan a que en el mejor de los casos el pico para la producción de petróleo tendría lugar en el año 2021 y en el peor de ellos dicho pico habría ocurrido en 2009, para el gas las estimaciones realizadas indican un rango entre 2024 y 2046, finalmente el carbón encontraría su producción máxima entre 2042 y 2062. Mohr y colaboradores han hecho proyecciones en 2014 para la producción a futuro de petróleo, gas y carbón; para el caso del petróleo estos autores estiman que el pico en la producción tendría lugar entre los años 2050 y 2100, resultados que están en función del volumen total recuperable (URR) que se considere como entrada para el modelo, para el caso del gas las estimaciones están en un rango entre 2050 y 2068, finalmente para el carbón las estimaciones caen entre 2018 y 2024. Cuando se considera la producción de todos los combustibles fósiles todos los escenarios planteados por estos autores indican un pico máximo de producción en el año 2025, momento a partir del cual dependiendo del volumen total recuperable de recursos que se considere puede darse una declinación o una situación de producción estancada. Un punto importante a destacar del trabajo de Mohr y col. es que sus proyecciones consideran que una parte importante de la producción petróleo y gas proviene de recursos no convencionales, sobre todo en los pronósticos máximos, recursos que por sus características naturales tienen asociado un alto costo monetario y energético para su extracción, en realidad no importa mucho que se puedan mantener altas tasas de producción de petróleo y gas si la energía neta que puede aprovecharse de ellos es baja y además costosa.

1.7.4 Precio de la Energía y Crecimiento Económico

De manera posterior a los llamados choques petroleros ocurridos durante los años 70, distintas economías alrededor del mundo exhibieron un comportamiento de bajo desempeño económico. La coincidencia temporal entre dichos fenómenos condujo a distintos investigadores a sospechar sobre la existencia de una relación subyacente entre los precios del petróleo (energía) y la actividad económica. Desde entonces se ha generado una gran cantidad de literatura académica dedicada a investigar el tema. Algunas revisiones sobre la literatura existente se pueden encontrar en [85] [86] [87] [88]. La gran mayoría de los trabajos en esta línea de investigación se han concentrado en estudiar el caso de la economía de los Estados Unidos, los resultados obtenidos muestran la existencia de una correlación negativa entre el incremento en los precios del petróleo (energía) y la actividad económica, además de que rechazan la posibilidad de que la relación observada ocurra solo por casualidad ([88] y otros citados ahí). Ejemplos de este fenómeno lo son trabajos como el de Rubin [89] quien tras analizar datos históricos sobre precios de petróleo y tasas de variación en el PIB de Estados Unidos ha mostrado que cuatro de las últimas cinco recesiones experimentadas en el país durante 1970 y 2007 estuvieron precedidas por un incremento en los precios del crudo. Hamilton [90] por otro lado ha determinado que once de las últimas doce recesiones ocurridas en Estados Unidos después de la segunda guerra mundial estuvieron precedidas por un incremento en los precios del petróleo. Murphy y Hall [91] han mostrado gráficamente que durante el periodo de 1970 y 2007 cada vez que el precio del barril del petróleo estuvo por encima de 80 dólares, considerando valores ajustados por inflación a precios del 2008, la economía de los Estados Unidos experimentó sus mayores recesiones, señalando que en todas se observa un incremento en los precios acompañado de una disminución en el consumo de petróleo, mientras que los periodos de expansión económica muestran todo lo opuesto. Los mismos autores apuntan que no todas las recesiones económicas pueden ser explicadas por un incremento en el precio de la energía indicando que no es el único factor involucrado en el fenómeno. En la misma línea Fizaine y Court [60] han argumentado la existencia de un precio máximo del barril de petróleo que puede soportar la economía de Estados Unidos sin entrar en recesión. Este valor máximo no es estático y se encuentra

en función de la cantidad de petróleo que utiliza la economía por cada unidad generada del PIB, los resultados de estos autores muestran que durante el periodo de 1979 a 1982 el precio del petróleo estuvo por encima o ligeramente por debajo de los límites tolerables, afectando de forma directa la capacidad de crecimiento del país durante aquellos años. El año 2008 es otro punto en el cual el precio del barril estuvo considerablemente cercano al precio tolerado.

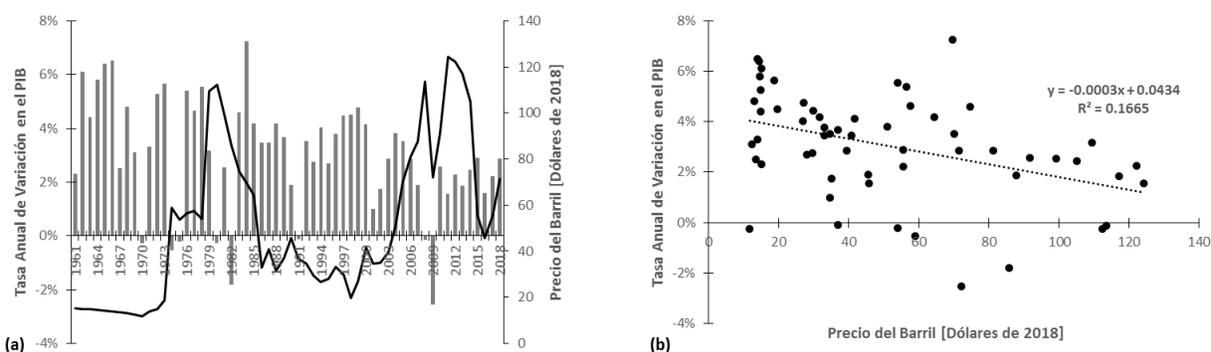


Figura I-22 (a) Tendencias en la tasa anual de variación en el PIB de Estados Unidos (barras) y precio del barril de petróleo (línea) 1961-2018 (b) Tasa anual de variación en el PIB vs precio del barril de petróleo 1961-2018. Elaborado con datos de [32] [61].

Aunque los trabajos mencionados anteriormente se centran en el caso de Estados Unidos, las investigaciones que se han dedicado a analizar otros países han llegado a conclusiones similares (ver trabajos citados en [86]), el incremento en los precios del petróleo parece afectar de forma negativa el desempeño de estas economías, un análisis somero sobre los datos correspondientes a los países miembros de la OCDE permite ver este hecho. En la Figura I-23 hemos graficado los datos para la tasa anual de variación tanto para el PIB como para el consumo de petróleo en los países miembros de la OCDE, aquí se puede observar como la variación de uno sigue con bastante cercanía el comportamiento del otro, esto es, cuando la economía crece el consumo de petróleo, estrictamente petrolíferos, también aumenta. Por otro lado al comparar el precio del barril de petróleo con la tasa anual de variación en el PIB se encuentra que entre ellos existe una relación inversa, por lo que el incremento en los precios del crudo está asociado con

una disminución en el crecimiento económico, más adelante se ofrece una explicación del mecanismo que actúa detrás de este fenómeno.

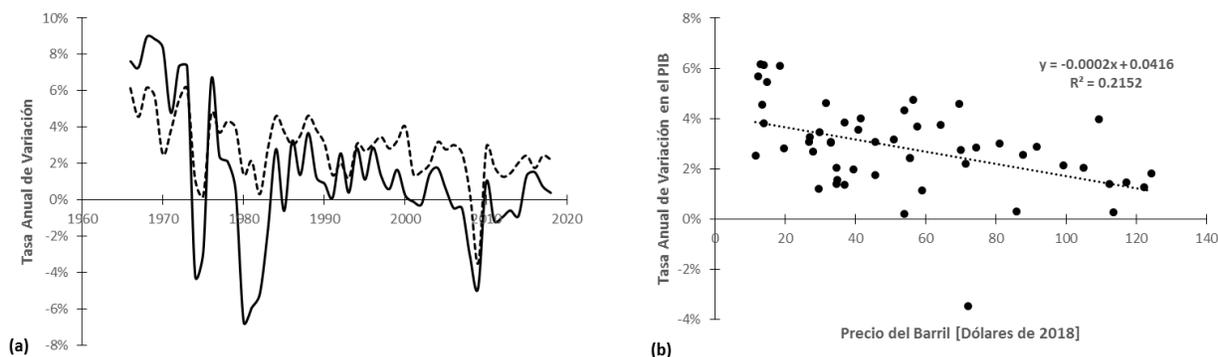


Figura I-23 (a) Tendencias en la tasa anual de variación en el PIB países miembros OCDE (línea punteada) y en el consumo de petrolíferos (línea continua) 1965-2018 (b) Tasa anual de variación en el PIB vs precio del barril de petróleo 1965-2018. Elaborado con datos de [32] [61].

Lo discutido hasta el momento muestra que los precios altos de la energía, particularmente del petróleo, afectan de forma negativa al desempeño de las economías. Siguiendo este razonamiento parecería, en un primer análisis, bastante atractivo y seguro concluir que los precios bajos deben tener un efecto contrario y por tanto son mucho más deseables. Sin embargo, aunque esto último resulta verdadero hasta cierto punto, la realidad es que los precios bajos conducen a otra suerte de situaciones que no son menos problemáticas que la carencia de crecimiento económico provocada por precios altos. Autores como Alexander [92] han hecho notar esta situación al señalar que cuanto más barato es el petróleo, económicamente hablando, más caro resulta en términos ambientales. Lo anterior se debe a dos razones principales, en primer lugar, a que los precios bajos del petróleo motivan su consumo lo cual facilita que se dé un proceso de expansión económica el cual involucra un mayor consumo de recursos naturales, un mayor impacto a los ecosistemas y puntualmente una mayor emisión de gases efecto invernadero. Por otro lado, el petróleo barato hace que otras fuentes de energía, como las renovables, resulten menos competitivas deprimiendo la inversión que se hace en ellas, retrasando los procesos de transición energética. En pocas palabras podemos decir que

el petróleo barato permite que nuestras economías funcionen de la misma manera en como lo han venido haciendo en los últimos 200 años con todos sus beneficios pero también con todos sus problemas.

Otro efecto negativo que se desprende directamente de una situación de precios bajos del petróleo tiene que ver con el cómo estos afectan la capacidad de producción en el mediano y largo plazo [92], la reducción en los precios del hidrocarburo desmotivan la inversión en el desarrollo de nuevos recursos petroleros a la par de que motivan su consumo, lo cual, tiene la capacidad de crear una situación de tensión potencial entre la oferta y la demanda del recurso, lo que a su vez puede desencadenar un aumento en los precios del petróleo trayendo consigo todos los efectos negativos para las economías que ya hemos comentado antes. La razón que explica el por qué los precios bajos de la energía conllevan efectos negativos para la industria energética se encuentra dentro de la naturaleza misma de la explotación de un recurso energético como lo es el petróleo y de otras fuentes de energía en lo general. Para entender este punto sirve tener presente los perfiles típicos y estilizados para la producción de un campo de petróleo y la inversión en su explotación mismo que hemos ilustrado en la Figura I-24.

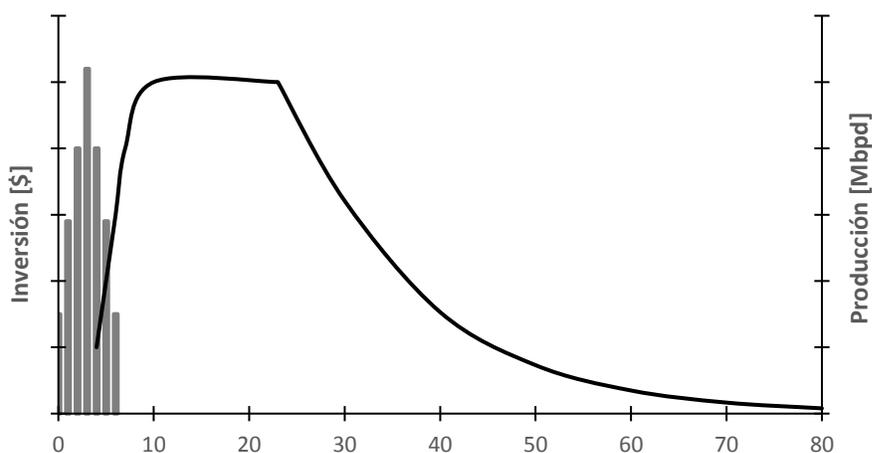


Figura I-24 Curvas típicas para la inversión (barras) y producción de petróleo (línea negra) en un campo convencional. Adaptado de [93].

Como puede apreciarse en la figura anterior la producción de petróleo prosigue a la inversión, ya que no se puede producir lo que no se ha descubierto y no se puede utilizar el petróleo que no haya sido extraído. Una vez que la producción comienza esta tenderá a seguir una forma característica de campana, también conocida como curva de Hubbert, en donde se tiene un primer periodo de crecimiento, posteriormente se alcanza un punto máximo de producción, que en efecto puede resumirse a un solo punto o puede extenderse durante algunos años, y finalmente, la producción entrará en un periodo de declinación. Es precisamente este último punto el que se quiere rescatar para la discusión que se viene planteando, la producción de petróleo, ya sea que provenga de un pozo, de un yacimiento, de un campo, de una región o de un país o grupo de países, tenderá natural y eventualmente a declinar con el paso del tiempo, por lo cual, mantener una producción creciente que sirva para satisfacer una demanda creciente, o incluso mantener un nivel constante de producción, requiere necesariamente del desarrollo continuo de nuevos recursos petroleros cuya producción sustituya y aumente aquella que eventualmente se va a ir perdiendo de los recursos anteriores, la disponibilidad de petróleo en el futuro queda en gran parte determinada por la inversión que se hace en el presente y es esta inversión la que se puede ver potencialmente afectada por la existencia de precios bajos del hidrocarburo. Este último punto se desprende del hecho de que en la actualidad las economías alrededor del mundo funcionan dentro de un sistema económico que puede describirse como Capitalismo Monetario [94], siendo este un sistema que se distingue de otras formas de organización económica que han existido a lo largo de la historia de los seres humanos porque el objetivo último de la producción es el buscar obtener ganancias monetarias y en donde la producción no se lleva a cabo si no existe la certeza de que dicho objetivo pueda realizarse, sin importar que tan deseable o necesarios puedan ser los bienes y servicios que pueden obtenerse de esa producción. Si el fin último dentro de este sistema de producción es generar una ganancia monetaria, entonces, el precio al cual deben venderse los bienes y servicios producidos debe ser mayor al costo de producirles y en el caso particular del petróleo, y en general de la energía, se tiene que con el paso del tiempo llega un momento en el cual estos costos se comportan de forma creciente, por

lo cual, si el precio al cual pueden venderse estos recursos energéticos no aumenta entonces su explotación no se ve justificada.

Para el caso del petróleo y gas, autores como Reynolds [95] nos explican de forma detallada como incluso ignorando los costos asociados a la extracción del recurso y solo teniendo en cuenta el costo vinculado a la búsqueda del mismo eventualmente podemos encontrarnos con una situación de costos crecientes, lo anterior pudiendo incluso ocurrir después de un largo periodo de costos a la baja. Lo que este autor plantea es que el proceso de exploración petrolera inicialmente parte desde un punto en donde la información sobre el recurso fósil es escasa e incompleta, quien busca petróleo no puede conocer con antelación en dónde es que se encuentran localizados, por ejemplo, los volúmenes más grandes y más sencillos de extraer, de hecho, ni siquiera puede tener la certeza de que en efecto exista petróleo y de existir cuál es el tamaño real total del recurso. El hecho de que el petróleo se encuentre (escondido) en el subsuelo conlleva a que incluso si extraerlo no supone costo alguno siempre va a existir el costo inescapable de hallarlo. Esta situación comienza a cambiar conforme el proceso de exploración avanza y se va descubriendo el petróleo, con cada nuevo descubrimiento la información sobre la posible localización del recurso mejora y se acumula, aumentando con ello las probabilidades de hallar más del mismo, esto es, que cuanto más información esté disponible más sencillo se hace el proceso de búsqueda reduciendo con ello los costos asociados con esta actividad, sin embargo, debe tenerse presente que al ser petróleo un recurso finito eventualmente tendrá que darse una situación de agotamiento, con cada nuevo descubrimiento se reduce el volumen que queda por descubrir, eventualmente ocurriendo que sin importar de cuanta información se disponga los volúmenes que se descubran son cada vez menores y esto hace más difícil y costoso hallarlos inaugurando con ello un periodo de costos crecientes.

Morgan [96] describe una situación similar a lo anterior pero para los recursos energéticos en general, en donde a lo largo del tiempo los costos⁶ para obtener la energía

⁶ Aquí tenemos que aclarar que al costo que este autor se refiere es al costo energético de obtener energía visto como una fracción de la producción total, sin embargo, aquí lo hemos citado para ejemplificar la naturaleza creciente de los costos en general.

que se consume en la economía describen una forma característica de campana invertida (ver Figura I-25). Este autor señala que existen cuatro factores que intervienen en la determinación del costo de la energía: 1) El alcance geográfico, 2) las economías de escala, 3) el agotamiento del recurso y 4) el desarrollo tecnológico. Los primeros dos factores actúan reduciendo el costo de la energía, el primero de forma similar a lo que ha discutido antes, sin información previa no puede asegurarse que los recursos que se encuentran y explotan primero son verdaderamente los que ofrecen los mejores rendimientos, por otro lado, el efecto de las economías de escala reduce costos al incrementar el tamaño de las operaciones ya que ello conduce a repartir dichos costos entre un mayor volumen de producción. El tercer factor, el agotamiento, tiene un efecto contrario a los dos anteriores al aumentar los costos de producción. Esto último también ya se ha hecho notar antes y aunque se había acotado solo al proceso de exploración debe ser claro que no se resume solo a esto. Solo por ejemplificar, se señalará que el mecanismo principal de producción de petróleo y gas se encuentra en el diferencial de presión que existe entre el yacimiento en donde estos recursos se localizan y la superficie. A su vez, la presión en yacimiento se encuentra en función de los volúmenes de hidrocarburos presentes, por tanto, conforme estos últimos se extraen la presión disminuye agotando con ello la capacidad de empujar el petróleo y gas hacia la superficie. Es en este punto donde se tienen que aplicar técnicas de recuperación especiales, que en nuestro ejemplo, consistirían en asistir con energía externa al yacimiento inyectándole de agua o gas para poder mantener o restablecer la presión y así la producción. Debe ser claro que esto último deja a la producción de hidrocarburos en una situación que es mucho más costosa y requiere de una mayor cantidad de recursos que la que se tenía al principio en donde se sacaba provecho de las condiciones existentes. Finalmente se tienen los efectos de la tecnología los cuales, de acuerdo con Morgan, primero tendrán un efecto positivo que, combinando con el alcance geográfico y las economías de escala, potenciará la disminución de los costos de la energía, posteriormente, una vez que la influencia del

agotamiento se haga presente, el papel de la tecnología será desacelerar, pero no eliminar, el ritmo con el cual los costos incrementan. ⁷

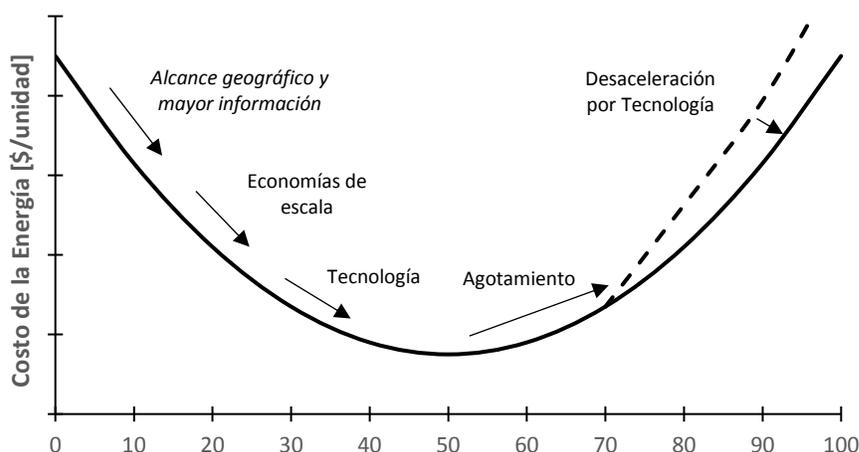


Figura I-25 Curva estilizada sobre la evolución en el costo de la obtención de energía. Adaptado de [96].

Aunque los argumentos presentados hasta ahora resultan ser mucho más apegados a lo teórico y conceptual, la evidencia empírica disponible no parece contradecirlos. En este sentido se tiene que a lo largo de las últimas dos décadas se ha observado un incremento tanto en los costos de exploración, como en los costos de desarrollo para nuevos proyectos (CAPEX) y también en los costos operativos (OPEX) [97]. Análisis como los realizados por la compañía Rystad Energy en 2020 [98] dan cuenta de este hecho, en donde sus estimaciones muestran que el precio mínimo requerido para poner a disposición de la economía, petróleo que provenga de recursos en aguas profundas, aceite extra pesado o desde recursos como las denominadas arenas bituminosas, requieren que se dé un incremento en los precios del hidrocarburo para que dichos proyectos resulten rentables. Lo anterior quiere decir que conforme el petróleo comience a provenir desde fuentes no convencionales, inescapablemente se tiene que enfrentar una situación de

⁷ El hecho que el EROI de los recursos petroleros disminuye a lo largo del tiempo, tal y como se muestra en el siguiente capítulo, es un claro ejemplo de que los avances tecnológicos no evolucionan con el ritmo suficiente como para hacer frente al proceso de deterioro en la calidad de este tipo de recursos.

costos crecientes, siendo esto último un aspecto que choca con la aparente necesidad de energía barata que tiene la economía para poder funcionar de manera adecuada.

1.7.5 Gasto en Energía y Crecimiento Económico

El concepto de gasto en energía permite integrar la relación que hay entre el desarrollo económico, el consumo de energía y los precios asociados a esta, ofreciendo un enfoque alternativo desde el cual abordar y estudiar los efectos que tiene sobre la economía la variación en las cantidades y precios de los recursos energéticos que se consumen. El gasto en energía se define como la cantidad de dinero que una economía utiliza para hacerse de la energía que consume y usualmente se expresa como una fracción del PIB [60]. Los trabajos realizados en esta línea señalan que existe una relación inversa entre la actividad económica y el gasto realizado en energía. Por ejemplo, King y colaboradores [74] han estimado los gastos en energía para 44 países durante un periodo que comprende los años entre 1978 y 2010, juntos, estos países constituyen más del 90% del producto bruto a nivel global y cerca del 80% del consumo total de energía. Los resultados obtenidos indican que el gasto en energía a nivel mundial cayó de un máximo de 10.3% en 1979 a un mínimo del 3% en 1998, posteriormente repunta a un segundo pico en 2008 con un valor del 8.1%. En un segundo trabajo King [99] ha utilizado los datos previamente calculados para el gasto en energía y los ha comparado con la información referente a la variación anual en el PIB de cada uno de los países estudiados concluyendo que los gastos en energía están significativamente correlacionados de forma inversa con las tasas anuales de variación en el PIB cuando se considera un desfase de un año entre las variables. Otro ejemplo se encuentra en el trabajo de Bashmakov [100], quien ha estudiado los gastos en energía para Estados Unidos y para los países miembros de la OCDE considerando los precios al consumidor, determinando que existen límites para el gasto en energía por debajo de los cuales no es posible encontrar una correlación entre estos y el crecimiento económico, sin embargo, una vez que dichos límites han sido alcanzados o superados tanto el crecimiento económico como la demanda de energía se ven reducidos hasta que el gasto en energía regresa a niveles por debajo del límite. Para

Estados Unidos Bashmakov calcula que el límite en el gasto en energía se encuentra entre el 8 y 10%, mientras que para el conjunto de los países miembros de la OCDE este límite se encuentra en un rango entre el 9 y 11%. De acuerdo a Bashmakov por debajo de este umbral son otros factores los que determinan el comportamiento en el crecimiento económico y la energía no representa un límite para el mismo, pero una vez que dicho umbral ha sido alcanzado o superado el efecto de otros factores que contribuyen al crecimiento económico queda anulado y este se ve reducido. Por otro lado Murphy y Hall [91] han mostrado gráficamente que la economía de los Estados Unidos entra en recesión cada vez que el gasto en petróleo realizado supera el 5.5% del PIB. En otro trabajo Aucott y Hall [101] han calculado los gastos en energía para Estados Unidos pero considerando el gasto en energía primaria, incluyendo aquí el gasto en carbón, gas, petróleo crudo y mineral nuclear, y han comparado estos con la tasa de crecimiento económico del país durante el periodo de 1950 a 2013. Sus resultados confirman de nueva cuenta la existencia de una relación inversa entre el tasa de variación anual del PIB y los gastos en energía, de acuerdo al mejor ajuste lineal posible realizado por estos autores para los datos obtenidos, el límite de gastos en energía por encima del cual no hay crecimiento económico se encuentra en una vecindad alrededor del 4%. Finalmente tenemos el trabajo de Fizaine y Court [60] quienes han calculado series históricas para el gasto en energía realizado en Estados Unidos, Reino Unido y el Mundo, combinando esta información con la referente a la variación en el producto interno bruto han logrado identificar que en general, aquellos periodos caracterizados por altos gastos en energía están asociados con recesiones económicas y tasas de crecimiento bajas, por el contrario los periodos en donde se ha encontrado que el gasto en energía es bajo muestran tasas de crecimiento económico altas. Para el caso del Reino Unido estos autores han estudiado un periodo que va del año 1300 al 2008, los resultados obtenidos indican que los últimos 200 años no solo han estado caracterizados por la disponibilidad de grandes cantidades de energía, sino que nunca antes esta había sido tan asequible. Court y Fizaine han estudiado con mayor detenimiento el caso de los Estados Unidos debido a la cantidad y calidad de la información disponible para este país (ver Figura I-26), sus resultados apuntan a que durante el periodo comprendido entre 1945 y 1973, periodo en donde esta economía tuvo

las tasas de crecimiento más altas en su historia, los gastos en energía experimentaron una disminución pasando del 8 al 4% entre el principio y fin del intervalo. Las conocidas crisis petroleras de 1974 y 1979 muestran gastos en energía por encima del 10% y son puntos de recesión económica, después de 1980 este indicador muestra una tendencia constante a declinar alcanzando un mínimo de 4.2% en 1998, punto a partir del cual incrementó hasta un pico con valor de 7.8% en 2008, para años posteriores el indicador parece haberse estabilizado alrededor del 7%. Mediante la aplicación de una regresión lineal múltiple Court y Fzaine determinan un modelo que permite obtener la tasa de variación en el PIB de los Estados Unidos en función de los gastos en energía, la inversión en capital y la tasa de desempleo, a través de este modelo los autores calculan que el gasto en energía máximo que puede tolerar esta economía sin sufrir una recesión es del 11%, cuando solo se tienen en cuenta los gastos en petróleo el límite se ubica en el 6%. Estos resultados coinciden con las observaciones hechas previamente por Bashmakov y Murphy y Hall.

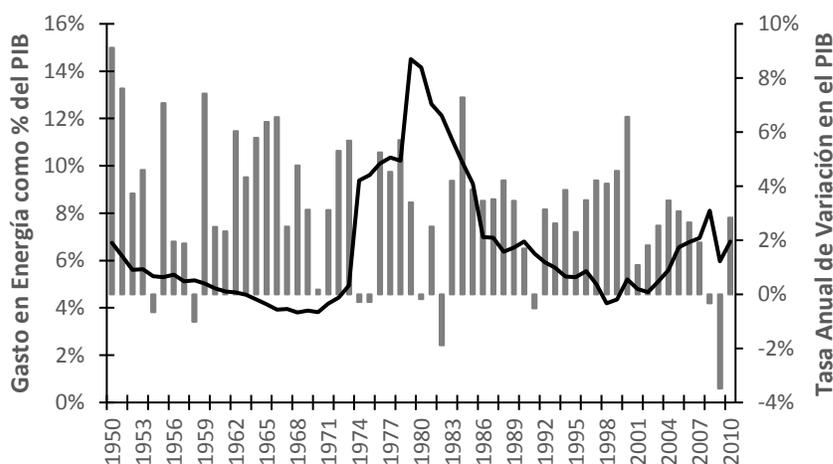


Figura I-26 Evolución en el gasto en energía (línea continua) y la tasa anual de variación en el PIB (barras) para Estados Unidos 1950-2010. Elaborado con los datos de [60].

La relación inversa entre el gasto en energía y la actividad económica constituye una prueba de que la disponibilidad de grandes cantidades de energía barata es y ha sido un

factor indispensable para el crecimiento de las economías, una explicación del mecanismo mediante el cual esta relación opera reduciendo e incluso aniquilando el crecimiento económico en respuesta a un incremento de los precios de la energía y con ello el de los gastos monetarios para adquirirle se encontra en los trabajos de Murphy y Hall [91] y Tveverg [102]. Murphy y Hall han propuesto que cuando el precio de la energía incrementa parte del dinero que se gasta en la economía se reasigna desde sectores que previamente habían contribuido al crecimiento económico, principalmente sectores que constituyen gasto discrecional, y es utilizado para pagar por esta energía más cara. En este sentido el incremento en los precios de la energía conduce a recesiones económicas al absorber una mayor cantidad del dinero disponible dentro de la economía, reduciendo la fracción que podría utilizarse para invertir o gastar en otras áreas de la misma. Lo anterior principalmente generado por el hecho de que la energía es un recurso inelástico, es decir, que cuando el precio de esta incrementa, su consumo no cambia demasiado debido a que en gran parte su uso no prescindible para los consumidores. Sin embargo, por lo general el incremento en los precios de la energía conduce a un incremento del precio de todos los otros bienes y servicios que se intercambian dentro de la economía, muchos de los cuales contrario a los recursos energéticos sí son de una naturaleza elástica y por tanto el consumo que se hace de los mismos reduce, por lo que la actividad económica disminuye. Tveverg describe una situación bastante similar al ilustrar los efectos que puede tener el incremento en el precio del petróleo sobre los países pertenecientes a la OCDE, que en su gran mayoría son importadores de petróleo, haciendo notar que esto puede llegar a ser diferente en aquellos países que son exportadores o en los que el petróleo no constituye una parte importante de su matriz de consumo energético. Para un país importador de petróleo el pago por este recurso representa una salida de dinero del país, frente a un incremento en el precio y suponiendo que la demanda del hidrocarburo se mantiene constante, la magnitud de este flujo de salida incrementa, esta salida de fondos representa una cantidad de dinero que no reaparece en otro sector dentro de la economía. Con el incremento en los precios del hidrocarburo se experimenta un aumento en el precio del resto de los productos que se venden dentro de la economía, incluyendo aquí los alimentos y otros artículos de uso común, principalmente porque todos requieren ser transportados.

Este incremento en los precios de los productos vendidos dentro de la economía tiende a aumentar las expectativas sobre la inflación que puede darse dentro la misma y con ello incentivar un incremento en las tasas de interés. Lo anterior principalmente porque los prestamistas exigirán una compensación por la disminución en el poder adquisitivo del dinero que se les pague en el futuro. Por sí mismo el aumento en los precios del petróleo junto con el de los alimentos sería suficiente como para reducir el gasto discrecional que realizan los consumidores, pero si además a todo lo anterior se suma un incremento en las tasas de interés sobre los préstamos, se genera motivación adicional para que los consumidores recorten sus gastos en consumo discrecional. Lo último conduce a que los consumidores dentro de la economía compren menos carros o casas nuevas, acudan menos a restaurantes o tomen menos vacaciones y algunos de ellos serán incapaces de pagar sus préstamos debido a la alza en los intereses, en este ambiente las empresas podrían experimentar una disminución en su rentabilidad y tener la necesidad de despedir trabajadores, el probable resultado de la suma de esta serie de eventos es una recesión económica y con ello una disminución en el consumo de energía debido a la baja actividad económica. En la Figura I-27 se ha realizado una ilustración de la posible redistribución de los gastos que realizan los consumidores dentro de la economía antes y después de experimentar un incremento en los precios de la energía y con ello en el de los productos esenciales de acuerdo a lo discutido anteriormente.

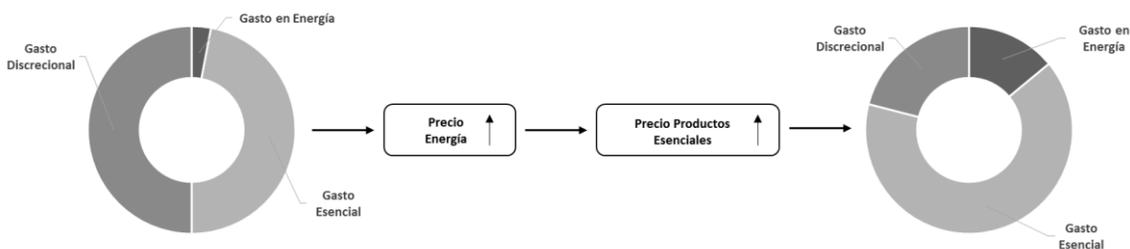


Figura I-27 Redistribución del gasto realizado por los consumidores una vez que se experimenta un incremento en los precios de la energía.

1.7.6 Los Efectos del IRE sobre el Crecimiento Económico

Hasta aquí se han señalado los aspectos más fundamentales de la relación que existe entre el desarrollo económico, el consumo y costo de la energía, de la misma forma se ha hecho notar que tanto matemática como empíricamente el IRE guarda una relación inversa con el precio de la energía y que la disminución en este indicador reduce la cantidad de energía neta que puede aprovechar la sociedad del recurso energético que se explota, siendo la energía neta mucho más importante que la cantidad total de energía recuperada ya que representa la energía disponible para alimentar otras actividades que no están relacionadas de forma directa con los procesos de obtención de energía. Teniendo presente lo anterior se hace posible entender los impactos que puede tener sobre la economía la disminución del IRE asociado a la extracción de petróleo y gas, recursos que constituyen una de las principales fuentes de energía de las sociedades modernas. La conclusión principal de los distintos trabajos en donde se ha estudiado la situación actual de la extracción de petróleo y gas alrededor del mundo es que el IRE asociado a estas actividades está disminuyendo (ver Capítulo III) lo cual implica que con el tiempo el costo energético de extraer estos recursos ha incrementado, este fenómeno surge como una combinación de factores entre los cuales se pueden mencionar la disminución en la producción, la incorporación de técnicas que se muestran intensivas en el uso de energía como lo es la recuperación secundaria y mejorada o la extracción desde fuentes que por sus características físicas y geológicas hace que sea necesario emplear mayores cantidades de energía para poder explotarles. En esta situación tenemos por ejemplo a las arenas bituminosas en Canadá para las cuales se ha determinado que durante el periodo de 1994 a 2008 el proceso de su extracción tuvo un valor de EROI promedio de 4 [103], en comparación, de acuerdo a los datos de Court y Fizaine la extracción de petróleo a nivel mundial durante este mismo periodo tuvo un EROI con un valor promedio de 22 [31]. Lo que la disminución en el IRE de la extracción de petróleo y gas significa para la economía es que el precio necesario para que las sociedades puedan disponer de los recursos que aún permanecen el subsuelo es elevado, por ejemplo de acuerdo a los datos publicados en 2019 por la compañía analista Rystad Energy [104] el precio de equilibrio para la extracción de petróleo desde arenas bituminosas es de 83

dólares, lo cual quiere decir que por debajo de este precio su extracción no es rentable. Para el caso de la extracción de petróleo en países de Medio Oriente esta misma compañía estima un precio de equilibrio de casi la mitad que el anterior situándolo en 42 dólares. En este contexto parece claro que la disminución del IRE compromete la existencia en el futuro de todos los factores que han sido claves para el desarrollo económico de los últimos 200 años, por un lado implica el incremento en los precios del crudo, por el otro afecta directamente a la disponibilidad energética. Al ser el petróleo y gas recursos finitos, de acuerdo a la teoría de Hubbert y a la evidencia empírica, el ritmo con el cual pueden ser extraídos eventualmente alcanza un límite y posteriormente comienza a declinar pero quizá mucho más importante y como ya se ha señalado, la reducción del IRE con el cual estos recursos se extraen disminuye la cantidad de energía que puede dedicarse por la economía a otras cuestiones que no sean la obtención de la misma (e.g. prestar servicios de educación, salud, producción de alimentos, etc.). Por lo anterior, apostar por el crecimiento económico basado en el uso de petróleo y gas como principales fuentes de energía es insostenible en el largo plazo. De hecho, en la situación actual en la que el IRE se encuentra declinando este modelo de desarrollo económico tampoco parece la mejor opción de acuerdo a los autores Murphy y Hall [91] quienes basados en el hecho de que las últimas recesiones económicas ocurridas en Estados Unidos han estado precedidas por un incremento en los precios del petróleo han propuesto un modelo que han denominado como “La paradoja del crecimiento” (ver Figura I-28). En dicho modelo el incremento de la actividad económica medida por el producto interno bruto conlleva a un incremento en la demanda de energía, el incremento en la demanda aumenta la producción de petróleo que proviene de recursos con menor EROI, el menor EROI asociado a estos nuevos recursos incrementa los costos de producción y con ello el precio de venta, los altos precios de petróleo disminuyen la actividad económica o producen recesiones, con una menor actividad económica disminuye la demanda de energía, con la disminución en la demanda bajan los precios del crudo y con ello se tienen de nueva cuenta los incentivos para utilizar el petróleo como motor de la economía. En resumen, mantener la dinámica del crecimiento económico como ha sido hasta nuestros

días necesita la extracción de recursos energéticos cada vez más costosos y este incremento termina por aniquilar el crecimiento económico.

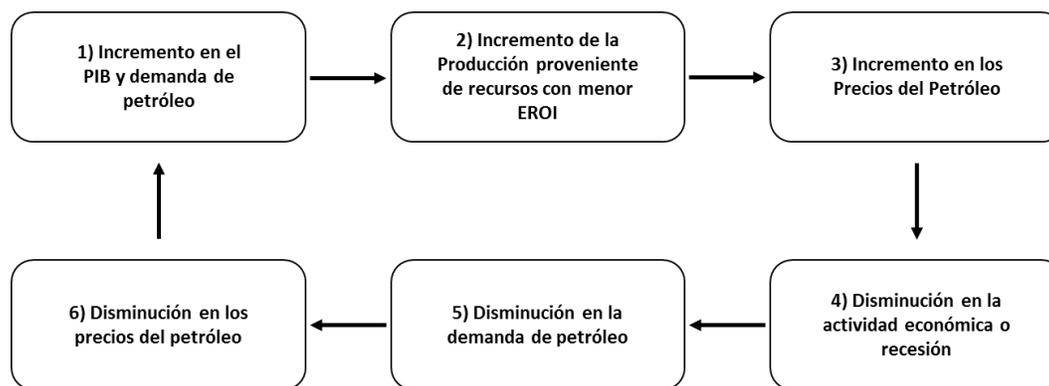


Figura I-28 Paradoja del crecimiento propuesta por Murphy y Hall [91]. Adaptado de [91].

Sobre el modelo de la paradoja del crecimiento se mencionará que en una revisión de la situación energética actual realizada por los autores Ferrari y Ocampo [105] se ofrece evidencia que sugiere que esta podría estar teniendo lugar. Dichos autores han hecho notar que el incremento experimentado en los precios del crudo después de crisis económica mundial del año 2009 hizo posible la extracción de recursos que antes eran económicamente inviables como lo son los yacimientos no convencionales shale oil y shale gas. Con el incremento en los precios del crudo después de 2009 tanto la oferta como la demanda del recurso se vieron sustancialmente afectadas, por el lado de la oferta se dio una sobre producción al estimular la producción de los recursos no convencionales y la proveniente de los países miembros de la OPEP, en el caso de la demanda ocurrió una disminución principalmente por parte de los países miembros de la OCDE, siendo Europa y Japón quienes presentaron la mayor reducción en su consumo, con una demanda deprimida y un exceso en la oferta del crudo los precios comenzaron a disminuir sobre la segunda mitad del año 2014. Con la caída en los precios del crudo se abandonaron muchos proyectos de explotación a nivel mundial, principalmente aquellos involucrados en yacimientos no convencionales. Dentro del contexto de la paradoja del crecimiento esta corresponde a algún punto entre la cuarta y sexta etapa (ver Figura I-28),

la disminución en los precios del crudo podría resultar ser motivación suficiente como para impulsar el desarrollo económico basado el uso de petrolíferos de nueva cuenta.

1.8. Las Fases del IRE

Los estudios de distintos autores parecen mostrar que el IRE está disminuyendo incluso cuando la obtención de energía, representada por la producción de petróleo y/o gas, se encuentra aumentando (ver Capítulo III). Este hecho permite concluir que el IRE alcanza su valor máximo en algún punto previo a la ocurrencia de la producción máxima. Matemáticamente lo anterior tiene un significado importante ya que implica la existencia de un desfase entre las curvas de producción energética total y de energía neta, siendo esta última quizá mucho más importante que la primera al representar la energía disponible que la sociedad puede utilizar para satisfacer todas aquellas actividades que no están directamente relacionadas con la obtención de energía. Los trabajos de Freise [42] y Court y Fizaine [31] quizá constituyen los mejores ejemplos empíricos sobre las situaciones mencionadas. Freise ha estudiado el EROI asociado a la producción de petróleo y gas en la región oeste de Canadá durante un periodo que va de 1947 a 2009 encontrando que el máximo valor de EROI para esta región se alcanzó en el año de 1973, mientras que el pico en la producción de hidrocarburos totales tuvo lugar hasta el año 2000. Para un periodo más corto, de 1993 a 2009, Freise muestra el comportamiento en el EROI para la producción de gas por separado, en este caso el EROI muestra una clara tendencia a declinar pasando de un valor de 38 al inicio del periodo a un valor de 20 hacia el final, además de esto se presenta un desfase entre las curvas de producción total y de energía neta, teniendo que el máximo de la primera ocurre en el año 2006 mientras que para la segunda dicho máximo se presenta en el año 2002. Por otro lado Court y Fizaine han obtenido el EROI asociado a la extracción de petróleo y gas a nivel global mediante un método basado en el precio de estos para un periodo que abarca de 1860 y 1890, respectivamente, hasta 2012, los resultados de estos autores indican que el EROI máximo para la extracción de crudo se habría alcanzado en 1930 con un valor alrededor de 50, mientras que para el gas el EROI máximo tuvo un valor cercano a 150 en el año de 1940.

El desfase que existe entre el IRE máximo y la producción máxima es una propiedad que parece emerger de forma natural en los modelos matemáticos que han sido propuestos para caracterizar el comportamiento del índice de retorno energético. Por ejemplo, Dale y colaboradores [106] quienes han propuesto una función explícita para modelar el EROI han argumentado que el valor máximo que este alcanza ocurre alrededor de un cuarto del tiempo total que dura el ciclo de producción del recurso energético asumiendo que dicha producción puede representarse mediante una función logística. Lo anterior debido a que en ese punto esta curva presenta un punto de inflexión provocando que la producción experimente crecimientos decrecientes y por tanto cualquier inversión energética que se realice para explotar dicho recurso pasado un cuarto del ciclo temporal total estará necesariamente sometido a retornos decrecientes. En las secciones 1.8.1 y 1.8.2 mostraremos como teniendo presentes algunas suposiciones generales sobre el comportamiento que deben tener la curva de producción y de consumo de energía del sistema energético es posible demostrar formalmente la existencia de los fenómenos de desfase que han sido observados y propuestos empírica y teóricamente, dando con ello evidencia extra de que este hecho es una característica natural de la explotación de un recurso energético finito como lo son el petróleo y el gas.

En vista de lo presentado en el párrafo anterior creemos que es posible identificar tres fases o periodos para el IRE, la primera de estas fases abarcaría un periodo que va desde el momento en que inicia la recuperación del recurso energético t_0 y hasta el tiempo t_{IREmax} en el cual el IRE alcanza su valor máximo, la segunda fase comenzaría a partir de este punto y continuaría hasta el tiempo t_{Pmax} que es el momento en el que la producción alcanza su punto auge, la tercera y última fase ocuparía un periodo que va desde t_{Pmax} y hasta t_f que marca el punto final del ciclo de producción del recurso energético. En la Figura I-29 se han ilustrado las curvas que describen el comportamiento esperado tanto para el IRE como para la producción total de energía y de energía neta, aquí también se han señalado los tiempos que definen cada una de las fases que se han mencionado anteriormente, debe entenderse que esta imagen solo tiene la intención de ilustrar las relaciones que se han observado entre estas variables, en la realidad las curvas podrían

no ser tan suaves o presentar no uno sino varios picos para cada uno de los elementos involucrados, pero en general el comportamiento debería seguir estas tendencias.

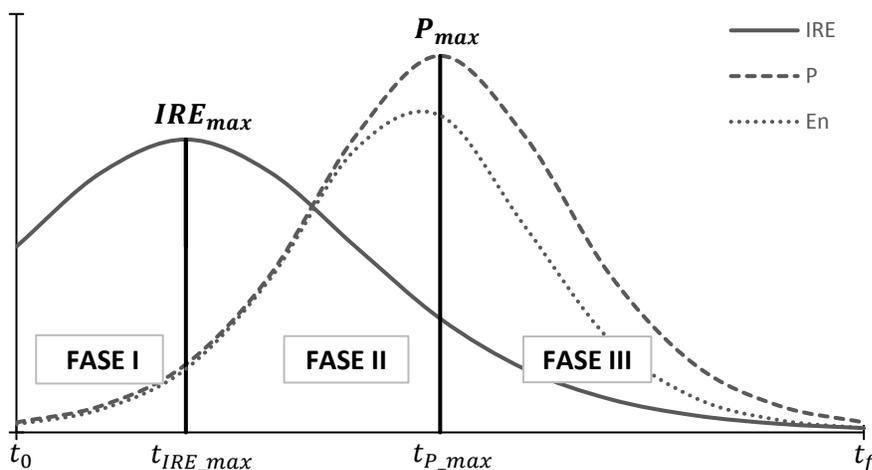


Figura I-29 Fases del IRE.

Describir detalladamente las características de cada una de las fases por las cuales atraviesa el IRE está más allá de los objetivos de este trabajo y de los conocimientos del autor, sin embargo, es posible identificar algunos aspectos que parecen bastante generales. Para ello nos apoyaremos de la Figura I-29 así como de la ecuación (I-17) que representa la derivada con respecto al tiempo de la ecuación (I-3) y que expresa a la energía neta como función de la producción total de energía y el IRE asociado. Usaremos la derivada debido a la propiedad que tiene para indicarnos la dirección de cambio en el energía neta, por ejemplo si esta derivada es positiva entonces la energía neta estará incrementando y si es negativa ocurrirá lo contrario. Observe como las expresiones que se encuentran dentro de los paréntesis son cero o estrictamente positivas y por tanto el signo de la derivada queda definido por los términos $P'(t)$ y $IRE'(t)$ que representan las derivadas respecto al tiempo de la producción y del índice de retorno energético respectivamente.

$$En'(t) = P'(t) \cdot \left(1 - \frac{1}{IRE(t)}\right) + IRE'(t) \cdot \left(\frac{P(t)}{[IRE(t)]^2}\right) \quad (I-17)$$

Sobre la primera fase solo se mencionará que esta debe estar caracterizada por un incremento en la producción energética total, en la energía neta y en el IRE, durante esta etapa parece posible mantener una demanda creciente de energía neta e ignorando otros factores que puedan influir en los precios de la energía estos deberían disminuir, teniendo presentes el incremento en el IRE así como en la oferta del recurso, se puede apreciar como debido al comportamiento creciente del IRE las curvas de producción total y de energía neta son casi indistinguibles durante esta primera fase. La segunda fase se muestra un tanto más complicada que la anterior, aquí el IRE disminuye mientras que la producción energética continua aumentando, como se ha visto en otras secciones la relación que existe entre el IRE y otros indicadores como el precio de la energía es de una naturaleza inversa no lineal, por lo cual los efectos de esta disminución pueden resultar imperceptibles hasta que se alcancen ciertos umbrales. Es por ello que al inicio de este segundo periodo las curvas de producción y energía neta continúan mostrándose indistinguibles, pero conforme se sigue avanzando en el tiempo la segunda comienza a divergir de la primera, lo anterior debido a que conforme se comienzan a explotar recursos de menor calidad o se emplean técnicas que son más intensivas energéticamente hablando, el IRE disminuye progresivamente de tal manera que una fracción de los incrementos que experimenta la producción total es absorbida por el sector energético para cubrir los aumentos en los costos energéticos. Matemáticamente esto puede apreciarse al observar que incluso si la demanda de energía neta se mantuviera constante durante esta segunda fase se requeriría que la producción energética total siga aumentando debido a la disminución en el IRE. Lo anterior ocurre ya que una demanda constante provoca que $En'(t) = 0$, por lo cual se tiene la igualdad $A \cdot P'(t) + B \cdot IRE'(t) = 0$, teniendo presente que $A, B > 0$ y $IRE'(t) < 0$, para satisfacer dicha condición debe ocurrir que $P'(t) > 0$. Otro aspecto importante de esta segunda fase es la posibilidad matemática del desfase entre los picos de la producción total de energía y la energía neta. De ocurrir, este hecho implicaría que los efectos asociados al pico de la producción total

como lo son el incremento en los precios provocados por la disminución de la oferta frente a una demanda creciente podrían presentarse antes de lo esperado, teniendo en cuenta lo anterior, junto con relación inversa que existe entre el IRE y los precios de la energía, consideramos que en algún punto entre el segundo y tercer periodo debe darse un subsidio energético que es creciente a lo largo del tiempo, con lo cual nos referimos a que parte de la energía que se consume debe comenzar a provenir de una fuente energética distinta a la que se produce, con mayor IRE y por tanto de menor precio, esto debido a que los sistemas energéticos forman parte de un sistema económico que los debe obligar a buscar obtener el máximo rendimiento monetario y esto último se puede ver afectado al utilizar como insumo principal el recurso producido. Por supuesto habrá otros sectores de la economía que harán una transición energética para operar con el recurso energético más barato y con ello su demanda energética estará en conflicto con el sistema en cuestión. En un caso ideal el sistema energético debería utilizar como fuente principal de suministro energético aquella que sea de menor utilidad para el resto de la sociedad, pero en la realidad esto está dictado por factores económicos y tecnológicos. Un ejemplo de estos subsidios energéticos lo representa PEMEX en donde en promedio el 80% del consumo total de energía directa durante el periodo de 1999 a 2014 fue cubierto con gas natural, mientras que en términos energéticos el 74% de la energía recuperada provino del crudo extraído [107] [108]. A nivel nacional también es posible observar este subsidio energético, por ejemplo, de acuerdo a los datos de la Agencia Internacional de Energía [109] el consumo propio del sector energético mexicano, que se refiere al consumo directo de energía realizado por el sector energético para llevar a cabo sus actividades, estaba cubierto en 1973 con un 74% proveniente de derivados de petróleo y un 25% de gas natural, para el año 2017 esta situación se había invertido casi por completo, siendo que los derivados de petróleo solo representaron el 25% del consumo total y mientras que la participación del gas natural fue del 64%.

En la tercera y última fase disminuyen la producción total, la energía neta y el IRE, la combinación de estos tres factores hace que el incremento en los precios sea inevitable. Por un lado, se tiene la disminución de la oferta generada tanto por la caída en la producción como por el incremento en el consumo del sector energético, por otro lado,

este incremento genera que el costo monetario de obtener los recursos remanentes sea elevado lo que requiere un incremento en los precios de venta al consumidor para poder hacer rentable su extracción, claramente el precio del recurso energético no puede crecer indefinidamente y de acuerdo a las leyes económicas debería darse un proceso de sustitución que no necesariamente comienza en esta última fase, el problema respecto a esta situación radica en que captar energía de una nueva fuente requiere la creación de infraestructura lo cual conlleva un consumo de energía que puede terminar disminuyendo aún más la energía neta disponible para aquellos sectores que no puedan lograr una rápida transición hacia las nuevas fuentes energéticas, en la situación actual lo anterior se refiere a la construcción de paneles solares, turbinas eólicas, plantas termo solares e inclusive plantas nucleares, un vistazo a la matriz energética global constituida en un 85% por combustibles fósiles permite apreciar de dónde proviene la energía que está dando forma a estas nuevas fuentes energéticas. Matemáticamente, en esta tercera fase es imposible sostener un crecimiento en la demanda energética final representada por la energía neta, ya que $P'(t) < 0$ y $IRE'(t) < 0$, a menos que se agregue un término estrictamente positivo a la ecuación (I-17), para el caso global este término representa la producción energética proveniente de las nuevas fuentes de energía y en el caso regional este término representa a la energía importada.

En vista de lo discutido hasta el momento quizá la cuestión más interesante es determinar en qué fase del IRE nos encontramos actualmente a nivel global. El trabajo de Court y Fizaine [31] mencionado al principio de esta sección nos ofrece la respuesta a esta interrogante. Como hemos dicho estos autores han determinado que el máximo IRE tanto para la extracción de petróleo y gas a nivel global ha ocurrido en el pasado, específicamente en 1930 para el petróleo y en 1940 para el gas. Esto último implica que nos encontramos transitando por la segunda fase, misma que terminará en el momento que la producción de estos recursos alcance su máximo. Para ilustrar esta situación hemos combinado los valores de EROI para el petróleo y gas reportados por Court y Fizaine utilizando la ecuación (I-24) presentada en la sección 1.9, de tal manera que se pueda contar con el EROI representativo de la extracción de petróleo y gas combinado. En la Figura I-30 presentamos estos resultados. De acuerdo a esto, el EROI para la extracción

de petróleo y gas a nivel mundial alcanzó un valor de máximo de 51.4 en 1942 y se ha reducido a 22.4 para el año 2012, estos valores implican que en 1942 los procesos de extracción consumieron alrededor del 2% de la energía total recuperada y para el 2012 este consumo equivaldría al 5% de la producción. Esta situación puede observarse gráficamente en la divergencia que existe entre los valores de producción energética total y de energía neta, situación que parece aún más apreciable después de 1980. Aunque la producción sigue una tendencia positiva el porcentaje de esta producción que puede utilizarse para satisfacer la demanda final disminuye debido al incremento en los requerimientos energéticos de los procesos de extracción, lo cual es ilustrado por la disminución en el EROI asociado. La evolución que tenga el EROI hacia el futuro afectará de manera crítica la disponibilidad de energía neta que puedan gozar las economías. La energía neta representa la energía que puede ser utilizada para fabricar todos los bienes y servicios que son intercambiados dentro de la economía, desde comida, ropa, tecnología, brindar educación y servicios de salud, esta energía es la que se utiliza para iluminar y calentar los hogares, para transportar bienes y personas. Es este superávit energético lo que da forma a nuestras sociedades modernas y las otorga de todas las características que las distinguen. Mientras que la curva de producción energética total se muestra sensible a la cantidad de recurso disponible en el subsuelo, ignorando toda calidad de este. En la curva de energía neta se consideran ambos factores y por tanto representa una medida mucho más apropiada de la oferta energética disponible, no tenerle presente sería equivalente a ignorar los cambios que están ocurriendo dentro del sector energético y por ello este parámetro debería ser incluido y discutido dentro de cualquier plan de desarrollo energético.

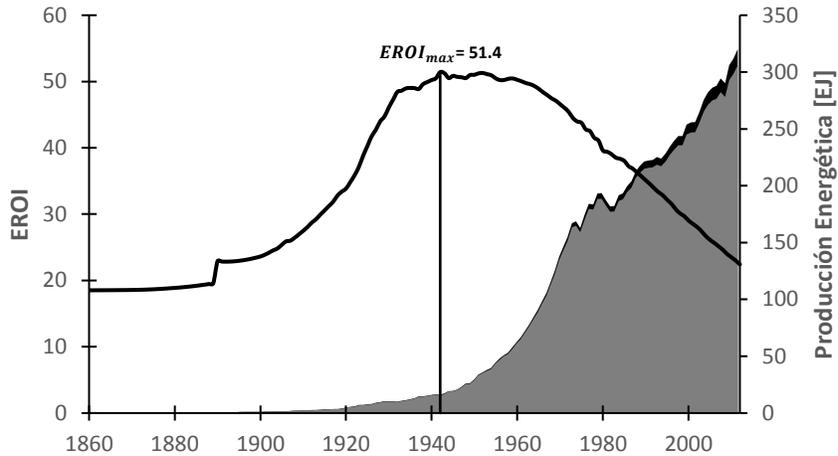


Figura I-30 EROI (línea continua) y equivalente energético total (en negro) y neto (gris) de la producción de petróleo y gas a nivel mundial 1860-2012. Elaborado con los datos de [31].

1.8.1 El Desfase Temporal entre el IRE Máximo y la Recuperación Energética Máxima

En esta sección se muestra como teniendo presentes algunas suposiciones generales para el comportamiento que deben seguir la producción de un recurso energético y el consumo que es necesario realizar para extraer dicho recurso, es posible mostrar de manera formal la existencia de un desfase temporal entre los puntos de máxima producción e IRE máximo.

Suposiciones: Considere que la producción de un recurso energético de naturaleza finita a lo largo del tiempo puede ser descrita mediante una función continua denotada por $P(t)$ y que $C(t)$ también continua describe la inversión energética total que es necesario realizar para obtener dicho recurso. Sabiendo que $P(t_0) = P(t_f) = 0$, en donde t_0 y t_f representan el tiempo en donde comienza y termina la producción del recurso respectivamente, con $0 < P(t)$ para todo $t_0 < t < t_f$. Por su parte $0 < C(t)$ para todo $t_0 < t < t_f$ y $C(t_1) < C(t_2) < \dots < C(t_n)$, se trata de una función siempre creciente.

Afirmación: Teniendo en cuenta las consideraciones del párrafo anterior y definido el IRE de acuerdo a la ecuación (I-18) para todo $t_0 < t < t_f$, se tiene que de existir el IRE

máximo, denotado por IRE_{max} , este ocurre antes de alcanzar la máxima producción denotada por P_{max} .

$$IRE(t) = \frac{P(t)}{C(t)} \quad (I-18)$$

Demostración: Sea t_{Pmax} tal que $P(t_{Pmax}) = P_{max}$, se tiene entonces que $P(t_{Pmax}) > P(t_{Pmax+1}) > \dots > P(t_{Pmax+n})$ y además $C(t_{Pmax}) < C(t_{Pmax+1}) < \dots < C(t_{Pmax+n})$. A partir de estas desigualdades se puede concluir que $IRE(t_{Pmax}) > IRE(t_{Pmax+1}) > \dots > IRE(t_{Pmax+n})$, lo que nos permite afirmar que $IRE(t_{Pmax+i})$ no es máximo, por lo que resta probar que $IRE(t_{Pmax})$ tampoco lo es.

Para probar que $IRE(t_{Pmax})$ no es máximo, basta con demostrar que su función derivada con respecto al tiempo evaluada en este punto es diferente de cero, ya que esto es una condición necesaria para cualquier valor candidato a máximo, esto significa que $IRE'(t_{Pmax}) \neq 0$. Observemos que:

$$IRE'(t) = \frac{C(t) \cdot P'(t) - P(t) \cdot C'(t)}{[C(t)]^2} \quad (I-19)$$

Evaluando la ecuación (I-19) en t_{Pmax} se obtiene lo siguiente:

$$IRE'(t_{Pmax}) = \frac{-P_{max} \cdot C'(t_{Pmax})}{[C(t_{Pmax})]^2}$$

Es claro que $C'(t_{Pmax}) \neq 0$ ya que por hipótesis $C(t)$ es siempre creciente, por lo tanto $IRE'(t_{Pmax}) \neq 0$ y esto implica que $IRE(t_{Pmax})$ no puede ser máximo y como

$IRE(t_{P_{max}+i})$ tampoco lo es, se concluye que el tiempo t tal que $IRE(t) = IRE_{max}$ es tal que $t < t_{P_{max}}$ ■.

1.8.2 El Desfase Temporal entre la Recuperación Energética Total y la Energía Neta

La existencia del desfase temporal entre los puntos que definen al máximo IRE y a la máxima recuperación energética conduce a que el tiempo para el cual la energía neta recuperada del recurso energético explotado es máxima también se encuentre desfasada con respecto a la máxima producción como demostraremos a continuación.

Suposiciones: Considere que los puntos $t_{IRE_{max}}$ y $t_{P_{max}}$ son tales que $IRE(t_{IRE_{max}}) = IRE_{max}$ y $P(t_{P_{max}}) = P_{max}$ y que las funciones $IRE(t)$ y $P(t)$ no presentan máximos locales, con $t_{IRE_{max}} < t_{P_{max}}$.

Afirmación: Con las suposiciones hechas en el párrafo anterior y definiendo a la energía neta de acuerdo a la ecuación (I-20), ocurre que $En(t_{P_{max}}) \neq En_{max}$ y además para el tiempo t tal que $En(t) = En_{max}$ se corrobora que $t < t_{P_{max}}$.

$$En(t) = P(t) \cdot \left(1 - \frac{1}{IRE(t)}\right) \quad (I-20)$$

Demostración: Para demostrar la afirmación anterior basta probar que la función derivada de la energía neta con respecto al tiempo es diferente de cero al evaluarle en el punto $t_{P_{max}}$. Derivando la ecuación (I-20) se obtiene que:

$$En'(t) = P'(t) \cdot \left(1 - \frac{1}{IRE(t)}\right) + IRE'(t) \cdot \left(\frac{P(t)}{[IRE(t)]^2}\right) \quad (I-21)$$

Evaluando la anterior en t_{Pmax} se obtiene que:

$$En'(t_{Pmax}) = IRE'(t_{Pmax}) \cdot \left(\frac{P_{max}}{[IRE(t_{Pmax})]^2} \right)$$

Debido a que la función $IRE(t)$ no presenta máximos locales y además $IRE(t_{Pmax}) \neq IRE_{max}$ se tiene que $IRE'(t_{Pmax}) \neq 0$, de hecho $IRE'(t_{Pmax}) < 0$ dada la condición supuesta $t_{IREmax} < t_{Pmax}$. Por lo anterior $En'(t_{Pmax}) < 0$, por lo que la energía neta no solo no es máxima en el punto t_{Pmax} , sino que esta está decreciendo para este momento, por lo cual se concluye que el tiempo t tal que $En(t) = En_{max}$ cumple con $t < t_{Pmax}$ ■.

1.9. El Efecto de la Adición de Nuevas Fuentes de Energía sobre el IRE

Una cuestión interesante es conocer cuál es el efecto que tiene la incorporación de nuevas fuentes energéticas sobre el IRE del sistema global, por ejemplo, ¿cuál será el comportamiento en el IRE de la producción de petróleo y gas en una región una vez que se comiencen a explotar nuevos recursos? Otra forma de verlo puede ser considerar el IRE de toda una sociedad al incorporar nuevas fuentes de energía. Se mostrará que tal y como sugiere la intuición, incorporar fuentes que tienen menores IRE asociados resulta en efectos negativos sobre el IRE global.

Primero se considera un sistema energético que está compuesto por n subsistemas y donde cada uno de estos tiene una participación en la producción energética total (e.g. regiones petroleras, distintas fuentes energéticas, etc.) que se denotará por E_i , además de lo anterior cada subsistema requiere consumir cierta cantidad de energía, denotada por C_i , para poder llevar a cabo todas sus operaciones. De forma usual se define el índice de retorno energético para cada uno de los subsistemas de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$IRE_i = \frac{E_i}{C_i} \quad (1-22)$$

El índice de retorno energético para el sistema en su conjunto resulta de realizar el cociente entre toda la energía que entrega y toda la que se consume con este fin. Matemáticamente podemos expresar este hecho como:

$$IRE = \frac{\sum_1^n E_i}{\sum_1^n C_i} \quad (I-23)$$

La ecuación (I-22) nos permite definir el consumo característico de cada subsistema en función de la energía que produce y su índice de retorno energético asociado, partiendo de este hecho debe ser claro que el IRE del sistema global se puede expresar de acuerdo a la ecuación (I-24).

$$IRE = \frac{\sum_1^n E_i}{\sum_1^n \frac{E_i}{IRE_i}} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{f_i}{IRE_i}} \quad (I-24)$$

La ecuación (I-24) nos indica que, en principio, el IRE total de un sistema energético, resulta de realizar un promedio armónico entre los IRE asociados a cada subsistema, ponderado por la cantidad de energía que producen. Cuando se considera que la suma en el numerador de dicha ecuación es igual a la energía total que entrega el sistema $\sum_1^n E_i = E_{tot}$, se hace posible expresar el IRE global en función de la fracción f_i con la que participa cada fuente de energía en la producción total y el IRE particular de cada una de ellas. Incluir una nueva fuente energética al sistema global modifica la cantidad total de energía que este entrega y consume, matemáticamente esto se puede ilustrar de acuerdo a la ecuación (I-25), en donde E_{tot} y \widetilde{IRE} representan las variables asociadas al sistema antes de que se incluya la nueva fuente, observe que aquí se considera que estas variables no cambian durante la incorporación de la nueva fuente energética. Al igual que

en el caso anterior se puede expresar el nuevo IRE en función de la fracción con la que participan cada una de las fuentes energéticas, en este caso la fracción con la que participan las fuentes preexistentes f_{tot} y con la que participa la nueva incorporación f_{n+1} . Del último miembro a la derecha presente en la ecuación (I-25) es posible concluir que el IRE total del sistema energético se encuentra entre IRE_{n+1} y \widetilde{IRE} , que tan cerca o lejos este de uno o del otro depende de la fracción total con la que participan cada una de las fuentes en el sistema.

$$IRE = \frac{(E_{tot}) + E_{n+1}}{\left(\frac{E_{tot}}{\widetilde{IRE}}\right) + \frac{E_{n+1}}{IRE_{n+1}}} = \frac{1}{\left(\frac{f_{tot}}{\widetilde{IRE}}\right) + \frac{f_{n+1}}{IRE_{n+1}}} = \frac{\widetilde{IRE} \cdot IRE_{n+1}}{f_{tot} \cdot IRE_{n+1} + f_{n+1} \cdot \widetilde{IRE}} \quad (I-25)$$

En la Figura I-31 se ha ilustrado el comportamiento en el IRE del sistema global en función del IRE asociado a la nueva fuente energética que se incorpora, considerando distintas participaciones sobre la producción energética total para esta nueva fuente. Para construir dicha figura se ha considerado que el IRE antes de incorporar la nueva fuente tiene un valor de 20, esto es $\widetilde{IRE} = 20$. Para todos los casos se obtiene que cuando el IRE de la nueva fuente es igual al IRE global preexistente, en este caso 20, no existe variación alguna en el sistema global. Cuando el IRE de la nueva fuente es menor, entonces el IRE global se ve afectado negativamente y esta situación empeora conforme la participación de la nueva fuente incrementa. Contrario a lo anterior cuando el IRE de la nueva incorporación es mayor que el asociado a las fuentes existentes el resultado sobre el sistema es un incremento neto, que se muestra mayor conforme a la par del incremento en la fracción f con la cual participa el nuevo recurso.

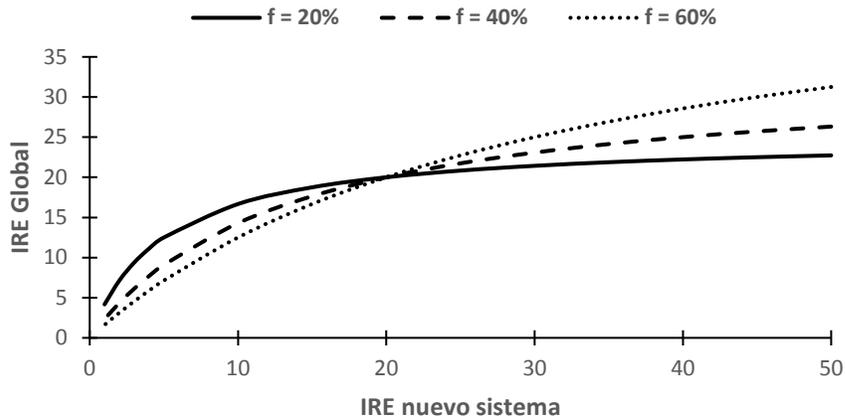


Figura I-31 Efectos de la adición de una nueva fuente energética sobre el IRE global.

Un ejemplo con datos empíricos de las situaciones discutidas hasta el momento se puede encontrar en el trabajo de Poisson y Hall [103], quienes han estudiado el comportamiento del IRE, en este caso denominado EROI, para la extracción de petróleo y gas en Canadá, lo anterior incluyendo la producción que proviene de las arenas bituminosas, recurso para el cual los autores han calculado un valor de EROI promedio de 4 para el periodo de 1994 a 2008. Los resultados de estos autores muestran claramente como el EROI para la extracción de hidrocarburos en dicho país ha venido a la baja conforme la participación en la producción total que proviene de arenas bituminosas ha ido incrementando. Utilizando los datos de Poisson y Hall hemos construido la Figura I-32 en donde se compara el porcentaje de la producción total de hidrocarburos que proviene de las arenas bituminosas contra el EROI calculado para la extracción de petróleo y gas en Canadá. Aquí es clara la relación inversa que existe entre los indicadores. Al paso del tiempo y conforme la producción de este recurso no convencional ha ido aumentando, el EROI de la extracción de petróleo y gas en la región ha ido a la baja, situación que continuará conforme la producción de fuentes convencionales decline y la producción total esté compuesta principalmente por hidrocarburos no convencionales.

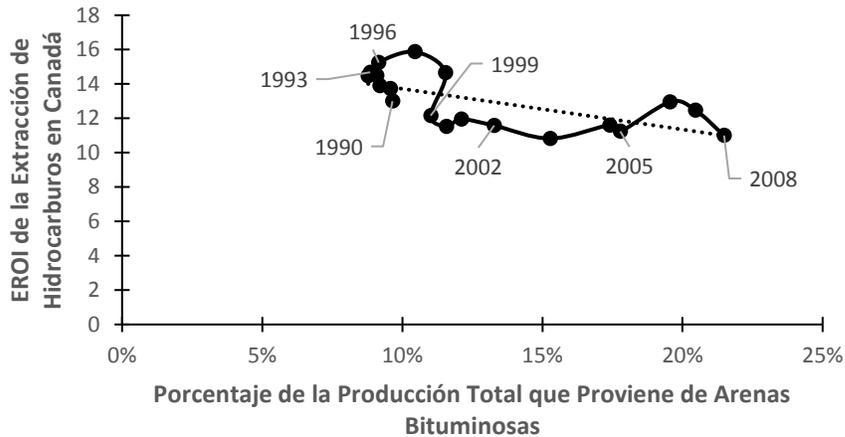


Figura I-32 Evolución del EROI para la extracción de petróleo y gas en Canadá contra la fracción de dicha producción que proviene de fuentes no convencionales. Elaborado con los datos de [103].

El análisis que se ha realizado en esta sección es sencillo pero permite ganar intuición sobre el comportamiento que puede tener el IRE del sistema energético global conforme se vayan incorporando fuentes de menor calidad. Para el caso del petróleo y gas podemos concluir que conforme la producción comience provenir en mayor medida de fuentes no convencionales o de fuentes que son convencionales pero requieren de una inversión energética mayor como pueden ser la producción en aguas profundas o mediante técnicas de recuperación mejorada, el IRE tenderá a moverse hacia valores cada vez menores. Para el caso del sistema energético global, la situación parece la misma, toda vez que las nuevas fuentes energéticas tienen asociados IRE menores a los que muestran los recursos fósiles, conforme la participación de estas nuevas fuentes incrementa dentro de la matriz energética global, el IRE se moverá hacia valores cada vez más bajos.

1.10. El IRE Mínimo para una Sociedad

Teóricamente cualquier recurso energético que tenga un IRE mayor a uno puede considerarse como una fuente de energía para la sociedad, sin embargo, una cuestión

natural que emerge alrededor de este punto es qué tan alejado de la unidad debe encontrarse este indicador para poder mantener los estándares de vida en las sociedades modernas. La energía que se recupera de una fuente energética debe ser suficiente, en primer lugar, para poder satisfacer las necesidades de los procesos de extracción y adaptación de esta energía para ser utilizada por la sociedad, de otro modo no tendría sentido obtenerle. Además de lo anterior debe ser capaz de cubrir los costos de su transporte, ya que es común que las necesidades que debe satisfacer no se encuentren en lugares cercanos al punto de extracción o adaptación, cubriendo las necesidades energéticas mencionadas hasta el momento, se podría asegurar que la energía que se recupera de esta fuente hipotética es suficiente como para permitir la disponibilidad de energía en el punto de uso, pero para utilizarle también se requiere de energía, por lo que se debe sumar la energía requerida para crear los medios y mecanismos que permitan hacer uso de ella. Si además de todo lo anterior se consideran los requerimientos energéticos de la producción de alimentos o aquellos necesarios para poder brindar servicios de salud, educación y permitir el desarrollo de actividades artísticas y recreativas, entonces la energía recuperada de esta fuente debe incrementar sustancialmente y con ello el IRE con el cual se le recupera. Hall [110] ha ilustrado esta situación mencionando que cuando el EROI de la extracción de petróleo es apenas de 1.1, se puede extraer el recurso y observarlo, si se incrementa a un valor de 1.2 entonces es posible refinarlo y nuevamente, observarlo, con un valor de 1.3 entonces, además de refinarlo sería posible transportarle al punto de uso pero una vez ahí todo lo que se podría hacer con él es observarlo. Teniendo en cuenta los requerimientos energéticos involucrados en la extracción, refinación y transporte del petróleo, junto con los necesarios para construir y mantener el vehículo y los caminos que permiten hacer uso del hidrocarburo por parte del usuario final, Hall, Balogh y Murphy [24] han determinado que el EROI mínimo con el que se debe extraer el recurso del subsuelo debe tener un valor de 3, ya que en dicha situación la energía que se recupera de la extracción de petróleo sería suficiente para permitir la conducción de un automóvil o camión. Hall [110] ha especulado que se requieren valores de EROI mayores a este mínimo para lograr dotar a una sociedad humana moderna de las características que la definen, por ejemplo, para que dicha sociedad sea capaz de

producir y transportar sus alimentos, así como otros bienes, se requeriría un EROI que este alrededor de 5, para educar a los integrantes de esta sociedad sería necesario un EROI de 9 o 10, contar con servicios de salud lo incrementaría a 12 y permitirse el acceso al arte o desarrollar actividades no esenciales quizá requeriría un EROI de 14 o mayor. Teniendo presentes estas ideas Lambert y colaboradores [111] han propuesto la existencia de un orden jerárquico en las necesidades energéticas de una sociedad humana (ver Figura I-33), concepto análogo a la conocida pirámide de Maslow [112] que expresa la jerarquía en las necesidades humanas. En esta teoría aquellas necesidades energéticas que se encuentran en los niveles más bajos de la pirámide deben ser satisfechas antes de que otros requerimientos se vuelvan importantes para la sociedad. Lo anterior implica que en una sociedad moderna primero se deben cubrir las necesidades del sector energético (e.g. extraer, refinar y distribuir), esto con la finalidad de contar con la existencia de energía en tanto en el presente como en el futuro. Una vez que esto se ha hecho entonces se puede asegurar la disponibilidad de energía, por ejemplo, para la producción y distribución de alimentos, una vez cubierto esta necesidad entonces la energía restante sirve para alimentar los siguientes niveles dentro de la jerarquía como lo son brindar educación, acceso a servicios de salud y el desarrollo de las artes. El retorno energético que debe tener la fuente de energía de la cual se alimenta la sociedad incrementa conforme se escala en la pirámide de necesidades y cada nuevo nivel solo puede satisfacerse una vez que los niveles inmediatos inferiores han sido cubiertos, al menos de forma parcial, por ejemplo, la energía requerida para el desarrollo de los niveles más altos en la jerarquía, como lo son el desarrollo de las artes o uso discrecional de la energía en actividades que pueden percibirse como no vitales, solo se percibe como una necesidad una vez que los niveles inferiores han sido cubiertos.



Figura I-33 Jerarquía de las Necesidades Energéticas en una Sociedad Moderna. Adaptado de [111].

Dentro de la literatura existen otros trabajos donde se ha discutido la cuestión referente al índice de retorno energético mínimo que requiere una sociedad. Por ejemplo, Freise [42] ha estudiado el comportamiento del EROI para la extracción de petróleo y gas en Canadá para un periodo que va de 1947 a 2009, basado en los resultados obtenidos este autor concluye que parece existir un EROI mínimo entre 15 y 22 que es necesario mientras existe crecimiento económico. Otro ejemplo se encuentra en el trabajo de Weißbach y colaboradores [17] quienes han estudiado el EROI⁸ para distintos sistemas de generación eléctrica (fotovoltaica, eólica, termo solar, carbón, gas, biogás, hidráulica y nuclear). Estos autores han propuesto que para dichos sistemas se requiere un EROI mínimo de 7 para aquellos países pertenecientes a la OCDE, aunque no ofrecen una explicación clara de los cálculos realizados para llegar a su resultado, sus razonamientos parecen hacer alusión a la relación inversa entre el EROI y los gastos en energía vistos como una fracción del PIB; sus conclusiones apuntan a que todos los sistemas estudiados son productores de energía neta al tener un EROI mayor a uno, sin embargo, no todos se encuentran por encima del mínimo propuesto, para la generación de energía eléctrica a

⁸ El EROI que estos autores reportan contempla el ciclo de vida total del proyecto, por lo que incluye la producción y consumo total de energía realizado a lo largo de este ciclo y no se refiere a flujos energéticos anuales.

partir de sistemas fotovoltaicos calculan un EROI de 3.9, con uso de biogás 3.5, para sistemas eólicos 16, aunque lo reducen a 3.9 cuando se consideran los requerimientos energéticos para almacenar energía para momentos de alta demanda, el sistema termo solar parece la mejor opción dentro de las renovables con un EROI estimado de 19, aunque al igual que como ocurre con el sistema eólico, cuando se tienen en cuenta los requerimientos necesarios para hacer frente a los picos en la demanda su valor estimado disminuye hasta 9; para las fuentes no renovables los autores calculan valores de 28, 30 y 75 para plantas de gas, carbón y nuclear, respectivamente, en lo que se refiere al sistema hidroeléctrico el EROI calculado es de 75. Fizaine y Court [60] han utilizado un método indirecto basado en el gasto en energía representado como una fracción del PIB para determinar el EROI mínimo que requiere el sistema energético de los Estados Unidos con la finalidad de que su economía experimente crecimiento positivo. Sus resultados apuntan a que se requiere un valor mínimo de 11, aunque aceptando un rango de posibles valores entre 8 y 13.5. Por último Lambert y colaboradores [111] han determinado el EROI para un amplio conjunto de países para el año 2009. Estos autores han comparado los resultados obtenidos con una serie de indicadores representativos de la calidad de vida de los habitantes de estos países como lo son el índice de desarrollo humano (IDH), el acceso a agua potable, la inversión monetaria en salud y la alfabetización de mujeres, dichas comparaciones muestran que existe una relación positiva entre el EROI y la calidad de vida; la conclusión de estos autores es que se requiere un EROI mínimo entre 15 y 25 para tener acceso a una buena calidad de vida, representada por un IDH mayor a 0.7.

1.10.1 El IRE Mínimo y el Incremento en la Eficiencia Tecnología

La reducción en el IRE con el cual el sistema energético recupera energía del medio ambiente y la pone a disposición de la sociedad conlleva a una disminución de la energía neta que esta dispone para satisfacer sus necesidades no relacionadas directamente con la captación de energía, este último punto encierra un hecho importante y es que en última instancia las sociedades humanas no desean energía sino que buscan satisfacer una necesidad haciendo uso de ella mediante algún dispositivo o mecanismo adecuado.

En dichos dispositivos necesariamente ocurren pérdidas energéticas cuya magnitud dependerá de la eficiencia con la cual estos trabajan, por lo anterior, solo una fracción de la energía neta total que se entrega a la sociedad realmente se transforma en energía útil para satisfacer sus necesidades. La eficiencia con la cual es posible transformar energía neta en energía útil tiene un efecto directo sobre el impacto que puede causar el aumento o disminución de la primera en la sociedad; por ejemplo, una respuesta natural a la disminución de la energía neta podría ser incrementar la eficiencia de transformación de tal suerte que sea posible reducir los impactos negativos que pueda traer la escasez de energía neta. Más allá de lo anterior y como se verá adelante, la eficiencia de transformación parece imponer límites estrictos sobre el IRE mínimo que se requiere para mantener a una sociedad humana.

La relación entre el IRE mínimo requerido para mantener a una sociedad y la eficiencia con la cual se transforma la energía neta en energía útil para satisfacer una necesidad ha sido señalada por Deiber, Deleage y Hemery [113] quienes al estudiar el caso de una sociedad agricultora han llegado a concluir que el IRE mínimo con el que se recupera la energía debe ser estrictamente mayor a la eficiencia con la cual esta se transforma. Posteriormente Court [114] ha utilizado este hecho junto con la información disponible, sobre la eficiencia de transformación realizada por el usuario final, para calcular el IRE mínimo requerido para un conjunto de distintos países. Las eficiencias utilizadas por Court son eficiencias exergéticas⁹ y por lo tanto como señala el autor no es posible comparar sus resultados con los obtenidos en otros trabajos, sin embargo, estos resultados muestran que el IREx mínimo (en este caso índice de retorno exergético) requerido para sostener una sociedad humana ha disminuido conforme la eficiencia de transformación disponible ha ido evolucionando, no obstante la rapidez con la cual esta eficiencia incrementa parece haberse estancado a partir de 1970 alcanzando un rango de eficiencias exergéticas máximas del 20%, mismas que se traducen en un IREx mínimo mayor a 5. Para Court este estancamiento en el incremento de la eficiencia, y por tanto en el del IRE mínimo requerido, junto con la disminución del IRE asociado a las fuentes de

⁹ Ver nota 3 para definición de exergía.

energía es lo que posiblemente ha generado la desaceleración en el crecimiento económico de los últimos 40 años. La relación entre IRE mínimo y la eficiencia de transformación descrita por Deiber y col. [113], y posteriormente estudiada por Court [114], representa una cota inferior para índice de retorno energético mínimo que se requiere para sostener a una sociedad, haciendo uso de la Figura I-34 a continuación se muestra un valor que es candidato a ser el máximo de estas cotas inferiores y con ello ilustrar los efectos que tiene el incremento en la eficiencia sobre el IRE mínimo.

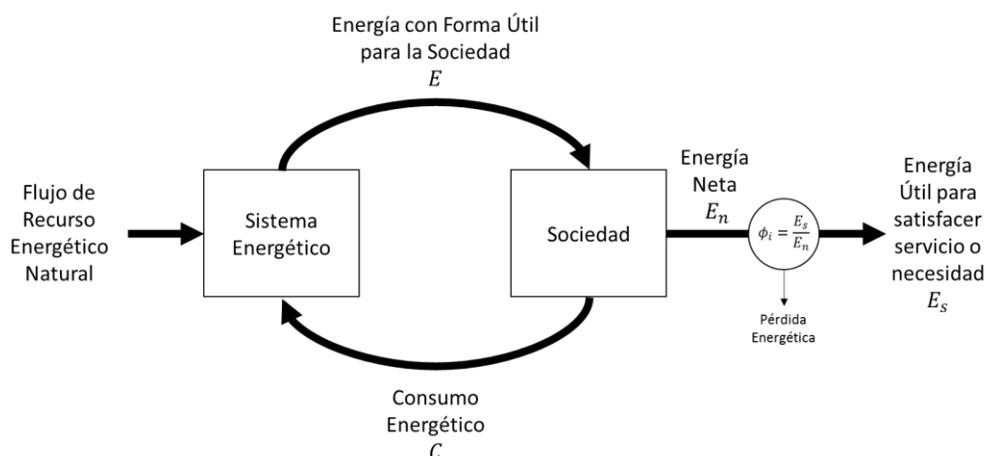


Figura I-34 Intercambio de flujos energéticos entre el medio ambiente, el sistema energético y una sociedad humana, señalando los procesos de transformación con su eficiencia asociada.

En la Figura I-34 se ilustra el intercambio de flujos energéticos entre el medio ambiente, el sistema energético y una sociedad humana, aquí se puede observar como el sistema energético se encarga de capturar los flujos de energía naturales presentes en la naturaleza y transformarlos en alguna presentación que sea adecuada para ser utilizada por la sociedad. Para llevar a cabo estas operaciones se hace necesario que la sociedad reinvierta parte de la energía que se recupera en el sistema energético y la energía restante o energía neta representa la energía disponible para satisfacer las distintas necesidades de esta sociedad. Como hemos dicho anteriormente satisfacer estas necesidades requiere realizar una transformación de la energía neta que se dispone,

proceso durante el cual ocurren una serie de pérdidas energéticas definidas por la eficiencia asociada a dicho proceso, dando como resultado a que solo una fracción de la energía neta disponible termine como energía útil para satisfacer la demanda. Haciendo uso de la eficiencia ϕ_i asociada a este proceso de conversión energética es posible definir la cantidad mínima de energía neta $E_{n,i}$ que se requiere para generar una unidad de energía útil E_s para satisfacer alguna necesidad. Lo anterior se logra tomando el inverso de dicha eficiencia. Por lo tanto, con la finalidad de poder generar una unidad de energía útil, la energía neta o la energía que queda una vez que a la producción total de energía le ha sido restado el consumo del sistema energético, debe ser mayor o igual al inverso de la eficiencia de conversión, matemáticamente esto se puede expresar de acuerdo a la expresión (I-26).

$$E_n = E - C \geq \frac{1}{\phi_i} = E_{n,i} \quad (I-26)$$

Dividiendo ambos lados de la desigualdad anterior por el consumo C del sector energético, se hace posible construir el IRE asociado al proceso de obtención de energía que se define como el cociente entre la energía total que se recupera y el consumo realizado por estas actividades. Se puede entonces concluir que por cada unidad de energía utilizada por el sistema energético, el índice de retorno requerido para generar al menos una unidad de energía útil debe cumplir la desigualdad (I-27), siendo el mínimo cuando se cumple la igualdad, debe observarse que este planteamiento hace que el IRE sea estrictamente mayor que el inverso de la eficiencia de transformación, situación que Deiber y col. [113] habían anticipado.

$$IRE \geq \frac{1}{\phi_i} + 1 > \frac{1}{\phi_i} \Rightarrow IRE_{min} = \frac{1}{\phi_i} + 1 \quad (I-27)$$

Por lo discutido anteriormente ocurre que cuando el IRE se encuentra en el mínimo, se dispone de una cantidad de energía neta suficiente para generar una unidad de energía útil y por lo tanto no puede sostenerse una expansión en la demanda de esta. Por otro lado, si el IRE es mayor al mínimo requerido entonces existe un superávit de energía neta que permite incrementar la demanda de energía útil o diversificar sus usos. En la Figura I-35 se ilustra el comportamiento del IRE mínimo en función de la eficiencia de conversión energética. Junto con ello se ha señalado las eficiencias asociadas a distintos dispositivos de transformación, recuperadas del trabajo de Smil [5], para cada una de estas eficiencias se ha calculado el IRE mínimo requerido para generar una unidad de energía útil, por ejemplo, para el motor de gasolina moderno se tiene una eficiencia del 35% y se ha calculado un IRE mínimo de 3.8, lo cual implica que teniendo en cuenta los requerimientos energéticos de los procesos de extracción, refinación, transporte y distribución del petróleo, más los necesarios para poder crear un dispositivo que permita hacer uso de él, se debe contar con al menos un IRE de 3.8 para que el usuario final pueda hacer uso de su automóvil, valor que está dentro del rango reportado por Hall y col. [24] igual a 3. De acuerdo a este comportamiento, conforme la eficiencia de conversión incrementa el IRE mínimo que requiere la sociedad para poder satisfacer un servicio disminuye y esta disminución es mucho más pronunciada para valores de eficiencia mayores al 20%. De acuerdo al trabajo de Smil [5] los dispositivos de conversión utilizados por la sociedad humana solo alcanzaron estos rangos de eficiencia hasta después del año 1900, para el caso de la eficiencia exergética estudiada por Court [114] solo se superó el 10% de eficiencia hasta después de 1950. Dichas situaciones coinciden con el inicio de la denominada “gran aceleración” [115], punto a partir del cual globalmente se ha experimentado un incremento exponencial en una serie de indicadores como lo son el producto interno bruto, la cantidad de población, las emisiones de dióxido de carbono, consumo de fertilizantes, uso de agua, producción de papel, entre otros. En el contexto de lo que se ha discutido en esta sección el incremento en la eficiencia de conversión habría provocado que el IRE mínimo requerido se alejará del IRE asociado a los procesos de recuperación de energía, generando con ello la existencia de un superávit de energía neta

y con ello el incremento en todos los aspectos del desarrollo social. Tal y como Court [114] ha propuesto, no es por si solo el IRE asociado a las fuentes energéticas lo que define el desarrollo y expansión de las economías y sociedades humanas, sino su magnitud respecto al mínimo requerido para mantener una serie de necesidades sociales, entre más alejado se esté de este mínimo mayor será la expansión que pueda experimentarse, por lo que el hecho de que los incrementos en la eficiencia hayan alcanzado un máximo alrededor de 1970 y el IRE asociado a nuestras principales fuentes de energía, como lo son el petróleo, gas y carbón, esté disminuyendo implica que eventualmente este se igualará con el mínimo, arrastrando con ello el potencial de expansión que pueden experimentar las economías a nivel mundial.

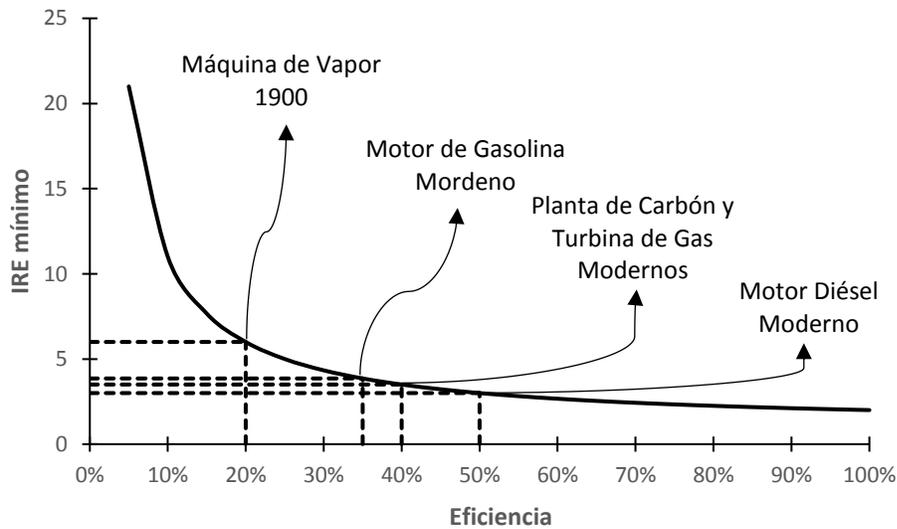


Figura I-35 Relación entre el IRE mínimo y la eficiencia de transformación.

1.11. Modelos Matemáticos para Calcular el IRE

En esta sección se revisan dos modelos matemáticos propuestos para describir el comportamiento del EROI para la extracción de un recurso energético no renovable, ambos modelos son función de un parámetro físico, este parámetro es la fracción del

recurso energético total recuperable URR que ha sido extraído al tiempo t y se puede definir de acuerdo a la expresión (I-28) en donde $P_{acumulada,t}$ se refiere a la producción acumulada al tiempo t , lo anterior implica que utilizar estos modelos requiere necesariamente conocer el valor del recurso total recuperable URR, que para ambos se define como la cantidad total del recurso energético que es posible recuperar con un valor de energía neta positivo. Lo anterior sumado al hecho de que es necesario conocer previamente algunos valores de EROI para poder determinar los distintos parámetros involucrados en las funciones de estos modelos y así lograr calibrarlos, hace que su uso pueda resultar complicado, sin embargo existen ejemplos de ello dentro de la literatura especializada (por ejemplo [31] [36]). Ignorando dichas complicaciones estos modelos ilustran bien la “competencia” que existe entre el desarrollo y mejora tecnológica, contra el agotamiento y pérdida en la calidad de los recursos energéticos.

$$\rho_t = \frac{P_{acumulada,t}}{URR} \quad (I-28)$$

1.11.1 Modelo de Dale, Krumdieck, Bodger

En 1983 los autores Constanza y Cleveland [116] estudiaron la producción de petróleo y gas en el estado de Louisiana, calculando los valores para el EROI asociados a estas actividades. Dichos autores encontraron que al graficar los valores del EROI obtenidos contra la producción de hidrocarburos acumulada los datos se distribuían de tal manera que se generaba una curva con forma de campana, al principio el EROI muestra un comportamiento creciente que continua hasta alcanzar un punto máximo a partir del cual comienza a declinar. Basados en este hecho los autores Dale, Krumdieck y Bodger [106] han propuesto que este comportamiento, con forma de campana, es característico para el EROI de todos los recursos energéticos no renovables y que el modelo que lo describe puede representarse como el producto de dos funciones multiplicadas por un factor de escalamiento.

$$EROI(\rho) = \varepsilon \cdot T(\rho) \cdot R(\rho) \quad (I-29)$$

En la expresión (I-29) se representa este producto de funciones, la función $T(\rho)$ representa los efectos que tiene la tecnología sobre las actividades de extracción y recuperación del recurso energético, este componente tiende a incrementar la cantidad de energía que se puede recuperar conforme la experiencia adquirida en dichas actividades aumenta, quedando esto último representado por ρ que se define como el cociente entre la producción acumulada y el recurso total recuperable URR, por tanto $0 \leq \rho \leq 1$. Aquí se debe mencionar que el valor URR se refiere a la cantidad de recurso que es recuperable con un valor de energía neta positivo. Por otro lado la función $R(\rho)$ representa los efectos que tiene el agotamiento del recurso y con ello la pérdida en la calidad de este, esta función trata de capturar el hecho de que comúnmente se explotan primero los recursos que requieren menor esfuerzo dejando el resto para después. Finalmente ε funciona como un factor de escalamiento entre estas funciones. En la Figura I-36 mostramos las formas características de estas funciones.

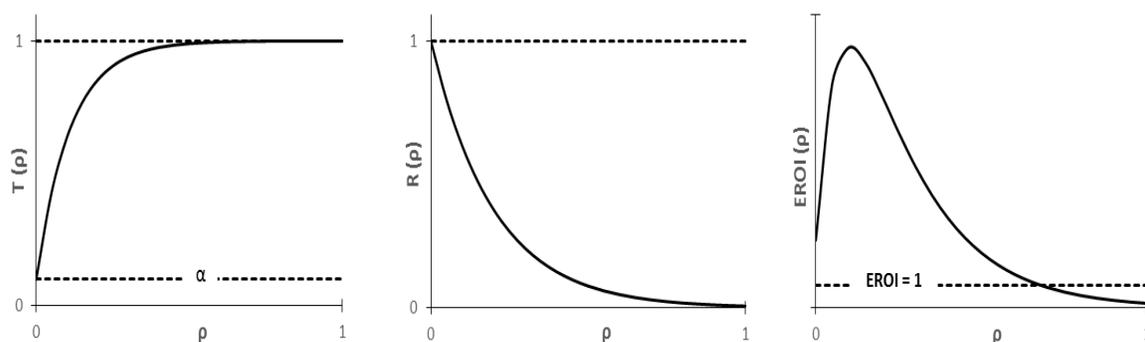


Figura I-36 Formas Características de las Funciones que Integran al EROI en el modelo de Dale y col. Basado en [106].

Explícitamente la función $T(\rho)$ queda descrita por la expresión (I-30), aquí α representa el estado inicial de la tecnología con la cual se explota el recurso energético con $0 \leq \alpha < 1$, mientras que β es la tasa de aprendizaje tecnológico conforme se adquiere experiencia explotando el recurso. Esta función supone que el efecto positivo que tiene la tecnología sobre la explotación de los recursos energéticos está sometido a retornos decrecientes, además de que necesariamente está limitado, tal y como se muestra en la Figura I-36.

$$T(\rho) = 1 - \alpha \cdot e^{-\beta \cdot \rho} \quad (\text{I-30})$$

La función $R(\rho)$ queda descrita por la expresión (I-31), en ella el término δ es la tasa de degradación del recurso natural conforme la cantidad disponible de este se agota. La función $R(\rho)$ asume que el componente físico tiene un decaimiento exponencial (ver Figura I-26)

$$R(\rho) = e^{-\delta \cdot \rho} \quad (\text{I-31})$$

Dale y colaboradores han propuesto que si la producción de un recurso finito puede ser descrita por una función logística o curva de Hubbert, entonces el máximo EROI del recurso debe ocurrir a un cuarto del recorrido total del ciclo, esto es $t_{EROI_{max}} = t_o + 0.25 \cdot (t_f - t_o)$, en donde t_o y t_f representan en tiempo en el que comienza y termina la extracción del recurso respectivamente. Lo anterior se sigue del argumento de que la de tasa de cambio en la producción tiene un punto de inflexión cuando llega a un cuarto del recorrido total (asumiendo que sigue una curva logística) a partir del cual los incrementos que experimenta la producción del recurso son cada vez menores hasta que finalmente llega al punto máximo, por lo anterior cualquier inversión de energía o capital que se haga después de que se haya pasado un cuarto del recorrido estará sometida a retornos decrecientes, lo que permite concluir que el EROI estará decreciendo. Esta situación

implica que el máximo EROI sucede antes de que lo haga el pico de producción, algo que hemos discutido en la sección 1.8.

1.11.2 Modelo de Court y Fizaine

Court y Fizaine [31] han propuesto algunas modificaciones sobre las funciones originales $T(\rho)$ y $R(\rho)$ presentes en el modelo de Dale y colaboradores [106]. Para el caso de la función $T(\rho)$ que representa el componente tecnológico, estos autores han argumentado que una función sigmoidea, función con forma de S, describe de forma mucho más apropiada las observaciones históricas que se han hecho en cuanto a las mejoras tecnológicas, de esta forma la función describe un proceso en el que los avances tecnológicos son rápidos al principio, hasta alcanzar un punto de inflexión a partir del cual el desarrollo se hace de forma mucho más mesurada, eventualmente se alcanza un punto límite a partir del cual no es posible obtener un mayor incremento en la eficiencia tecnológica para extraer el recurso energético. De forma explícita la función $T(\rho)$ queda definida de acuerdo a la expresión (I-32), aquí al igual que en el caso anterior α representa el estado inicial de la tecnología con la cual se explota el recurso energético y se encuentra en el siguiente intervalo $0 \leq \alpha < 1$, β es la tasa de cambio en el aprendizaje tecnológico y $\tilde{\rho}$ representa la fracción de recurso explotado en el momento que el crecimiento del componente tecnológico es máximo.

$$T(\rho) = \alpha + \frac{1 - \alpha}{1 + e^{-\beta \cdot (\rho - \tilde{\rho})}} \quad (\text{I-32})$$

La modificación a la función $R(\rho)$, que tiene en cuenta los efectos del agotamiento del recurso, parte del hecho de que en el planteamiento original de Dale y colaboradores, conforme se avanza en la explotación del recurso esta función tiene como límite la asíntota horizontal cero, lo anterior implica que es posible extraer alguna fracción del recurso energético con valores de EROI menores a 1 y esto entra en contradicción con la definición que se ha dado para el recurso total recuperable URR que se ha supuesto como extraíble

con un valor de energía neta positivo. Considerando lo anterior Court y Fizaine han demostrado que con la finalidad de que el recurso total recuperable pueda ser extraído con un EROI mayor a 1, se requiere que la función $R(\rho)$ tenga una asíntota estrictamente positiva y que esta resulta ser igual el inverso del factor de escalamiento ε . Lo anterior resulta en que la tasa de degradación del recurso del recurso energético debe definirse como $\delta = \ln(\varepsilon)$ y por tanto la función $R(\rho)$ queda definida de acuerdo a la expresión (I-33).

$$R(\rho) = e^{-\ln(\varepsilon) \cdot \rho} \tag{I-33}$$

En la Figura I-37 hemos ilustrado las formas características de las funciones $T(\rho)$ y $R(\rho)$ una vez que se han hecho las modificaciones descritas anteriormente, note como a diferencia de la Figura I-36 aquí el componente tecnológico $T(\rho)$ se comporta de forma sigmoidea y no muestra el comportamiento cóncavo que se presentaba en el caso anterior, por otro lado la función $R(\rho)$ está limitada por una asíntota positiva lo cual elimina la posibilidad de que el EROI pueda adquirir valores menores a 1 durante el ciclo de vida de la extracción del recurso energético.

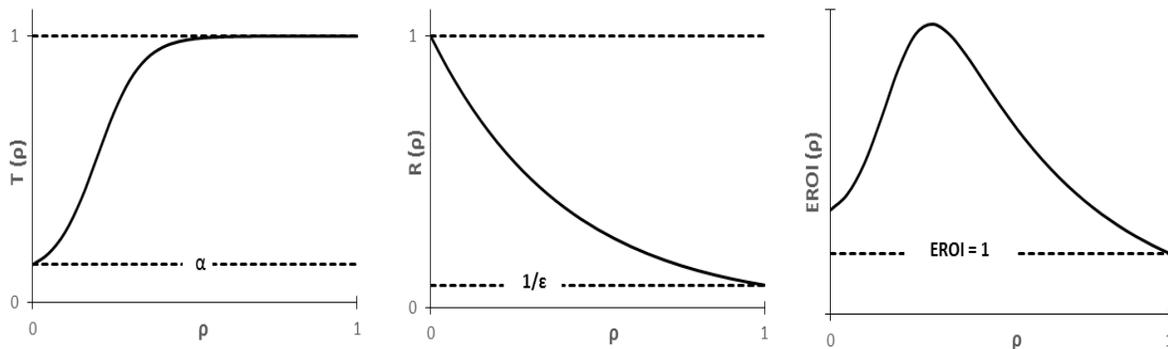


Figura I-37 Formas Características de las Funciones que Integran al EROI en el modelo de Court y col. Basado en [31].

CAPÍTULO II - Algunos estudios realizados sobre el Índice Retorno Energético para la Extracción de Petróleo y Gas

Introducción

La investigación científica sobre el costo energético de obtener petróleo y gas ha generado un gran volumen de literatura académica, uno de los aspectos más destacados es que a pesar de la gran variedad de metodologías, enfoques, suposiciones, criterios e información empleados, existe la conclusión general (que no parece depender de la región geográfica estudiada) de que el IRE de los recursos fósiles está declinando, lo anterior quiere decir que con el paso del tiempo se requiere de una mayor cantidad de energía para poder extraer cada nuevo barril de petróleo y cada nuevo metro cúbico de gas, se requiere de más energía para poder procesarlos y llevarlos hasta el usuario final. La razón principal que se encuentra detrás de esta caída en el IRE es la naturaleza humana del mínimo esfuerzo, primero se explota lo fácil dejando para otro momento los recursos más complicados

En este capítulo se revisan y resumen los resultados principales de algunos de los trabajos que se han realizado sobre el IRE de la explotación de petróleo y gas tanto a nivel global como en distintas regiones del planeta, en algunos casos los estudios se han enfocado en recursos específicos tales como el shale oil, el petróleo pesado o recursos en aguas profundas, sobre ello se debe advertir que, aunque es tentador realizar comparaciones entre los resultados obtenidos en estos estudios siempre se debe tener presente que los valores calculados para el IRE guardan cierto grado de incertidumbre debido a los diferentes criterios, metodologías, enfoques e información empleados por quien calcula el indicador, este hecho previene el poder realizar cualquier comparación justa y estricta entre los valores y por tanto los mismos solo pueden tenerse en cuenta como una guía general del fenómeno del encarecimiento de la energía fósil. Lo anterior también abre una ventana de oportunidad para realizar futuras investigaciones las cuales permitan tener mayor certidumbre sobre el IRE de distintos recursos petroleros, en este sentido trabajos como el de los autores Brandt y colaboradores [117] y Tripathi y Brandt

[118] resultan bastante atractivos ya que ambos fueron realizados haciendo uso del software de uso libre OPGEE (Oil Production Greenhouse gas Emissions Estimator) (ver más sobre estos trabajos en secciones 2.1 y en los antecedentes en el siguiente capítulo) el cual es empleado para estimar el consumo de energía y las emisiones de gases efecto invernadero asociadas a las actividades de exploración, extracción, proceso en superficie y transporte a refinería de la industria petrolera, haciendo uso de indicadores físicos tales como: la densidad del crudo producido, la edad, profundidad y presión media del yacimiento, tipos de sistemas artificiales de producción implementados, la existencia de procesos de recuperación secundaria o mejorada, la relación agua aceite (WOR), volúmenes de quema y venteo de gas, entre otros.

2.1. Global

La primera investigación realizada sobre el retorno energético para la extracción de petróleo y gas a nivel mundial es la de los investigadores Gagnon, Hall y Brinker [119] publicada en el 2009. En este trabajo los autores utilizan datos sobre las inversiones monetarias realizadas a nivel global en las actividades de exploración, desarrollo y producción de hidrocarburos para estimar el consumo energético asociado a estas actividades, para ello emplean la intensidad energética (e.g. MJ/\$) promedio de la industria petrolera en Estados Unidos y Gran Bretaña como un valor representativo de la industria global y haciendo uso de ello convierten unidades monetarias en unidades energéticas. Los resultados obtenidos muestran una evolución positiva en el indicador entre 1992 y 1999 en donde el EROI habría pasado de 26 a 33 respectivamente, desde entonces la tendencia es negativa con un valor de 18 hacia el final del periodo estudiado (ver Figura II-1). De acuerdo a Gagnon y colaboradores el mejor ajuste lineal para los resultados obtenidos indica que, de continuar la tendencia encontrada, se tendría un retorno energético nulo, $EROI = 1$, alrededor del año 2035.

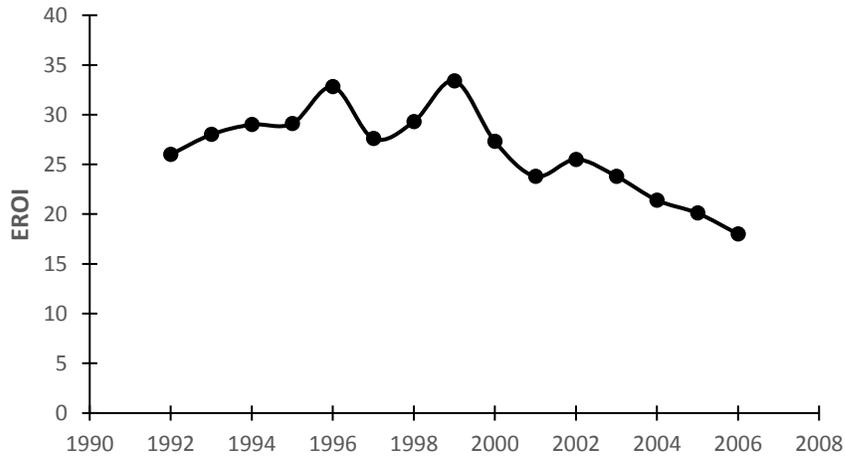


Figura II-1 EROI para la producción de petróleo y gas mundial. Adaptado de [119].

Desde el trabajo publicado por Gagnon y colaboradores [119] parece no existir otro estudio sobre el EROI para la extracción de petróleo y gas a nivel mundial hasta el que en 2017 Court y Fizaine [31] publicaron otro estudio. En este último los autores desarrollan una metodología basada en el precio de los recursos fósiles que junto con los datos de intensidad energética mundial permiten estimar el EROI asociado a la extracción de petróleo, gas y carbón en una escala global. El periodo estudiado por Court y Fizaine abarca poco más de 200 años e incluye desde los primeros años de extracción del carbón en 1800, petróleo 1860 y gas 1890 hasta el año 2012. Además de lo anterior estos autores han propuesto un modelo matemático (expuesto en la sección 1.11.2) para simular el comportamiento del EROI a lo largo del tiempo, mismo que han ajustado haciendo uso de los resultados obtenidos mediante su metodología basada en precios. Los resultados obtenidos muestran que los valores máximos del EROI para la extracción de petróleo y gas tuvieron lugar en algún punto del pasado, de acuerdo a los ajustes teóricos en 1941 y 1942 respectivamente con una magnitud de alrededor de 42 para el petróleo y 138 para el gas (ver Figura II-2), confirmando con ello la existencia del desfase entre el EROI máximo y el pico en la producción.

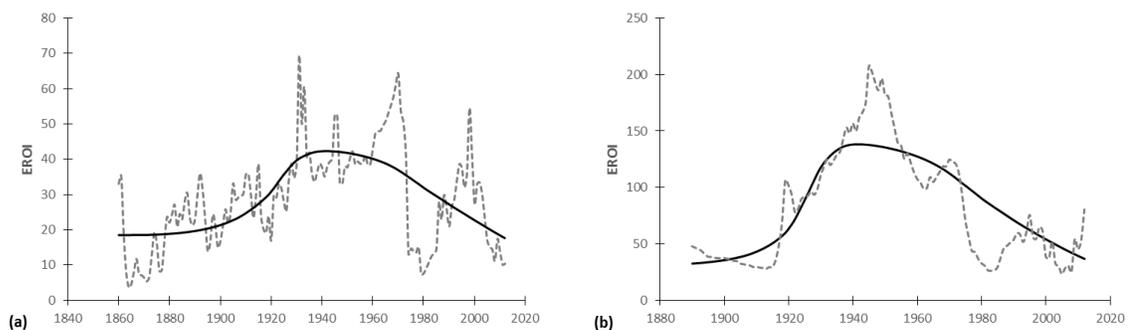


Figura II-2 EROI basado en el precio de los combustibles (línea punteada) y ajuste matemático del modelo de Court y Fizaine (línea negra continua) para (a) extracción de petróleo 1860 – 2012 y (b) extracción de gas 1890 - 2012. Adaptado de [31].

Los resultados obtenidos por Gagnon y colaboradores [119], así como por Court y Fizaine [31], exhiben claramente que el costo energético de la obtención de energía, en este caso petróleo y gas, ha aumentado con el paso del tiempo, lo anterior emerge como un resultado de la tendencia natural a explotar primero los recursos de más fácil acceso, dicha facilidad es observable en características físicas como la profundidad y cantidad de los pozos perforados, la densidad y viscosidad de los hidrocarburos extraídos, la geología, edad y ubicación geográfica de los yacimientos explotados. Debido a la naturaleza de las metodologías empleadas en los dos trabajos anteriores no es posible apreciar cómo es que estas características físicas afectan el retorno energético de la extracción de petróleo y gas, sin embargo, existen trabajos como el de los investigadores Brandt y colaboradores [117] que dan cuenta de ello. En dicho estudio se utiliza la herramienta OPGEE (Oil Production Greenhouse gas Emissions Estimator) la cual es un software de uso libre alojado en el sitio web de la universidad de Stanford [120]. El OPGEE se utiliza para estimar el consumo de energía y las emisiones de gases efecto invernadero asociadas a las actividades de exploración, extracción, proceso en superficie y transporte a refinería de la industria petrolera, con este objetivo el software debe ser alimentando con un conjunto de datos de campo como: la densidad del crudo producido, la edad, profundidad y presión media del yacimiento, tipos de sistemas artificiales de producción implementados, la existencia de procesos de recuperación secundaria o mejorada, la relación agua aceite (WOR), volúmenes de quema y venteo de gas, entre otros. Empleando este enfoque Brandt y colaboradores estudiaron en el 2015 el retorno

energético mediante el índice NER, equivalente al EROI, de un conjunto de 40 campos petroleros situados en distintas regiones del mundo como: Angola, Brasil, Noruega, China, Estados Unidos, Reino Unido, Venezuela, entre otras. Los resultados obtenidos indican valores para el NER en un intervalo de 2 a 120, con valor promedio ponderado por producción de 32.5. Para identificar la influencia de las características físicas de estos campos sobre el NER, Brandt y col. crean distintos subgrupos, no mutuamente excluyentes, y obtienen el NER promedio de los mismos (ver Figura II-3). De lo anterior, los autores señalan que aquellos campos con una relación agua aceite alta (> 10 barriles de agua por cada barril de petróleo) tienden a tener menores valores de retorno energético como consecuencia de los sistemas artificiales de producción que se implementan para extraer los fluidos. Por otro lado, sus resultados confirman que tanto la profundidad de los recursos como la densidad de los fluidos influyen en el comportamiento del índice de retorno energético provocando una reducción en este cuando alguna de estas variables aumenta. En el trabajo de Brandt y col. la edad no parece ser un factor limitante en cuanto al comportamiento del NER reportando un valor promedio de 36 para campos con más de 40 años en producción, de acuerdo a los autores esto puede deberse a que en este grupo se incluyen campos altamente productivos como Ghawar en Arabia Saudita con un NER alrededor de 40 o el campo Zubair en Irak con un valor aproximado de 35. Finalmente los valores de retorno energético más bajos resultan ser aquellos asociados a campos petroleros en donde se emplean métodos térmicos de recuperación mejorada, como lo es la inyección de vapor, con un valor promedio de alrededor de 3.

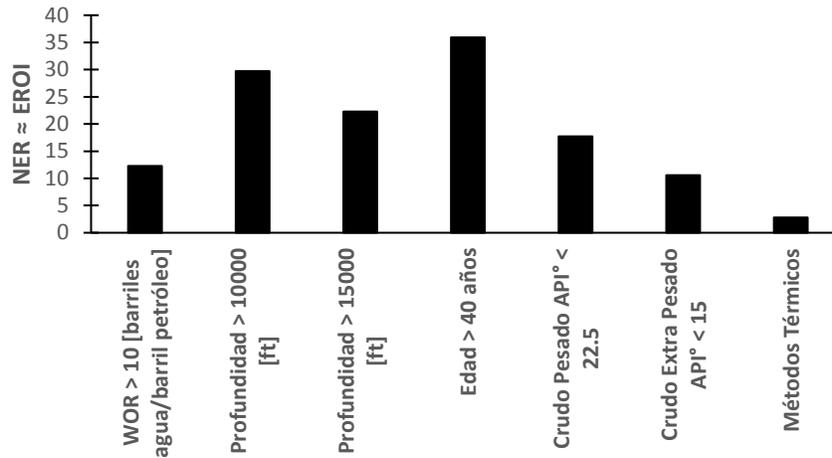


Figura II-3 Variación en el NER ≈ EROI en función de distintas características de los yacimientos petroleros. Elaborado con datos de [117].

Como consecuencia de los límites utilizados en los trabajos mencionados arriba estos solo son capaces de capturar una fracción del verdadero costo energético asociado al aprovechamiento del petróleo y gas como fuentes de energía para la sociedad, una parte importante de este consumo ocurre durante la etapa de refinación y distribución de los combustibles líquidos que pueden obtenerse del petróleo, son pocos los trabajos que se extienden para incluir la etapa de refinación y distribución. Algunos ejemplos de ello son el caso del petróleo pesado [37] y las lutitas bituminosas, ambos en Estados Unidos [56] [47], las arenas bituminosas en Canadá [48] o los estudios realizados para el sistema energético en China [36] [121], la conclusión general de estos estudios es que los procesos de refinación del crudo y distribución de los derivados de petróleo consumen grandes cantidades de energía disminuyendo de forma drástica el IRE asociado a estos recursos, lo anterior hace posible entender la importancia de tener grandes retornos de energía en el punto de extracción. Ignorar el consumo asociado a estos procesos de transformación lleva a sobreestimar la cantidad de energía neta disponible para el resto de la sociedad y subestimar los impactos potenciales asociados a ello. En 2019, Brockway y colaboradores [35] han realizado una investigación sobre el IRE asociado a los combustibles fósiles tanto para la etapa de extracción como para la de refinación de 1995 a 2011, los resultados obtenidos no difieren la tendencia aunque sí en cuanto a magnitudes de los encontrados

previamente reportando que sobre el punto de extracción el EROI para el petróleo y gas presenta una disminución al pasar de 35 a 28 y 32 a 29, respectivamente. Cuando se incluyen los costos de refinación o transformación, el IRE de los combustibles refinados se reduce hasta un valor de 8, mostrando una tendencia casi invariable durante el periodo estudiado por Brockway y col., de acuerdo con estos últimos incluir los costos energéticos asociados a la etapa de refinación hace que el consumo de energía sea de 4 a 5 veces mayor que cuando solo se contemplan los procesos de extracción. Los bajos valores de IRE asociados a los combustibles refinados pueden significar que los efectos de la escases de energía neta se encuentran más cerca de lo que podría pensarse si solo se observan los valores asociados a la extracción de los recursos fósiles, por ende, una transición fuentes de energía distintas es más urgente que nunca.

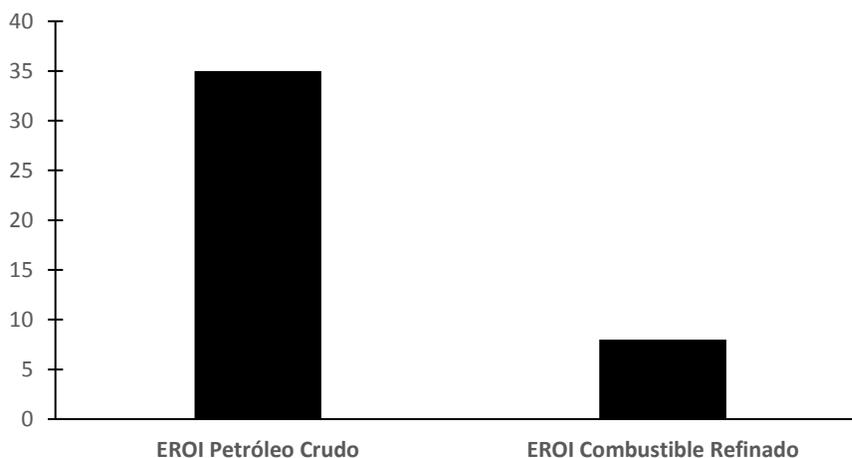


Figura II-4 Comparación entre el EROI del petróleo en el punto de extracción e incluyendo los costos energéticos de su refinación a nivel mundial. Elaborado con datos de [35].

2.2. Estados Unidos

El índice de retorno energético para la extracción de hidrocarburos en los Estados Unidos ha sido ampliamente estudiado y se cuentan con trabajos que calculan el indicador desde una escala estatal hasta una nacional. Además hay trabajos que exploran el

comportamiento del indicador para recursos específicos como lo es la extracción en las aguas del Golfo de México o desde las lutitas bituminosas en la formación Green River. Para el caso de la extracción a nivel nacional el trabajo de Guilford y colaboradores [39] publicado en el 2011 reporta estimaciones del EROI contemplando la etapa de exploración, esto es, cuántos barriles de petróleo se encuentran por cada barril de petróleo equivalente invertido en estas actividades y para la etapa de extracción, ambos durante el periodo comprendido entre 1919 y 2007. Los resultados obtenidos por estos investigadores indican que alrededor de 1919 se encontraban cerca de 1200 barriles de petróleo crudo equivalente por cada barril invertido en estas actividades, decayendo continuamente hasta situarse en un valor 5 en 2007. Para el caso de la extracción se tiene que el retorno energético en 1919 era de 15 cayendo a un valor alrededor de 8 en 1982, dicha caída se encuentra asociada con un crecimiento en la intensidad de perforación de pozos en el país. Posteriormente el indicador se recuperaría y se mantendría cercano a un valor de 15 durante el periodo de 1986 a 2002, esta etapa está asociada a una baja intensidad en cuanto a perforación. Finalmente el EROI caería hasta un valor cercano a 11 en el año 2007 (ver Figura II-5).

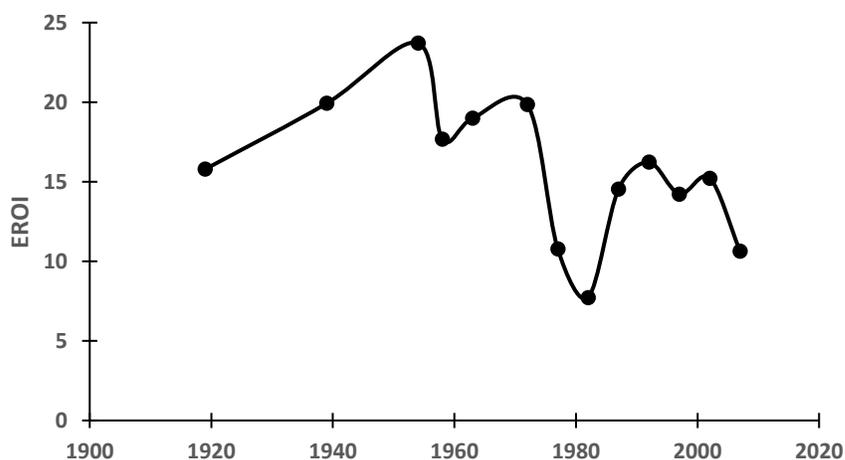


Figura II-5 EROI para la producción de Petróleo y Gas en Estados Unidos. Adaptado de [39].

Guilford y colaboradores [39] concluyen que existe una correlación inversa entre el retorno energético y la intensidad en las actividades de perforación, lo anterior implica que conforme la cantidad de pozos perforados incrementa el EROI disminuye. Los datos obtenidos en este estudio corroboran el hecho de que el retorno energético alcanza su valor máximo antes de que lo haga la producción, en este caso el EROI máximo habría ocurrido alrededor de 1954 mientras que el pico de producción en el país tuvo lugar hasta 1970.

2.2.1 Petróleo Pesado en California

En un trabajo del año 201, Brandt [37] estudió la evolución del EROI entre los años 1955 y 2005 para la extracción de petróleo en el Estado de California en Estados Unidos incluyendo un total de 306 campos de la región, además de esto este autor calcula los costos energéticos para procesar dicho recurso lo que permite ampliar los límites de estudio hasta la etapa de refinación. Los resultados obtenidos para la etapa de extracción indican que el EROI disminuyó drásticamente pasando de un valor alrededor de 60 a uno de 5 entre el inicio y final del periodo estudiado (ver Figura II-6). De acuerdo con Brandt, la causa principal de esta reducción se encuentra en la aplicación de la inyección de vapor, técnica que es necesario implementar para disminuir la viscosidad del crudo y así mejorar su movilidad¹⁰. Según los datos históricos de producción de la región, el pico de producción se alcanzó en 1984 por lo que este estudio nuevamente ofrece evidencia del desfase temporal entre el pico de producción y el EROI máximo.

¹⁰ De acuerdo a los datos de Brandt, los crudos explotados en esta región cuentan con valores de densidad específica que están entre 0.96 y 1.015 por lo cual se trata de crudos pesados y extra pesados.

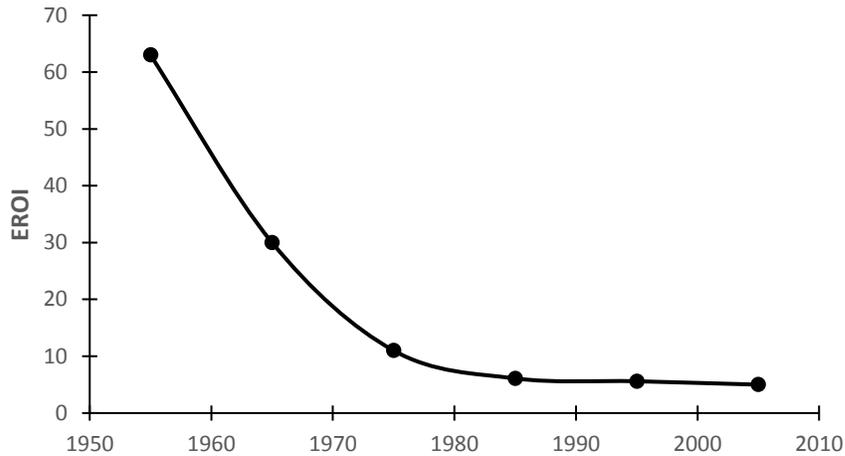


Figura II-6 EROI para la extracción de petróleo en California entre 1955 y 2005. Adaptado de [37].

El crudo pesado no solo es más difícil de extraer sino que también es mucho más complicado de refinar debido a baja cantidad de hidrógeno que presenta [37]. Cuando se considera el consumo energético necesario para refinar el petróleo extraído en California y obtener sus derivados Brandt calcula que el EROI se reduce a 6.5 en 1955 y 3.5 en 2005, con lo cual se muestra que el procesamiento de petróleo consume grandes cantidades de energía. Brandt concluye que a pesar de que la eficiencia en los equipos y procesos involucrados en la extracción de petróleo en California han mejorado, estos no han sido suficientes para sobreponerse a la pérdida en la calidad del recurso, calidad que queda representada por la cantidad de agua que se produce por pozo o el incremento en la viscosidad del petróleo.

2.2.2 Aguas Profundas en el Golfo de México

El IRE para la extracción de hidrocarburos en el Golfo de México en Estados Unidos ha sido estudiado por Gatley [122] en 2007 y posteriormente, en 2011, por Moerschbaecher y Day [46]. En el primero de estos trabajos se han calculado series históricas de un indicador que Gatley define como EROI para la extracción de petróleo y gas en el Golfo de México durante 1985 y 2004, sin embargo, se debe mencionar que el

procedimiento que este autor utiliza realiza un cociente entre producción y consumo acumulado hasta cada uno de los años estudiados y por tanto difiere significativamente de otros trabajos en donde tanto producción como consumo comprometen flujos anuales. Los resultados obtenidos por Gatley (ver Figura II-7) muestran una evolución positiva en el indicador durante el periodo estudiado pasando de un valor alrededor de 8 en 1985 a uno entre 9 y 10 dependiendo de las suposiciones que se hagan sobre la evolución en la tecnología disponible, siendo el caso optimista en donde se presentan los mejores desempeños.

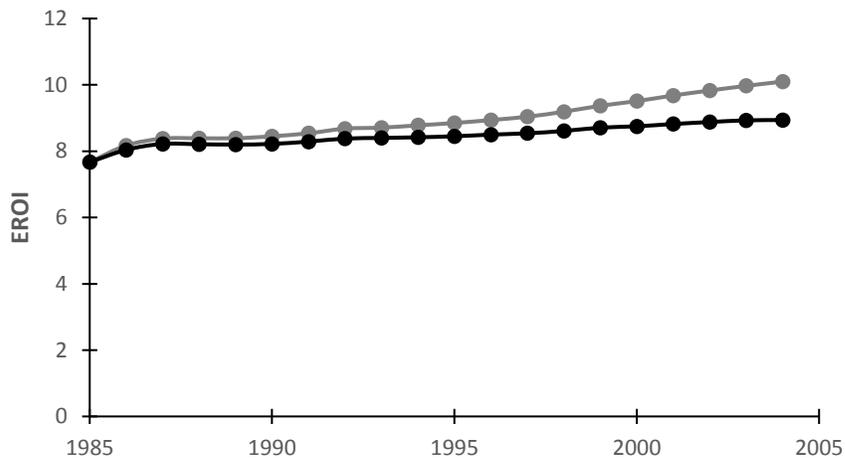


Figura II-7 EROI para la extracción de petróleo y gas en el Golfo de México entre 1985 y 2004 contemplando la evolución tecnológica en negro tecnología constate y en gris desarrollo optimista según Gatley [122]. Elaborado con datos de [122].

Por su parte Moerschbaeher y Day [46] estiman el EROI para la extracción de petróleo y gas en las aguas ultra profundas del Golfo de México (profundidad mayor a 5000 pies) en 2009, destacando que en aquel año la producción proveniente de las regiones clasificadas como profundas y ultra profundas representó el 80% de la producción total del Golfo de México en Estados Unidos. De acuerdo con sus resultados el EROI para la extracción de petróleo y gas en aguas ultra profundas se debe encontrar en un rango entre 7 y 22, mientras que el EROI calculado exclusivamente para la producción de petróleo varía entre 4 y 14. Para derivar estos resultados los autores utilizaron distintos

valores de intensidad energética a partir de los cuales convirtieron datos financieros en datos energéticos, lo cual resulta en un rango de posibles valores para el EROI, a pesar de ello estos investigadores sugieren que los mínimos se deben encontrar mucho más cercanos al valor real del EROI ya que estos se calcularon haciendo uso de magnitudes de intensidad energética característicos de la industria petrolera en el país.

2.2.3 Oil Shale

Las lutitas bituminosas, *oil shale*¹¹ en inglés, son una roca sedimentaria con alto contenido de materia orgánica denominada como querógeno, tras someter este último a una serie de procesos térmicos pueden ser obtenidos un conjunto de hidrocarburos líquidos y gaseosos, así como vapor de agua y gases efecto invernadero [123] [47] [56] [124]. Los hidrocarburos líquidos obtenidos generalmente son pesados y contienen una serie de impurezas que no permiten su procesamiento directo en las refinerías para poder producir combustibles destilados por lo cual deben ser parcialmente refinados obteniendo un hidrocarburo líquido similar al petróleo convencional aunque denominado como petróleo crudo sintético [123] [47] [56] [124]. Aunque ha sido estimado que la formación Green River en Estados Unidos posee cerca del 50% de los recursos de lutitas bituminosas conocidos en el mundo con un volumen equivalente a 1500 giga barriles de petróleo crudo [125], el interés por explotar este recurso en el país ha fluctuado con el precio global del petróleo [123]. La extracción de las lutitas bituminosas se lleva a cabo mediante dos tipos de procesos [123] [47] [56], la aplicación de cada uno de ellos depende de la profundidad a la cual se localice el recurso, dichos procesos son similares a la extracción de las arenas bituminosas en Canadá (ver adelante) y consisten en minería a cielo aabierto o conversión in-situ, en el primero el recurso es extraído directamente en superficie mediante una serie de excavaciones y posteriormente procesado, el segundo se deja para recursos ubicados a mayor profundidad y requiere la perforación de un

¹¹ No debe confundirse el término *oil shale* con *shale oil*, el primero, discutido en esta sección, se refiere a un tipo de roca que contiene materia orgánica mientras que el segundo se refiere al petróleo contenido en una roca tipo lutita.

conjunto de pozos algunos de los cuales se utilizan para proveer calor a la formación con el objetivo de diluir el querógeno y otros sirven como pozos productores para extraer los líquidos disueltos.

En 2011 los autores Cleveland y O'Connor [123] realizaron una revisión de un conjunto de trabajos publicados entre los años 2004 y 2009 sobre el EROI para extracción de lutitas bituminosas, estos autores sugieren que los trabajos los publicados por Brandt en 2008 [47] y 2009 [56] son los más completos y confiables sobre el tema. En los trabajos de Brandt se estudia la extracción, refinación parcial y refinación a combustibles finales (e.g. gasolina) de las lutitas bituminosas en la formación Green River, el autor reporta dos tipos de IRE el primero de ellos es el NER el cual es similar al EROI de otros trabajos y el segundo es el EER, la diferencia entre ambos indicadores es que el primero considera toda la energía empleada mientras que el segundo solo tiene en cuenta aquella energía que proviene de un flujo externo (e.g. gas extraído en otro campo). Los resultados obtenidos por Brandt [56] sugieren que para el caso en que se aplica una extracción del recurso en superficie y refinación parcial de los hidrocarburos para obtener crudo sintético se tiene un NER entre 1.6 y 2, cuando se incluye el costo energético asociado a la conversión del crudo sintético en un combustible final este indicador se encuentra entre 1.2 y 1.6. Mientras que el EER en esta misma etapa reporta un rango entre 2.4 y 15.8. Por otro lado para los procesos de conversión in-situ [47] los resultados obtenidos indican un NER alrededor de 1.6 y 2.5, cuando se extiende hasta la conversión final del crudo sintético entonces se obtiene un rango entre 1.1 y 1.8, el EER durante esta última etapa se encuentra entre 2.6 y 6.9. Los bajos valores de NER encontrados por Brandt sugieren que obtener combustibles refinados a partir de lutitas bituminosas requiere grandes cantidades de energía y por tanto son potencialmente más dañinos para el medio ambiente, de hecho Brandt [56] encuentra que las emisiones de gases efecto invernadero por unidad de combustible fósil refinado obtenido de este tipo de recurso son de 1.5 a 1.7 veces mayores que en el caso de la refinación de petróleo convencional. Por otro lado los altos valores de EER, 15.8 y 6.9, indican que bajo ciertas configuraciones la extracción de arenas bituminosas no es altamente dependiente de otros recursos energéticos y por tanto pueden incrementar la disponibilidad de energía neta para la economía aunque con un

alto costo ambiental asociado, además de esto también sugieren que gran parte de la energía requerida para extraer este recurso se obtiene del mismo (e.g. gas producido in-situ para generar calor) lo cual implica que aunque puedan ser extensos en volumen, gran parte de ellos nunca estará disponible para la sociedad.

2.2.4 Shale Oil

Brandt y colaboradores [49] han estudiado el EROI para la extracción de shale oil en la formación Bakken en Estados Unidos. Este tipo de recurso se encuentra dentro de los recursos conocidos como no convencionales debido a que su extracción requiere técnicas especiales de perforación y producción como lo son pozos horizontales y el fracturamiento hidráulico de la roca para permitir el flujo de los fluidos hacia superficie. El estudio realizado por estos autores investiga el retorno energético para un número total de 7271 pozos perforados en la región entre el año 2006 y 2013, el enfoque utilizado contempla el ciclo de vida total de los pozos, esto es, el EROI se calcula basado en el volumen total de hidrocarburos recuperables a lo largo de la vida del pozo y la energía consumida con este fin durante el periodo, este hecho hace que los resultados obtenidos no sean directamente comparables con otros trabajos en donde se el EROI se estudia teniendo en cuenta flujos anuales, aunque como se ha mostrado en la sección 1.3.3 bajo ciertas suposiciones es posible considerar este tipo de índice de retorno energético como un valor promedio de los flujos energéticos anuales. Debido a que la información sobre consumo de energía para explotar este tipo de recursos no es de carácter público estos autores han recurrido a distintos modelos basados en principios ingenieriles para estimar los requerimientos energéticos, dichos modelos tienen en cuenta un amplio conjunto de variables de campo como la densidad del aceite, la profundidad perforada, la presión de fracturamiento, entre otros; este tipo de información es mucho más asequible y puede encontrarse en bases de datos públicas y privadas o literatura técnica. Las estimaciones realizadas para el consumo de energía muestran que en su mayoría estas se concentran en la energía requerida para suplir los materiales necesarios, el proceso de los fluidos extraídos (separación de emulsiones agua-aceite) y el transporte y manejo de agua utilizada para el fracturamiento.

Los resultados obtenidos indican que el 50% (considerando el rango intercuartil) de los pozos analizados cuentan con un EROI entre 24.3 y 35.7 con un promedio de 30.6. Cuando se revisan los datos año por año, Brandt y colaboradores muestran que el EROI calculado para cada nuevo pozo perforado está disminuyendo desde el 2010, de acuerdo con los investigadores esto se debe a que el volumen total recuperable por pozo perforado ha declinado, aunque este fenómeno es un hecho observado los autores reportan que no hay una explicación clara para el mismo, dentro de las posibles explicaciones se encuentra que primero se explotan los mejores recursos comúnmente conocidos como “sweet spots” o que el diseño de los pozos perforados favorece más a la producción inicial que una productividad a lo largo del ciclo de vida. La caída en el volumen total recuperable por pozo junto con una intensidad de perforación constante ha resultado en la disminución del indicador. Brandt y col. concluyen que con los resultados obtenidos es posible establecer que este tipo de recurso se encuentra a la par de los recursos convencionales, aunque como hemos hecho notar antes sus estimaciones no son directamente comparables con otros trabajos.

2.2.5 Shale Gas

El EROI asociado a la extracción de gas natural proveniente de rocas shale ha sido estudiado por distintos grupos, un aspecto importante es que debido a la falta de información pública sobre la energía que se consume, y en general de las actividades realizadas, por las empresas que llevan a cabo la explotación de los recursos shale en Estados Unidos se ha recurrido a una combinación de métodos, como el uso de emisiones de dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno como proxy de la energía empleada [51] [45], así como información técnica representativa de los campos shale para estimar el costo energético de explotar estos recursos [50]. Los trabajos mencionados a continuación tienen un enfoque de ciclo de vida, esto es, los resultados obtenidos están basados en estimaciones sobre el volumen total de gas recuperable, lo cual previene cualquier comparación estricta con otros resultados obtenidos bajo el concepto de flujos anuales. En primer lugar se tiene el trabajo de los autores Aucot y Melillo [51] publicado en el 2013,

en este estudio los autores investigan la cantidad de energía que se requiere utilizar para extraer gas a través de un pozo típico perforado en la formación (shale) Marcellus en los Estados Unidos, los resultados obtenidos muestran que el EROI se encuentra en un rango entre 64 y 112, con un valor promedio de 85, sin embargo, reportan que cuando se considera el consumo de energía realizado para comprimir y hacer llegar el gas hasta el usuario final se obtienen valores de EROI entre 8 y 12. Por otro lado Yaritani y Matsushima [45] calculan que la extracción de shale gas para un pozo típico perforado en Estados Unidos se encuentra entre 13 y 23, con un valor promedio de 17, en comparación, los mismos autores estiman que un pozo típico de gas convencional en el mismo país tiene un EROI entre 14 y 25 con un promedio de 18. Cuando se incluye el consumo de energía realizado para la distribución del gas hasta el usuario final el EROI estimado se reduce a un rango entre 9 y 16 para el shale gas y 10 y 18 para el gas convencional, estos resultados están en línea con lo obtenido por Aucot y Melillo [51] previamente. Finalmente Lior [50] en un trabajo del 2015 calculó el EROI para un pozo típico de shale gas en Estados Unidos haciendo uso de información representativa para distintas formaciones en donde este recurso se explota como lo es Marcellus y Barnett. Lior estima que el EROI para la extracción de shale gas se encuentra en un rango entre 6.7 y 81.

Los resultados mencionados arriba permiten concluir que el shale gas es un claro aportador de energía neta, si bien los valores de EROI obtenidos parecen ser en general grandes, trabajos como el de Yaritani y Matsushima [45] indican que cuando se tienen en cuenta los costos de distribución la diferencia entre gas convencional y gas shale se acorta. Además, ninguno de estos trabajos, al igual que la gran mayoría sino es que todos, contempla el consumo energético para el remediar los impactos ambientales asociados a la extracción del shale gas. Tener en cuenta dichos impactos puede disminuir de forma considerable el EROI de este recurso [45].

2.2.6 Tigth Gas

Sell y colaboradores [54] han estudiado el retorno energético para la extracción de tight gas en el campo Bradford-Venango-Elk en el Estado de Pensilvania en Estados Unidos durante los años comprendidos entre 1980 y 2003, este tipo de recurso es considerado como no convencional ya que al igual que el shale gas requiere de fracturar la roca para poder ser explotado. Los resultados obtenidos indican que el EROI de un pozo típico para explotar este recurso se encuentra en rangos bastante altos aunque declinando, pasando de un valor de 120 en 1980 a uno de 67 en 2003.

2.3. Noruega

El estudio sobre el EROI para la extracción de petróleo y gas en Noruega aparece publicado en un artículo de 2011 realizado por los autores Grandell, Hall y Höök [40]. Este trabajo contempla un periodo que va de 1990 a 2008, los resultados obtenidos indican que en 1990 el EROI para la extracción de petróleo y gas, junto con los líquidos del gas y condensados, era de 44, alcanzando un máximo de 59 en 1996 y cayendo hasta un valor alrededor de 40 en 2008 (ver Figura II-8). El pico en la producción de petróleo ocurrió en el año 2000, mientras que para la extracción de hidrocarburos (petróleo, gas, líquidos del gas y condensados) esto ocurrió en el año 2004 siendo esto prueba del desfase entre el máximo EROI y pico en la producción. De acuerdo con los cálculos realizados por Grandell y colaboradores el consumo de energía directo empleado en las actividades de producción (e.g. presurizar campos, bombear fluidos, operar sistemas artificiales de producción, etc.), representa el 74% del consumo total realizado, mientras que el 24% corresponde a consumo indirecto requerido para generar la infraestructura y servicios utilizados durante las actividades de extracción, por otro lado las actividades de perforación, tanto para exploración como producción, solo representan el 2% del consumo total. Con esto en mente estos autores consideran que aunque el incremento en las actividades de perforación influye en la evolución del EROI, sus impactos son pequeños, quedando este hecho comprobado al comparar los valores de EROI obtenidos contra los kilómetros

perforados cada año (un indicador de la intensidad en las actividades de perforación) y encontrando una relación inversa entre los indicadores, aunque débil en comparación con la encontrada para casos como el de Estados Unidos. Este hecho conduce a Grandell y col. a concluir que la tendencia a declinar en el EROI tiene su verdadera razón en el agotamiento natural de los campos, situación que continuará conforme estos sigan madurando.

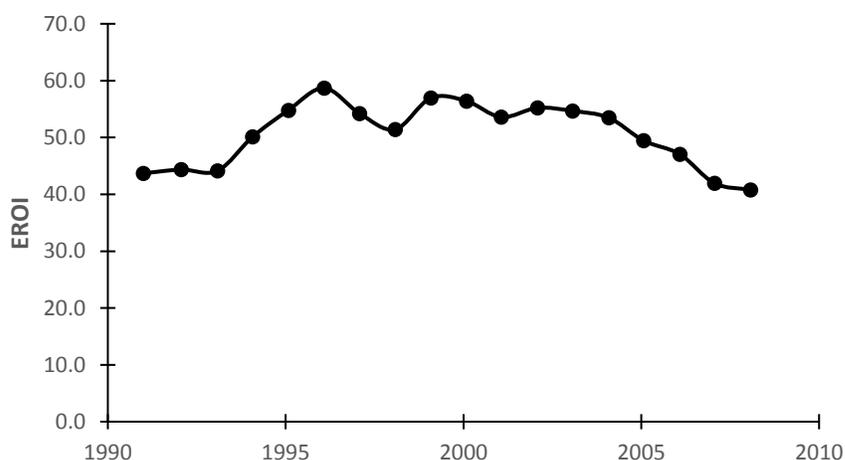


Figura II-8 EROI para la extracción de petróleo y gas en Noruega. Adaptado de [40].

2.4. China

Se han realizado trabajos para estimar el EROI asociado a la extracción de petróleo y gas en China a nivel de campo y a nivel nacional. Para el nivel nacional se consideran la etapa de extracción, refinación y distribución. En el aspecto individual se cuenta con el trabajo de Hu y colaboradores [126] del 2011 en donde se estudió el campo petróleo Daqing durante los años comprendidos entre 2001 y 2009, dicho campo es el más grande del país llegando a contribuir en 1987 con el 41% de la producción nacional de crudo, para el año 2009 esta participación pasaría a ser solo del 21% [126]. Los resultados obtenidos muestran que el EROI de la extracción de petróleo y gas de este campo se encuentra declinando pasando de un valor de 10 en 2001 a 6.5 en 2009 (ver Figura II-9). De acuerdo

con Hu y colaboradores la razón principal de que el EROI para la extracción de petróleo y gas se encuentre disminuyendo es la madurez natural del campo debido a la cual se han tenido que incorporar técnicas especiales como la inyección de polímeros, evidenciando con ello no solo que con el tiempo la extracción de los recursos fósiles se hace más complicada sino que el desarrollo tecnológico no es suficiente como para contrarrestar los efectos del agotamiento.

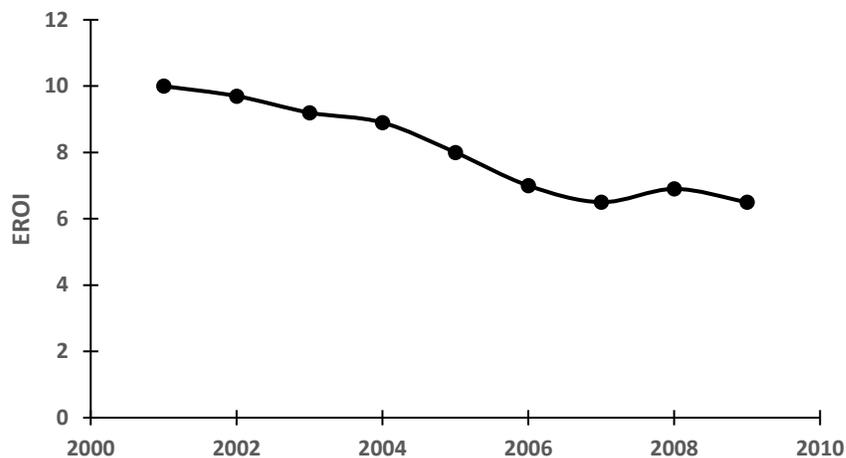


Figura II-9 EROI para la extracción de petróleo y gas en el campo Daqing entre 2001 y 2009. Adaptado de [126].

En otro trabajo Hu y colaboradores [41] estudiaron en 2013 el EROI para la extracción de petróleo, gas y carbón en China entre 1995 y 2010. Además de lo anterior estos autores hicieron uso de modelos matemáticos para estimar la evolución en la producción de estos recursos así como el de los requerimientos energéticos para ello, logrando con lo anterior hacer predicciones sobre el comportamiento del EROI hacia el año 2020. En lo relativo a la extracción de petróleo y gas los resultados obtenidos señalan que el EROI pasó de estar alrededor de 11 en 1995 a un valor de 9.9 en 2010 ver Figura II-10, esta situación tiene todo sentido si se considera que el EROI para campos como Daqing cuya participación en la producción nacional es notable también se encuentra disminuyendo tal y como se ha expuesto arriba. Además de la tendencia a disminuir estos autores han encontrado la

existencia de una relación inversa, aunque débil, entre el EROI y el número de metros perforados cada año, esto es, cuando incrementan las actividades de perforación el EROI tiende a reducir. Las proyecciones a futuro realizadas para el EROI de la extracción de petróleo y gas en el país indican el proseguir de la tendencia a declinar alcanzando un valor de 9 en el año 2020, lo anterior a pesar de que de acuerdo al modelo utilizado por estos autores para pronosticar el comportamiento en la producción no muestra un pico hasta el año 2030 lo que muestra de nueva cuenta que el valor máximo del EROI se alcanza con anterioridad a la producción máxima, además de esto Hu y colaboradores [41] reportan que el pico en la energía neta ocurre antes de que lo haga la producción bruta aunque no hacen explícito el año para el cual esto sucede. Finalmente los resultados obtenidos para la extracción de carbón indican que el EROI de este recurso es mucho mayor que el calculado para el petróleo y gas aunque también se encuentra declinando, cayendo de un valor de 34 en 1995 a 26.8 en 2010, la proyección a 2020 pronostica que el indicador pasaría a tener un valor de 24.

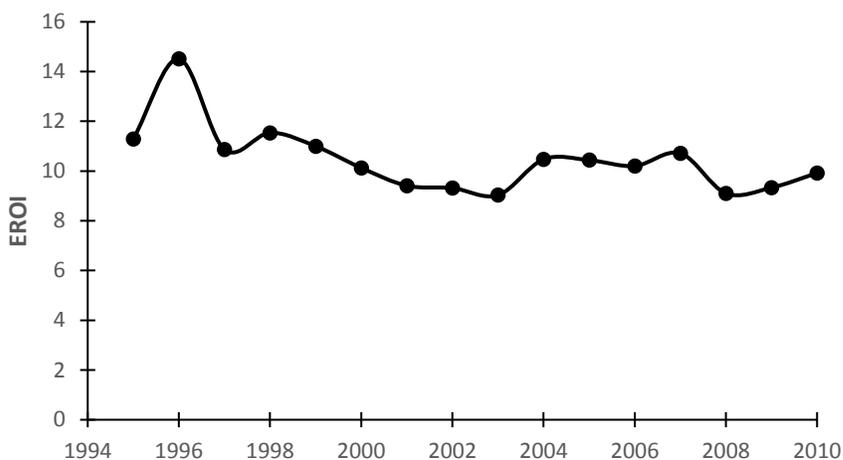


Figura II-10 EROI para la extracción de petróleo y gas en China durante 1995 y 2010. Adaptado de [41].

Los dos trabajos anteriores solo capturan una parte de toda la cadena productiva existente para que los combustibles fósiles sean utilizados por el usuario final, dejando fuera de sus cálculos los requerimientos energéticos necesarios para refinar y distribuir los

recursos extraídos. Con el objetivo de tener una mejor descripción del comportamiento en el EROI de los combustibles fósiles en China, Feng y colaboradores [36] han ampliado los límites de estudio para incluir el costo energético de la etapa de refinación y distribución lo cual se denomina dentro de la literatura especializada como EROI en el punto de uso. Los resultados obtenidos por estos autores no difieren en cuanto a la tendencia mostrada en el indicador por otros estudios, como los anteriormente citados, mostrando que en general hay una tendencia a disminuir. Para el caso de los productos refinados del petróleo se tiene que el EROI paso de estar alrededor de 8 en 1996 a un valor de 4 en 2010, el gas declina ligeramente entre 1996 y 2003 para recuperarse continuamente hasta 2007 con un máximo de 6.5, a partir de este momento el EROI comienza a declinar hasta posicionarse en 5.8 hacia el final del periodo estudiado (ver Figura II-11).

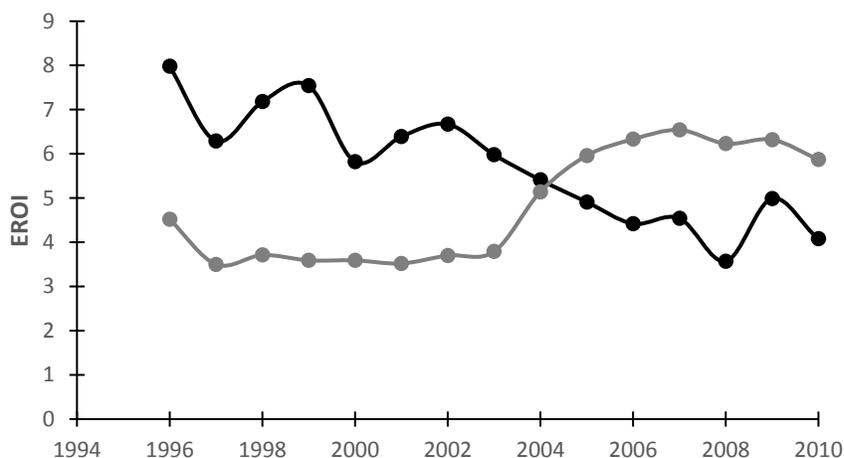


Figura II-11 EROI para la refinación y distribución de petróleo (en negro) y gas (en gris) en China durante 1996 y 2010. Adaptado de [36].

Quizá uno de los aspectos más importantes del trabajo de Feng y colaboradores [36] es que muestra como al incluir los costos energéticos asociados a las actividades de refinación y distribución, el EROI disminuye drásticamente, por ejemplo, para la extracción de petróleo y gas, Hu y colaboradores [41] estiman un EROI en el punto de extracción con un valor de 9.9 en 2010, mientras que la estimación hecha al extender los límites de

estudio al punto de uso reduce el indicador a 4 y 5.8, para los refinados y el gas, respectivamente. Lo anterior expone que los procesos de transformación requieren grandes cantidades de energía y por tanto no incluirlos podría llevar a sobreestimar aspectos como la cantidad de energía neta disponible para el resto de la sociedad y subestimar los impactos potenciales que esto puede tener. Sobre esta línea de pensamiento en un trabajo distinto, Feng y colaboradores [121] estudiaron el EROI en el punto de uso de todo el sistema energético chino entre 1987 y 2012, explorando los posibles impactos que puede tener para la economía china las variaciones en la energía neta disponible. Los resultados obtenidos muestran que el EROI pasó de 11 a 5.06 entre el inicio y final del periodo. De acuerdo con estos autores gran parte de la disminución en el EROI en el país se debe al incremento sustancial en el consumo indirecto de energía realizado por el sector energético, tendencia que es mucho más notable para las etapas de proceso y distribución de la energía en donde se ha incrementado en las últimas décadas la dependencia de insumos provenientes de otros sectores económicos principalmente del sector manufacturero. De acuerdo con Feng y colaboradores [121] la tendencia a disminuir en el EROI afectará de manera negativa a la economía en China y sus pronósticos muestran que aunque el crecimiento económico continuará, la tasa de crecimiento irá disminuyendo paulatinamente.

2.4.1 Shale Gas

El EROI de la explotación de recursos petroleros no convencionales en China ha sido estudiado por Wang y colaboradores [52] quienes han determinado el EROI para la extracción de shale gas en la formación Sichuan que es el área donde se concentra la mayor actividad en lo que se refiere a este tipo de recurso. Los resultados obtenidos por estos autores indican que el EROI de un pozo típico de shale gas en esta región se encuentra entre 31 y 42, sin embargo, se debe mencionar que estos datos no son comparables con los obtenidos en otros trabajos como los citados arriba debido a que el EROI calculado para el shale gas está basado en el ciclo de vida completo del recurso, esto es, a diferencia de otros estudios realizados en el país que consideran flujos anuales,

aquí se contempla el volumen total de gas recuperable a lo largo de la vida del pozo junto con el consumo total de energía que esto implica, a pesar de lo anterior estos resultados muestran que este tipo de recurso es un claro aportador de energía neta mostrando rangos similares a los obtenidos para el mismo pero en Estados Unidos (ver sección 2.2.5). Otro aspecto a destacar de este estudio es que a lo largo de la vida de un proyecto de shale la gran mayoría del consumo de energía se hace de forma indirecta alcanzando en el caso medio el 66.7% en la participación, tal y como han mostrado Feng y colaboradores [121] una de las principales razones por la cual el EROI del sistema energético chino está disminuyendo es por el aumento en este tipo de consumo, con lo anterior parece aceptable suponer que la tendencia a declinar en el EROI en este país continuará conforme este tipo de recursos encuentren una mayor participación en la producción nacional.

2.5. Canadá

El EROI para la extracción de petróleo y gas en Canadá ha sido estudiado por diversos autores, contando con estimaciones del indicador para la producción nacional y para el asociado a la explotación de recursos no convencionales como lo son las arenas bituminosas. Para el caso nacional se tienen los trabajos como el de Freise [42] de 2011, donde se estudia la evolución del EROI para la extracción de petróleo y gas en la región Oeste de Canadá entre 1947 y 2009, dicha región es de suma importancia para el país debido a la participación que tiene en la producción total de hidrocarburos, teniendo que en el año 2013 contribuyó con el 85% de la producción nacional de petróleo y el 97% de la de gas [103]. Para estimar el EROI este autor hace uso de series históricas sobre la producción de petróleo y gas junto con información referente al dinero desembolsado en estas actividades, para adquirir los combustibles e infraestructura utilizada, estas cantidades de dinero son transformadas en unidades de energía al multiplicarlas por una intensidad energética que en el caso del estudio de Freise se deriva a partir de la intensidad energética del sector petrolero en Estados Unidos durante el 2002 y supone constante para todo el periodo estudiado. Los resultados obtenidos por Freise indican que el EROI para la extracción de petróleo y gas en la región Oeste de Canadá experimentó

un crecimiento continuo entre 1950 y 1973 pasando de un valor alrededor de 14 a uno de 79 respectivamente, a partir de este momento el indicador habría disminuido progresivamente hasta posicionarse alrededor de 20 en el año 2009, aunque durante 1980 y 1992 habría mostrado un periodo de mejoría (ver Figura II-12). De acuerdo a los datos históricos recopilados por Freise la disminución en el EROI, de 1973 a 1980 y 1992 a 2006, se encuentra en correspondencia con el incremento en la intensidad de perforación, lo que al igual que otros trabajos señala la relación inversa que existe entre los metros perforados y el EROI. Otro aspecto importante es que los datos de producción de la región muestran que el pico ocurrió en el año 2000, esto es, posterior a los picos exhibidos por el EROI.

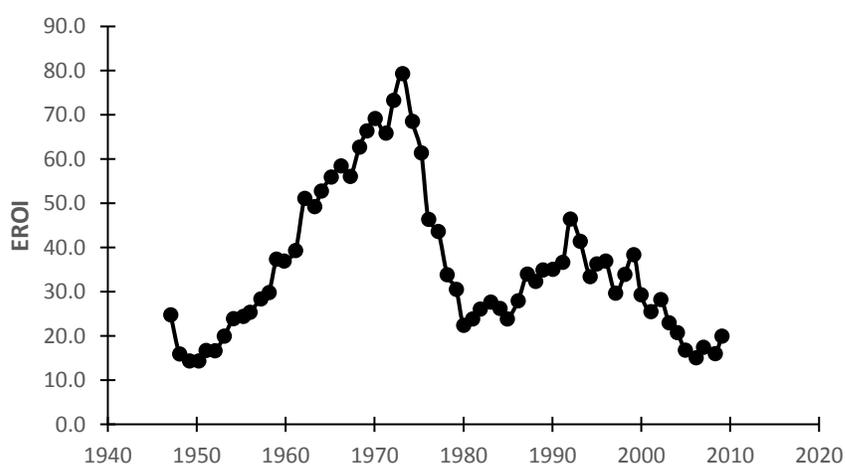


Figura II-12 EROI para la extracción de petróleo y gas en la región Oeste de Canadá durante 1947 y 2009. Adaptado de [42].

Freise también hace estimaciones para el EROI exclusivo de la extracción de gas en la región Oeste de Canadá aunque debido a la información disponible el periodo estudiado está limitado a los años entre 1993 y 2009. Los resultados obtenidos muestran una clara tendencia a declinar en el indicador pasando de 38 en 1993 a 20 en el 2009. Freise reporta una relación inversa entre el EROI del gas y la intensidad en las actividades de perforación. Un aspecto importante que el autor resalta es que si se calcula la energía neta obtenida del gas haciendo uso de los valores de EROI se encuentra que el pico en ella ocurrió en

el año 2002. Mientras que las series históricas sitúan el pico en la producción total de gas en el año 2006, con lo cual se exhibe la posibilidad del desfase entre estas curvas.

En un trabajo posterior publicado en 2013, Poisson y Hall [103] evaluaron de nueva cuenta el comportamiento del EROI para la extracción de petróleo, gas y arenas bituminosas en Canadá durante 1990 y 2008. A diferencia de la metodología empleada previamente por Freise [42] en donde se utiliza una intensidad energética constante y del sector de hidrocarburos en Estados Unidos, estos autores emplearon valores de intensidad energética característicos del sector petrolero Canadiense y publicados para cada año desde 1990 y hasta 2008, haciendo uso del valor comercial de los hidrocarburos producidos, son capaces de estimar el consumo energético, directo e indirecto, involucrado en estas actividades. Además de lo anterior, los autores cuentan con series históricas sobre el consumo de energía directa (e.g. diésel para perforar) realizado para llevar a cabo las operaciones de extracción de hidrocarburos en el país, con lo anterior estos autores estudian el efecto que tiene sobre los cálculos del EROI incluir toda la energía empleada, consumo directo e indirecto, o solo utilizada de forma directa. Los resultados obtenidos (ver Figura II-13) indican que el EROI para la extracción de hidrocarburos en Canadá se encuentra disminuyendo, pasando de un valor de 13 en 1990 a uno de 11 en el 2008, con un máximo global para el periodo de 15.7 en 1997. Cuando solo se tienen en cuenta los datos sobre consumo directo el obtenido EROI es mayor, aunque durante el periodo estudiado esta diferencia solo es del 11.4% en promedio. Si bien el comportamiento a declinar del EROI ya había sido expuesto en el trabajo de Freise [42], Poisson y Hall muestran que este no ha sido tan drástico además de que la magnitud del indicador tampoco es tan alta, de acuerdo a los autores la diferencia entre ambos estudios radica principalmente en la naturaleza de las intensidades energéticas utilizadas, sugiriendo que sus resultados deben retratar de una manera más precisa el verdadero comportamiento del EROI ya que las intensidades energéticas empleadas en sus cálculos son particulares del sector petrolero canadiense.

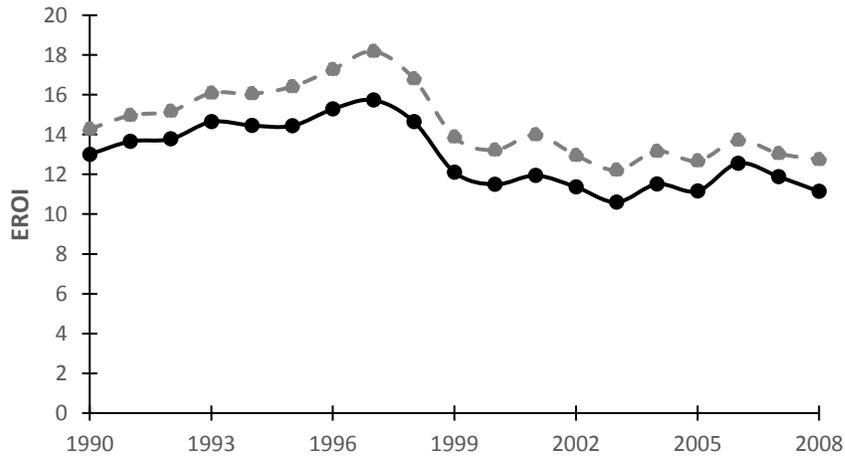


Figura II-13 EROI considerando únicamente el consumo directo (en gris) y el consumo total (en negro) para la extracción de petróleo y gas en Canadá durante 1990 y 2008. Adaptado de [103].

Finalmente Poisson y Hall comparan los valores históricos de EROI obtenidos contra otros indicadores propios del sector como el dinero gastado por las empresas en estas actividades, los metros perforados, el precio global del petróleo y la participación en la producción nacional de las arenas bituminosas. Los resultados obtenidos muestran que el EROI se encuentra relacionado de forma negativa con todos estos indicadores, siendo la relación entre este y la producción de hidrocarburos no convencionales la más notable de todas. Lo cual implica que conforme los recursos convencionales comienzan a agotarse y el precio de los recursos incrementa, las inversiones, tanto energéticas como financieras, comienzan distribuirse hacia recursos que son más complicados de extraer afectando de forma negativa el EROI y con ello reduciendo la energía neta que la sociedad puede obtener de estos recursos.

2.5.1 Tar Sands

Después de Venezuela y Arabia Saudita, Canadá posee el mayor volumen de reservas de petróleo en el mundo al poseer alrededor del 10% de estas [32]. De los 170 mil millones de barriles que se suponen recuperables con la tecnología actual cerca del

95% se encuentran en las arenas bituminosas [127], con esto en mente se puede entender la importancia que supone este recurso para el país y para el mundo. Las arenas bituminosas, *tar/oil sands* en inglés, son un recurso petrolero no convencional y están constituidas por una mezcla de arena, agua, arcilla y bitumen, el cual es un tipo de hidrocarburo altamente viscoso que puede ser procesado al igual que el petróleo convencional para obtener combustibles fósiles como diésel o gasolina [103] [48]. Existen dos tipos de procedimientos para explotar las arenas bituminosas, la aplicación de cada uno de ellos depende de la profundidad a la cual se encuentre el recurso por extraer [103] [48]. En primer lugar se tiene la minería a cielo abierto en donde el recurso es extraído en bruto a través de una serie de excavaciones en superficie y profundidades someras, posteriormente se realizan un conjunto de procesos para separar el bitumen de la arena, agua y arcilla junto con los cuales se extrae. Una vez separado, el bitumen tiene que ser parcialmente refinado obteniendo un producto que se conoce como petróleo crudo sintético, el cual es transportado hasta las refinerías en donde se logra su conversión final en combustibles como la gasolina. El segundo método de producción se conoce como extracción in-situ y requiere de la perforación de uno (uso múltiple) a dos pozos (inyector y productor) a través de los cuales se inyecta vapor de agua y se produce el bitumen, este procedimiento se utiliza para recuperar recursos ubicados a una profundidad que no permite aplicar el método anterior, la finalidad de la inyección del vapor es disminuir la viscosidad del bitumen y así lograr conducirlo hacia el pozo y posteriormente a superficie, una vez extraído, el bitumen es combinado con una serie de hidrocarburos ligeros para disminuir su viscosidad obteniendo un producto denominado como bitumen diluido el cual es transportado hasta las refinerías para su procesamiento final.

El EROI para este recurso petrolero ha sido estudiado en distintos trabajos, siendo el realizado por Brandt [48] en 2013 el más completo de ellos. Brandt ha estudiado el retorno energético de la extracción de arenas bituminosas en Alberta Canadá y además extiende los límites de estudio para incluir el costo energético de transformar estos recursos en combustibles finales, lo anterior mediante el uso de varios índices de retorno energético dentro de los cuales destaca el NER (Net Energy Return), el cual resulta similar al EROI, y el NEER (Net External Energy Return), mientras que ambos indicadores tienen

en cuenta la energía neta total recuperada del proceso difieren en lo que se considera como consumo energético, en este sentido el NER incluye la energía total empleada, mientras que el NEER solo considera la energía utilizada que proviene de un flujo distinto al que se produce (e.g. gas importado al punto de extracción). El periodo estudiado por este autor abarca los años comprendidos entre 1970 y 2010, incluyendo los recursos obtenidos mediante procedimientos de minería a cielo abierto y producción in-situ. Los resultados obtenidos (ver Figura II-14) en lo referente a la extracción y refinación parcial del bitumen para transformarlo en crudo sintético o bitumen diluido muestran que el NER ha experimentado una evolución positiva pasando de 1.09 en 1970 a un valor alrededor de 5 en el 2010, de acuerdo con Brandt este comportamiento se debe a una mejora en la eficiencia de los procesos involucrados. Los bajos valores de NER calculados para este recurso implican que gran parte del recurso base tendrá que ser utilizado para extraerlo y por tanto los volúmenes que estarán disponibles para la sociedad pueden ser sobreestimados. Por otro lado ya que el NER captura toda la energía requerida para explotar las arenas bituminosas es un buen indicador de los impactos ambientales que puede tener su extracción, los bajos niveles encontrados sugieren que se requiere un mayor consumo de energía por producto producido y es de esperar una mayor cantidad de emisiones de gases efecto invernadero. Por otro lado el NEER muestra una reducción importante durante el periodo al pasar de 27 en 1970 a 9.7 en 2010. Como se ha mencionado este indicador solo toma en cuenta el consumo energético que proviene que flujos externos y por tanto es una medida de la dependencia que tiene la obtención de un recurso energético de otros recursos, para el caso de las arenas bituminosas dicha dependencia es de gas natural, el cual es utilizado para los procesos de extracción in-situ durante la generación de vapor. Con el tiempo estos procesos han incrementado su participación en la producción de las arenas bituminosas en Alberta, provocando que la dependencia de gas aumente. Esto es importante ya que el 80% de las reservas de arenas bituminosas requieren procesos de extracción in-situ [128], a menos que la extracción de estos comience a cubrir su demanda energética con el mismo recurso que explota, como es el caso de la minería a cielo abierto de acuerdo a los resultados de Brandt, la demanda

de gas crecerá de forma importante disminuyendo su disponibilidad para ser empleado en otras actividades de la economía.

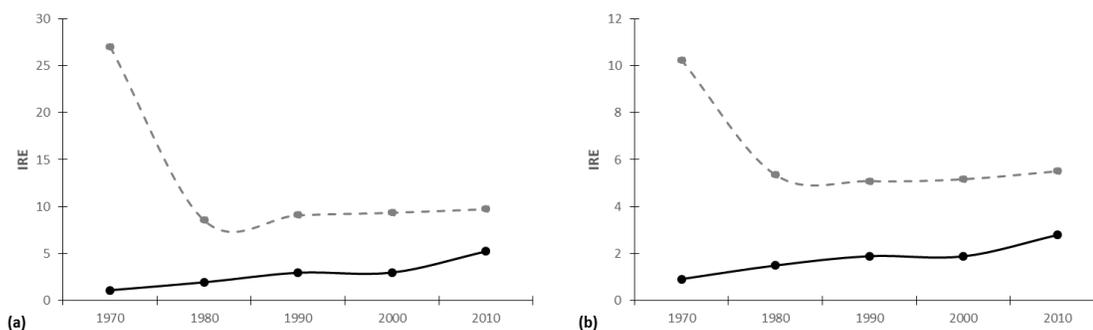


Figura II-14 Índices NEER \approx EROI (en negro) y NEER (en gris): (a) Para la extracción de arenas bituminosas en Canadá y (b) incluyendo los costos de refinación y distribución durante 1970 y 2010. Adaptado de [48].

Al extender los límites de estudio hasta la etapa de refinación tanto el NEER como el NEER se ven seriamente afectados aunque mostrando tendencias similares a las descritas anteriormente (ver Figura II-14). En cuanto al NEER se observa un crecimiento al pasar de 0.91 en 1970 a 2.79 en 2010, mientras que el índice NEER muestra una reducción entre el inicio y final del periodo pasando de 10 a 5.5.

Poisson y Hall [103] también han estimado el EROI para la extracción de arenas bituminosas en Canadá aunque a diferencia de Brandt [48] su trabajo solo contempla la extracción mediante minería a cielo abierto, los resultados de estos investigadores muestran que el EROI se mantuvo alrededor de un valor promedio de 4 entre 1994 y 2008 exhibiendo una ligera tendencia a incrementar, estos resultados están totalmente en línea con los valores NEER y tendencias obtenidas para este periodo por Brandt. Como se había adelantado arriba, Poisson y Hall compararon los valores de EROI para la extracción de petróleo y gas en Canadá con varios indicadores entre los cuales se encuentra la participación en la producción nacional de las arenas bituminosas encontrando una relación inversa entre estos, según sus cálculos esta participación pasó del 10% en 1990 a componer alrededor del 20% del total en el 2008 trayendo con ello una reducción en el

EROI, conforme esta evolución siga su paso el EROI de la extracción de recursos fósiles en el país se irá acercando más al valor propio de las arenas bituminosas.

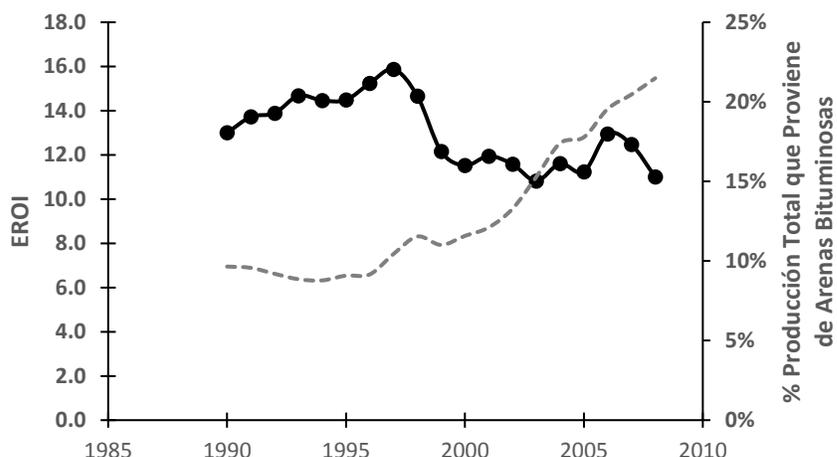


Figura II-15 EROI (en negro) para la extracción de petróleo y gas en Canadá (incluyendo arenas bituminosas) y participación de las arenas bituminosas en la producción nacional (línea discontinua en gris) durante 1990 y 2008. Elaborado con datos de [103].

Finalmente se cuenta con un trabajo publicado en 2017 de los autores Wang y colaboradores [129] en donde se ha estudiado la evolución del EROI para la extracción de arenas bituminosas durante el periodo de 2009 a 2015. Según los resultados obtenidos el EROI para la extracción de este recurso ha seguido con la evolución positiva que mostrada en años anteriores, para la extracción mediante minería a cielo abierto el EROI es de 7.5 en el año 2015, mientras que para la extracción in-situ es cercano a 4.5, el promedio para ambos métodos de extracción en 2015 estaría alrededor de 6.

2.6. Rusia

Los datos sobre el EROI para la extracción de petróleo y gas en Rusia provienen del trabajo de Nogovitsyn y Sokolov [43] publicado en 2014. En el mismo trabajo estos investigadores proporcionan un cálculo del EROI para la extracción exclusiva de gas, este

último lo obtienen a partir de los datos sobre producción y consumo de las compañías Gazprom, Novatek y Yatec siendo las dos primeras las más grandes en el ramo del país. Para la extracción de petróleo y gas el periodo estudiado va del 2005 al 2012, los autores muestran que durante el inicio y final de este intervalo el EROI disminuye de 36 en 2005 a uno de 30 en 2012, aunque parece haber experimentado una ligera mejoría entre los años 2008 y 2011 (ver Figura II-16).

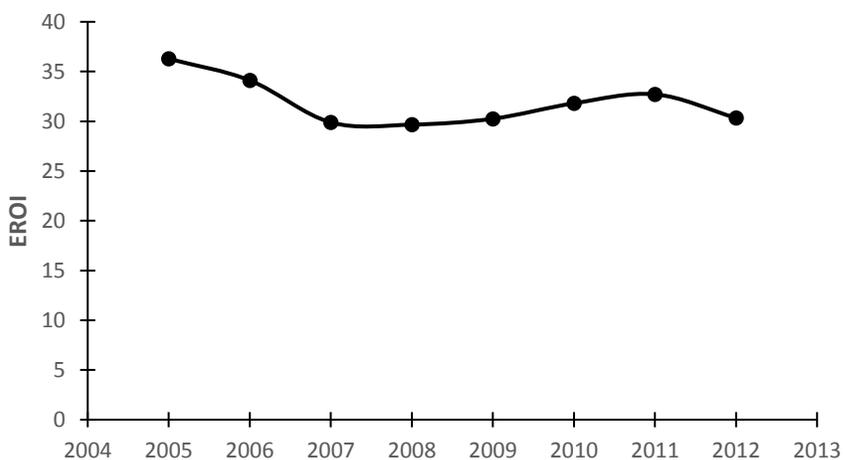


Figura II-16 EROI para la extracción de petróleo y gas en Rusia. Elaborado con datos de [43].

En lo que se refiere a la extracción de gas el estudio abarca los años comprendidos entre 2010 y 2013. Para la compañía Gazprom se reporta un valor de EROI de 80 y 79.8 para el inicio y final del intervalo respectivamente con un valor mínimo de 74.9 en 2012. Para Novatek se tiene un máximo de 129 en el 2010 y un mínimo cercano 69.6 en el 2013. Finalmente para Yatec solo se reporta el EROI para las actividades del año 2013 el cual resulta ser de 116. De acuerdo a Nogovitsyn y Sokolov la disminución en el EROI asociado a la extracción de gas en el país se puede explicar por el agotamiento natural de los campos, el desarrollo de campos localizados en zonas remotas, la construcción de nuevos ductos para transportar el gas y el incremento en las actividades de perforación, sin embargo, con todo esto presente el EROI de la extracción de gas es significativamente

mayor al calculado para la producción de petróleo y gas por lo que los autores concluyen que el EROI exclusivo para la extracción de petróleo debe ser menor al promedio nacional.

Con la información proporcionada por Nogovitsyn y Sokolov es posible estimar un valor para el EROI de la extracción de petróleo en Rusia, haciendo uso de la ecuación derivada en la sección 1.9. Utilizando el promedio de los valores calculados para Gazprom y Novatek como el valor de EROI para el gas y utilizando los valores de EROI asociados a la extracción de petróleo y gas, se obtiene que en 2012 el EROI para la extracción exclusiva de petróleo en Rusia era de 18.8, en línea con lo supuesto por Nogovitsyn y Sokolov.

2.7. Ecuador

El EROI para la extracción de petróleo en Ecuador ha sido estudiado por Parra [44], de acuerdo a sus resultados en 2016 el EROI de los distintos bloques petroleros en el país estarían en un rango que abarca casos que apenas superan la unidad y 50 con un promedio nacional de 24. De acuerdo con el autor la diferencia en el EROI entre las distintas regiones estudiadas se explica por la edad de los campos y la densidad del fluido producido, encontrando que los bloques en donde se produce petróleo pesado, usualmente con una densidad API entre 10 y 22, el cual requiere una mayor inversión energética se tiene un EROI de 18, mientras que en donde el petróleo producido es un crudo medio, densidad API entre 22 y 31, el indicador es doble con un valor de 36. Para el caso del petróleo liviano se estima que el EROI es apenas de 2, de acuerdo con Parra esto se debe a que estos campos cuentan con más de 70 años de producción y se encuentran en su etapa final. Este tipo de crudo solo representa el 1% de la producción nacional y consumen el 17% de la energía total empleada.

CAPÍTULO III - Caso de Estudio: Índice de Retorno Energético para el Sector de Hidrocarburos en México

Introducción

En el capítulo anterior se ha visto que el IRE asociado a la obtención del petróleo y gas, tanto a nivel global así como en distintas regiones del planeta, está disminuyendo. En el presente capítulo se muestra que la situación para los hidrocarburos en México no resulta distinta. Primero se revisan algunos trabajos que han estudiado la cuestión sobre el retorno energético para la extracción de petróleo y gas en nuestro país, uno de ellos resulta de suma importancia debido a que el trabajo se ha concentrado en el retorno energético de la extracción de petróleo y gas en el campo gigante Cantarell, mostrando que el IRE de este campo se encuentra disminuyendo. A partir de este hecho, y como consecuencia de la importancia histórica que este campo ha tenido para la producción de petróleo en México, no debe ser una sorpresa que a nivel nacional el indicador también muestre una tendencia a la baja, tal y como muestran los resultados que hemos obtenido.

En este trabajo se han empleado 5 metodologías diferentes para estimar el IRE del sector de hidrocarburos en México (ver Tabla 4): 1) Haciendo uso de datos sobre el consumo de energía asociados a las actividades de extracción y refinación de hidrocarburos reportados por PEMEX (sección 3.1), 2) mediante el uso de datos sobre emisiones de CO_2 asociadas a las actividades de extracción y refinación de hidrocarburos reportadas por PEMEX como un proxy de la de la cantidad de energía que se utiliza para llevar a cabo dichas actividades (sección 3.2), 3) a través del precio promedio de la mezcla mexicana de exportación y la ecuación que relaciona el IRE con el precio de la energía (sección 3.3), 4) haciendo uso de datos históricos sobre el gasto monetario nacional en gas y petrolíferos y aprovechando su relación matemática con el IRE (sección 3.4), y finalmente, 5) mediante la aplicación de un modelo lineal de múltiples variables para estimar el consumo de energía asociado a la extracción de petróleo y gas en México (sección 3.5). Cada uno de estos métodos tiene ciertas limitaciones y las discrepancias entre los valores obtenidos pueden explicarse tomando en cuenta los diferentes datos

utilizados o los límites de estudio sobre los cuales aplican, ya que por construcción algunos se refieren al IRE de la extracción de petróleo y gas mientras que otros lo hacen al IRE de los petrolíferos obtenidos, sin embargo, el aspecto más relevante es que, de forma inequívoca, en todos los casos se muestra que el IRE disminuye desde inicios del siglo XXI, este resultado se encuentra en sintonía con lo que teóricamente se espera del indicador. Es decir, que el IRE alcanza su punto máximo antes de que lo haga la obtención de energía, en este caso, antes de que se alcancen los picos de producción de petróleo y gas, que en el caso particular de México estos ocurrieron en 2004 y 2009, respectivamente. Las posibles consecuencias e implicaciones de esta disminución en el IRE para la economía nacional se discutirán en el capítulo siguiente.

Tabla 4 Resumen de los métodos aplicados y resultados obtenidos en este capítulo para el IRE de la extracción de petróleo y gas en México.

Método	Breve descripción	Fórmula Matemática ¹²	IRE 1999	IRE 2014 ¹³
Consumo de Energía PEMEX	Se emplean los datos de consumo de energía reportados por PEMEX y se combinan con los datos de producción de petróleo y gas.	$IRE = \frac{E_{o,t}}{E_{e,t}}$	55.3	40.4
Emisiones de CO₂ de PEMEX	Se emplean los datos sobre emisiones de dióxido de carbono reportados por PEMEX como un	$IRE_{CO_2,t} = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{CO_2,i} \cdot V_{HCl,t})}{E_{CO_2-CE,t} \cdot (1 - \%CO_{2,QV})}$	58.1	39.2

¹² Para la descripción de cada ecuación véase la sección correspondiente.

¹³ Para el caso del IRE calculado a partir del gasto en gas y/o petrolíferos el último año para el cual se estima el indicador es para el 2010.

	indicador indirecto del consumo de energía.			
Precio promedio del crudo	Se aprovecha la relación matemática que existe entre el IRE y el precio promedio del crudo.	$IRE_t = \frac{\theta}{p_t \cdot i_t}$	36.7	10.8
Gasto en Gas y/o Petrolíferos	Se calcula el IRE a partir del gasto nacional en gas y/o petrolíferos.	$IRE_t = \frac{e_t}{f_t}$	26.7- 8.8	13.3 - 6.7
Estimación del consumo de energía mediante modelo lineal	Se construye un modelo lineal de múltiples variables para estimar el consumo de energía directo asociado a la extracción de petróleo y gas en México.	$C_t = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot N_{km,t} + \alpha_3 N_{pe,t} + \alpha_4 N_{ce,t} + \alpha_5 N_{pp,t}$ $IRE_t = \frac{P_t}{C_t}$	53.9	37.1

Antecedentes

Hasta donde es de nuestro conocimiento, dentro de la literatura especializada en el análisis de energía neta solo existen tres referencias directas relacionadas con la extracción de hidrocarburos en México. La primera de ellas se trata de un trabajo publicado en el año 2013 y llevado a cabo por los autores Ramírez y Hall [130], este trabajo es citado por Lambert, Hall y Balog en el documento “*EROI of Global Energy Resources – Status, Trends and Social Implications*” [59], en este último aparece una gráfica que muestra la tendencia en el EROI para la extracción de petróleo y gas en México (ver Figura III-1), de acuerdo a los autores la tendencia a la baja en los valores que muestra el EROI se debe a la declinación que se experimenta en la producción procedente del campo Cantarell, hipótesis que de acuerdo a los resultados obtenidos en el presente

trabajo solo es parcialmente correcta ya que la tendencia a declinar en el EROI comienza antes de que la producción lo haga. Se debe mencionar que al consultar la fuente original [130] de donde se supone se extraen estos valores no es posible encontrar y no se hace mención de los mismos, por lo que no se puede determinar las fuentes, metodología, ni consideraciones hechas al obtenerlos.

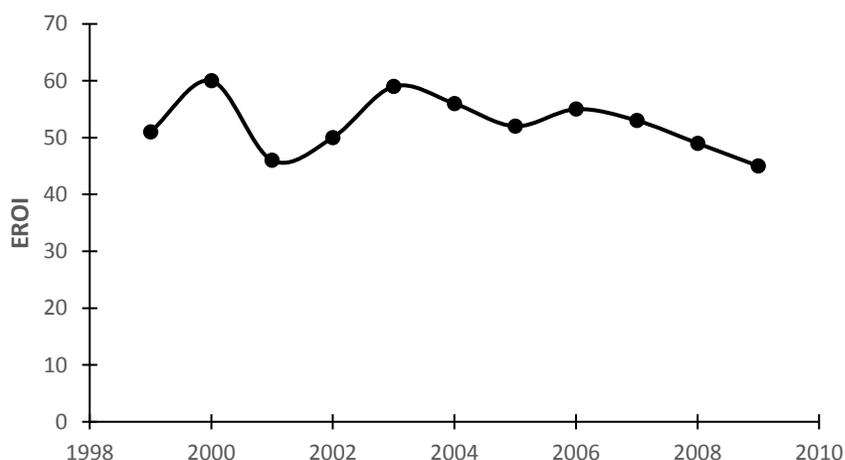


Figura III-1 EROI para la extracción de petróleo y gas en México 1999-2009. Elaborado con datos de [59].

El segundo trabajo que estudia el retorno energético para el caso mexicano se publicó en 2017 por Tripathi y Brandt titulado “Estimating decades-long trends in petroleum field energy return on investment (EROI) with an engineering-based model” [118]. En este estudio los autores utilizan la herramienta OPGEE¹⁴ (Oil Production Greenhouse gas Emissions Estimator). Con este enfoque los investigadores estudian el comportamiento en el retorno energético para cinco campos gigantes distribuidos alrededor del mundo mediante dos índices distintos, NER y EER, siendo el primero de ellos equivalente al EROI de acuerdo a los autores del trabajo. Dentro de los campos estudiados se encuentra el caso mexicano Cantarell para el cual los autores distinguen dos etapas, la primera de ellas

¹⁴ Para una breve descripción sobre este software véase la sección 2.1.

ocurre entre los 1979 y 1999, mientras que la segunda lo hace durante el periodo comprendido entre el 2000 y 2012 (ver Figura III-2).

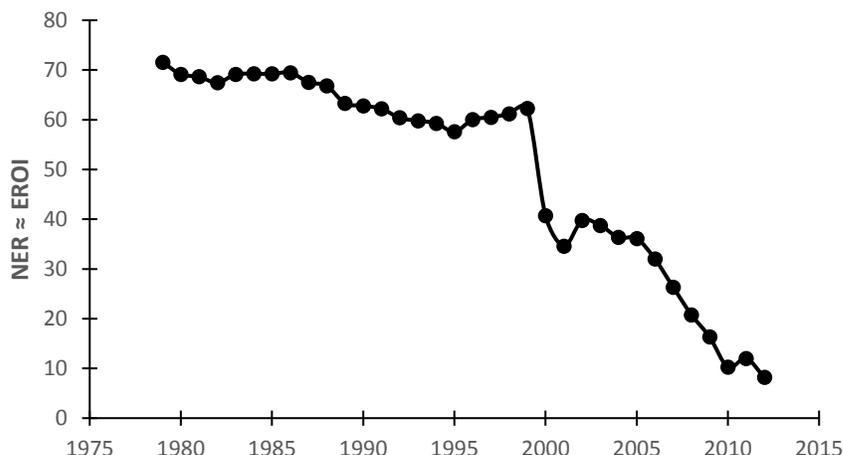


Figura III-2 NER ≈ EROI para la extracción de hidrocarburos en Cantarell 1979 – 2012. Adaptado de [118].

Durante la primera etapa el NER exhibe una disminución del 12% anual, este periodo se caracteriza por el hecho de que hacia el final del mismo en todos los pozos productores se había incorporado el gas-lift como sistema artificial de producción. El comienzo de la segunda etapa, año 2000, se caracteriza por una caída abrupta en el retorno energético que coincide con las actividades de inyección de nitrógeno en el campo. Los autores muestran que en este punto el consumo de energía aumenta particularmente influenciado por la energía requerida para separar e inyectar el nitrógeno. Finalmente también durante esta segunda etapa se tiene una disminución en el retorno energético por la caída en la producción del campo, la cual alcanzó su máximo en el año 2004. Los autores de este trabajo concluyen que la disminución en el retorno energético, en general para los cinco campos estudiados en el artículo, es un fenómeno combinado entre la disminución de la producción y un aumento en los requerimientos de energía que son necesarios para poder obtener, manejar y procesar los fluidos obtenidos de la producción.

Sobre el trabajo de Tripathi y Brandt destaca el hecho de que la curva que describe el comportamiento del índice de retorno energético a lo largo del tiempo para el campo Cantarell no muestra una forma de tipo campana la cual se ha propuesto como el comportamiento típico del indicador [31], este fenómeno podría deberse a que en dicho estudio no se incluyen todos los costos energéticos indirectos asociados con la infraestructura y materiales involucrados en las actividades de extracción del petróleo y gas. Por otro lado, resulta interesante comparar los resultados obtenidos para el índice de retorno energético en Cantarell con el precio promedio del crudo extraído, en este caso particularmente del crudo Maya (ver Figura III-3).

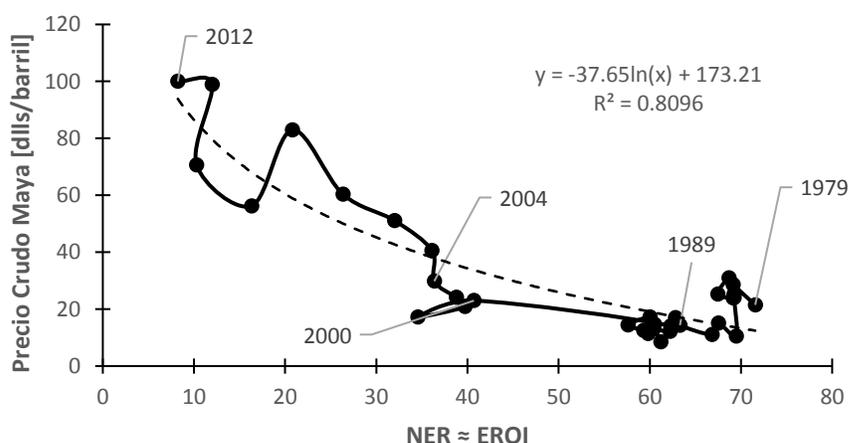


Figura III-3 Precio del crudo Maya vs EROI para Cantarell. Elaborado con datos de [118] [108].

La relación encontrada entre los indicadores, tal y como predice la teoría, es de una de naturaleza inversa y no lineal, en donde la caída en el EROI coincide con la alza en los precios del crudo, alza que, durante el periodo entre 1979 y 2012, comienza a hacerse notable en el año 2000, esto último sugiere que la rápida disminución en el índice de retorno energético a partir del año 2000 en adelante podría estar motivada de forma externa por una cuestión económica o una interacción del tipo I_3 como sugieren los autores Heun y de Wit [72] (ver Figura I-13), dicha interacción indica que una variación en los precios del crudo puede generar una variación en el EROI del recurso actuando de alguna

de las dos siguientes formas: I_{3a} un incremento en los precios provoca un incremento en el margen de ganancia y por tanto provee de capital para incrementar la explotación, lo cual necesariamente requiere incrementar el consumo de energía, disminuyendo el EROI; la segunda posibilidad $I_{3,b}$, puede ocurrir al disminuir el precio del recurso, generando el efecto inverso que la anterior.

La tercera referencia al EROI asociado al sector petrolero en México es un trabajo del 2018 de Celi, Della, Pardi y Siboni [131], quienes hacen una estimación para el EROI de distintas empresas petroleras alrededor del mundo, dentro de las cuales se encuentra PEMEX. El método que estos autores utilizan es completamente análogo al que se desarrolla y utiliza en la sección 3.2, en donde se emplean las emisiones de dióxido de carbono como un indicador del consumo de energía realizado por la empresa para llevar a cabo sus actividades. A diferencia del presente trabajo, estos autores utilizan las emisiones asociadas a todas las actividades de PEMEX, en donde se incluye la extracción de petróleo y gas, la refinación de petróleo, petroquímica, gas y petroquímica y las actividades corporativas, mientras que aquí (sección 3.2) solo se consideran las asociadas a las primeras dos. De acuerdo a Celi y colaboradores, para el año 2014 el EROI para las actividades de PEMEX es de 7.88. Como se discute más adelante este tipo de metodología puede ser importante hacia el futuro debido a disponibilidad de la información referente a las emisiones de dióxido de carbono que puede llegar a existir, aunque como es observado en el presente trabajo puede existir un sesgo en los resultados al ser un método indirecto, y como mencionan Celi y colaboradores, se deben buscar métodos de corrección.

3.1. Cálculo del Índice de Retorno Energético en el periodo 1999-2014

En esta sección se calcula el valor del IRE tanto para la extracción de petróleo y gas en México así como para la etapa de refinación de hidrocarburos, estudiando el primero de estos casos tanto a nivel nacional como regional, y ambos a lo largo de un periodo que comprende los años entre 1999 y 2014.

Como se ha explicado en el primer capítulo del presente trabajo, existen una gran variedad de consideraciones que se pueden hacer al definir los elementos que componen al IRE, aquí por ejemplo, en lo que respecta a los flujos de consumo de energía solo se tiene presente el consumo directo, tanto en su modalidad de flujo interno, que quiere decir que proviene de la misma fuente energética que se explota, como de flujo externo, esto es, un recurso energético que se genera fuera del ciclo bajo estudio, en nuestro caso este último corresponde a la electricidad importada por PEMEX para poder cubrir sus necesidades, de acuerdo a los datos reportados por la empresa esta cantidad representa menos del 1% del consumo total que se realiza [107]. Con respecto a la Figura I-4 este enfoque de estudio se corresponde con el Nivel 2. La decisión de solo tener en cuenta el consumo directo no significa de ninguna manera que no se considere que es de suma importancia contemplar todos los tipos de consumo de energía que ocurren durante los procesos de extracción y refinación, sin embargo, la información disponible limita el tipo de estudio que se puede llevar a cabo. Dentro de la información con la que no se cuenta se tiene el uso de materiales (e.g. cemento, tuberías, barrenas, etc.) necesarios para poder realizar todas y cada una de las actividades involucradas en los procesos bajo estudio. Esta falta de información dificulta, sino es que hace imposible, hacer un cálculo, o al menos una estimación, de las cantidades de energía indirecta que deben emplearse para lograr cubrir la demanda de capital que exigen las actividades del sector petrolero. Este hecho sirve para hacer la recomendación, tanto a las empresas como a los organismos públicos y privados relacionados con el sector energético, de hacer de carácter público información que permita realizar estudios con mayor precisión en lo que al uso de materiales se refiere. En cuanto a la obtención o recuperación de energía, los valores asociados a ello se construyen de manera sencilla haciendo uso de los datos de volumen de hidrocarburos extraídos o procesados junto con los valores de poder calorífico particulares de cada uno de ellos. El IRE se obtiene directamente de realizar el cociente entre la energía obtenida y la invertida en cada etapa estudiada, de acuerdo a la clasificación que se presenta en la Tabla I-2 los indicadores obtenidos para la etapa de extracción y refinación son equivalentes al $EROI_{1,ext}$ y $EROI_{2,ext}$ respectivamente.

Como se ha hecho notar, aquí solo se contempla una fracción de la energía total invertida en las actividades de extracción y refinación, y por lo tanto, los valores obtenidos para el IRE necesariamente están sobreestimados, sin embargo, basados en la discusión sobre las fases del IRE hecha en la sección 1.8, los resultados mostrados en el capítulo II y los antecedentes del indicador para el caso mexicano presentados en este mismo capítulo, podemos concluir con seguridad que las tendencias encontradas son las correctas, al menos para el caso global.

Una vez obtenidos los valores para el IRE para la etapa de extracción de petróleo y gas, se han ajustado a ellos un modelo lineal, exponencial y logarítmico con la intención de conocer, dadas las tendencias encontradas, cuándo podría el indicador alcanzar ciertos valores de interés. Además se han comparado los resultados obtenidos contra algunos indicadores petroleros buscando determinar si es posible observar algunas de las correlaciones que han sido obtenidas y descritas en otros trabajos.

3.1.1 Fuentes de Información y Preparación de Datos

La información referente al consumo de energía se obtuvo de los Informes de Sustentabilidad de PEMEX [107]. En ellos es posible encontrar el registro numérico de la cantidad de energía que fue utilizada a lo largo del año por cada uno de los organismos que componen a la compañía, dentro de ellos se encuentran PEMEX Exploración y Producción y PEMEX Refinación. Las cifras reportadas no cuentan con ningún desglose y se reportan de forma cruda sin mayor especificación que la etiqueta “consumo total de energía”, por lo cual, no resulta posible identificar los usos particulares que se hacen de la misma, esto es, no podemos afirmar, por ejemplo, cuánta fue utilizada específicamente en actividades de perforación, cuánta en los procesos de terminación del pozo, en bombeo, etc. Por lo anterior, debemos hacer la consideración de que esta energía es toda la energía empleada como consumo directo para llevar a cabo y sostener todas las actividades y procesos relacionados con la extracción y posterior refinación de los hidrocarburos. Los datos de consumo ya son reportados en unidades de energía, aunque estas difieren entre

los distintos documentos consultados, para los informes que corresponden a los años comprendidos entre 1999 y 2005, PEMEX reporta su consumo en barriles de petróleo crudo equivalente [bpce], mientras que para el periodo que va del año 2006 al 2013 lo hace en giga calorías [Gcal] y en 2014 utiliza los giga joule [GJ] como unidad.

Por otro lado, en lo que se refiere a la información sobre energía recuperada, se utilizaron los datos sobre volúmenes de producción y elaboración de hidrocarburos reportados en los Anuarios Estadísticos de PEMEX [108] para poder derivarla. Lo anterior haciendo uso de los valores de poder calorífico particulares de cada uno de los hidrocarburos para conseguir el equivalente energético de los volúmenes extraídos y procesados. Para el caso del petróleo crudo se consideró que un barril de petróleo equivale a 6.11 [GJ] [132]. Este valor solo es una aproximación y puede no corresponderse con el contenido energético característico de los crudos extraídos dentro del territorio Mexicano, ya que estos dependen directamente de la composición química de cada aceite, la cual es variable no solo geográficamente sino que también a lo largo del tiempo. Para el gas se consideró un valor promedio de 38.5 [MJ/mc] que se deriva de los valores representativos para el gas asociado y no asociado, 40 y 37 [MJ/mc] respectivamente [133]. Para el caso de los condensados y líquidos del gas, reportados por PEMEX en barriles, solo se encontró un factor reportado para los condensados que es de 4.845 [GJ/barril] [133] este último se emplea para ambas categorías. Análogamente para la etapa de refinación se utilizan los poderes caloríficos de los distintos petrolíferos elaborados en esta etapa, se han tomado en cuenta únicamente aquellos que figuran como combustibles fósiles, siendo estos: gas licuado, gasolina, diésel, turbosina, combustóleo y gas seco. Para aquellos combustibles, como el diésel y la gasolina, que cuentan con distintas presentaciones (e.g. gasolina magna y premium) solo se toma un poder calorífico genérico o promedio como representativo de todas las categorías reportadas. Los valores de poder calorífico empleados se muestran en la Tabla III-5.

Tabla III-5 Poderes Caloríficos de distintos Combustibles. Elaborado con datos de [134].

Petrolífero	Poder Calorífico [bpce/barril de combustible]
Gas Licuado	0.63064
Gasolina	0.81866
Turbosina	0.88187
Diésel	0.92815
Combustóleo	1.01465

La naturaleza del estudio del índice de retorno energético requiere que las unidades en que se miden los flujos de energía que entran y salen del sistema bajo observación estén homogeneizadas, para alcanzar este objetivo en esta sección se optó por tomar como unidad de medida el barril de petróleo crudo equivalente [bpce], el cual como ya se ha mencionado se considera igual a 6.11 [GJ]. En la Tabla III-6 se muestran los datos homogenizados de consumo y producción de energía, en millones de barriles de petróleo crudo equivalente, tanto para la etapa de extracción como para la etapa de refinación de los hidrocarburos.

Tabla III-6 Datos sobre consumo y producción de energía para las etapas de Extracción y Refinación de Hidrocarburos [MMbpce]. Elaboración con datos de [107] [108].

Año	Extracción		Refinación	
	Consumo	Producción	Consumo	Producción
1999	27.10	1499.19	39.40	397.60
2000	24.20	1530.88	38.70	386.36
2001	31.60	1560.47	44.70	396.06
2002	29.60	1565.75	48.40	396.39
2003	26.50	1644.34	41.88	405.43
2004	27.99	1660.55	44.49	407.94
2005	29.30	1653.62	41.70	396.37
2006	28.48	1660.85	42.91	393.93
2007	27.03	1631.60	44.15	388.67
2008	27.66	1575.62	43.57	384.55
2009	33.09	1514.36	43.20	396.80
2010	32.63	1506.91	40.64	366.79
2011	35.16	1472.43	40.00	349.32

2012	35.93	1451.50	42.60	351.73
2013	36.89	1439.58	43.00	372.55
2014	35.03	1415.90	39.56	342.36

Por otro lado, en la Figura III-4 y la Figura III-5 se ilustra la tendencia de estos datos. Para el caso de la extracción de petróleo y gas se tiene que el pico de recuperación de energía ocurrió en el año 2006 con un valor de 1660 [MMbpce], a partir de este año se muestra una declinación constante que se explica principalmente por la caída en la producción que proviene del campo Cantarell el cual es el campo más importante en el país. Durante el periodo de 1999 a 2014 la tendencia en el consumo asociado a las actividades de producción de petróleo y gas es a incrementar. La etapa de refinación por otro lado presenta su pico de producción en el año 2004 con un valor de 407 [MMbpce], si bien el consumo realizado exclusivamente dentro de esta etapa tiende a mantenerse constante, una vez que se tiene en cuenta el costo asociado a la etapa de extracción se crea un comportamiento final con una tendencia positiva.

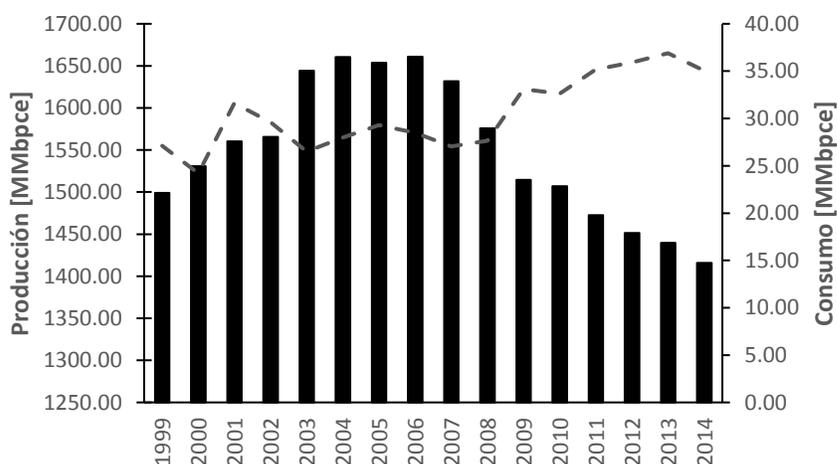


Figura III-4 Producción (barras) y Consumo (línea punteada) de Energía para la extracción de petróleo y gas en México 1999-2014. Elaborado con datos de la Tabla III-6.

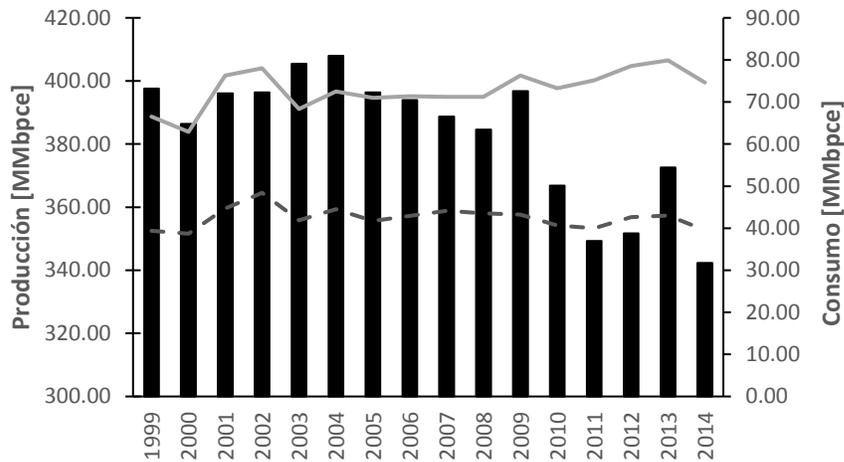


Figura III-5 Producción (barras) y Consumo de energía, exclusivo para Refinación (línea punteada) y Refinación y Extracción (línea continua) en México 1999-2014. Elaborado con datos de la Tabla III-6.

3.1.2 Metodología

Para estimar el IRE para la etapa de extracción y la de refinación se usó la ecuación (III-1), la cual representa la forma más general de definir a los índices de retorno energético. En esta ecuación $E_{o,t}$ se refiere a la energía recuperada por los procesos de extracción y refinación de hidrocarburos, mientras que $E_{e,t}$ se refiere a la energía empleada en los mismos, como ya se ha señalado, en nuestro caso particular esta energía solo considera el consumo directo. El subíndice t se emplea para denotar que las cantidades involucradas son particulares para cada uno de los años estudiados.

$$IRE = \frac{E_{o,t}}{E_{e,t}} \quad (III-1)$$

Como se ha explicado en la sección anterior la construcción del numerador, $E_{o,t}$, esto es, la energía recuperada por el sector petrolero, se basa en la obtención del equivalente

energético de los volúmenes recuperados o procesados, para lo cual es necesario utilizar factores de conversión adecuados. Matemáticamente esto se puede expresar como:

$$E_{o,t} = \sum_{i=1}^n \theta_i \cdot V_{Hci,t}$$

En donde θ_i se refiere al poder calorífico característico para cada tipo de hidrocarburo y $V_{Hci,t}$ denota el volumen total extraído o procesado. Para el caso de la extracción se consideran los volúmenes de: petróleo, gas, líquidos del gas y condensados. Mientras que para la refinación los correspondientes a: gas licuado, gasolina, diésel, turbosina, combustóleo y gas seco. La información que construye el denominador, $E_{e,t}$, no requiere mayor proceso que la conversión a la unidad común seleccionada. Para la etapa de refinación el consumo energético incluye el realizado exclusivamente en las actividades propias de esta etapa y adicionalmente las cantidades consumidas por la etapa de extracción lo cual permite entender el costo energético del ciclo completo, al menos hasta la obtención de los petrolíferos.

Una vez obtenidos los valores para el IRE para la extracción de petróleo y gas se ajustan distintos modelos matemáticos, a partir de los cuales se estiman los años para los cuales el IRE alcanzaría valores de 15, 10, 5 y 1. Posteriormente, se compara el IRE con algunos indicadores petroleros, todos ellos recolectados de los anuarios estadísticos de PEMEX [108], donde se incluye: el precio promedio del barril, el número de campos en operación y la cantidad de kilómetros perforados. Con esta comparación se obtiene el coeficiente de correlación lineal y a través de este se determina el tipo de relación que existe entre las variables.

3.1.3 Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el IRE asociado a las actividades de extracción y refinación de hidrocarburos en México durante 1999 y 2014. Primero se presenta el caso de la extracción de petróleo y gas en México, el cual se divide en los niveles nacional y regional, y en segundo lugar se incluyen los resultados para la etapa de refinación.

Extracción de Petróleo y Gas Nivel Nacional

Los resultados obtenidos al evaluar el IRE para la extracción de Petróleo y Gas en México de acuerdo con lo descrito en la sección de metodología se muestran en la Figura III-6. Aquí puede observar que existe una disminución en el indicador el cual habría tenido un valor de 55.3 en 1999 y se reduciría hasta 40.4 para el 2014. Debemos resaltar que esta tendencia no se corresponde exclusivamente a una disminución en la producción de los hidrocarburos, o en el lenguaje de este trabajo, en la obtención de la energía, ya que durante el periodo de 1999 a 2006 esta se encuentra incrementando (ver Figura III-4). La tendencia negativa encuentra explicación en el hecho de que el consumo experimentó una tasa de crecimiento promedio anual del 2.4% mientras que para la producción esta solo fue del 1.2% durante el periodo del año 2000 al 2006. Posterior al año 2006 la tendencia a declinar en el IRE se explica tanto por la disminución en la obtención de la energía como por el incremento en el consumo de la misma.

Se debe notar que el pico en la producción tuvo lugar en el año 2006 (ver Figura III-4), y como se ha descrito, para este momento el IRE ya se encontraba disminuyendo, lo anterior se corresponde con lo esperado de acuerdo a la teoría discutida y demostrada en la sección 1.8.1. Siguiendo esta línea podemos concluir que el máximo valor para el IRE tuvo que haber tenido lugar en algún momento del pasado, si bien esto último se cumple incluso durante el periodo estudiado, en donde ocurre un valor máximo de 63 en el año 2000, los resultados obtenidos en las secciones 3.4 y 3.5 sugieren que este hecho pudo haberse presentado con mayor anterioridad. Basados en la teoría del

comportamiento del IRE no es de esperar que las tendencias nacionales puedan recuperarse, al menos no de manera importante, hacia el futuro.

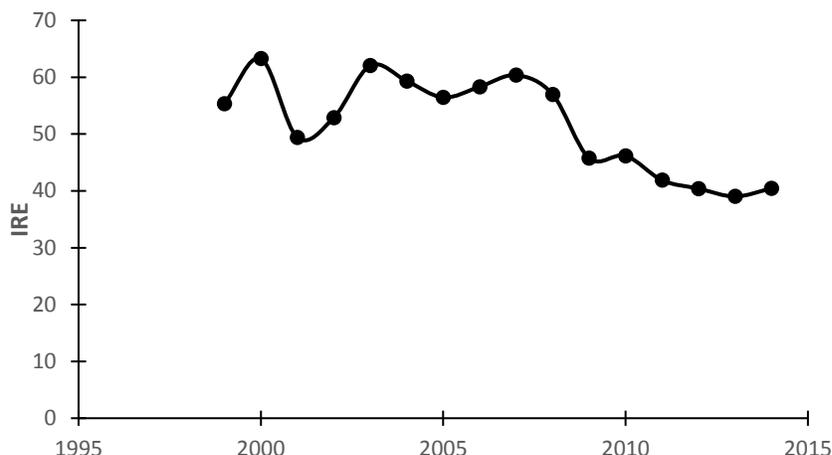


Figura III-6 IRE para la extracción de petróleo y gas en México 1999-2014.

El ajuste de los modelos lineal, exponencial y logarítmico para estos datos arroja coeficientes de determinación (R^2) de 0.57, 0.59 y 0.57, respectivamente. Se hace una estimación del año para el cual el IRE de las actividades de extracción en el país alcanzaría ciertos valores de interés, estos resultados se incluyen en la Tabla III-7. De acuerdo a lo expuesto en la sección 1.10, el IRE mínimo que una fuente energética debe tener para poder contribuir de manera importante a una sociedad es un valor mucho mayor a la unidad, por lo que, aunque se incluye el año estimado en que las actividades de extracción alcanzarían este nivel no se le debe dar más relevancia que a los otros. Además de esta observación, se debe tener presente que nuestros valores están calculados considerando exclusivamente un consumo de energía directa, por lo que, para el IRE real estos escenarios podrían suceder antes de lo aquí planteado. De acuerdo con las proyecciones obtenidas mediante el modelo lineal y logarítmico cerca del año 2040 tendríamos un IRE con un valor de 5 lo que se puede traducir en que para este año las actividades de extracción de hidrocarburos en el país estarían consumiendo el equivalente al 20% de la energía que recuperan.

Tabla III-7 Años en los que se alcanzarían valores para el IRE de 15, 10, 5 y 1 de acuerdo a distintos modelos de ajuste.

Modelo IRE	15	10	5	1
Lineal	2034	2038	2041	2044
Exponencial	2051	2066	2091	2150
Logarítmico	2034	2037	2041	2044

Finalmente, al comparar los resultados obtenidos para el IRE y algunos indicadores petroleros relevantes como lo son el precio promedio del barril (IRE-PPB), el número de campos en producción (IRE-NCP), el número de pozos en explotación (IRE-NPE) y los kilómetros perforados (IRE-KP) para cada año dentro del periodo de estudio, se obtuvieron los coeficientes de correlación lineal, los cuales indican el grado y tipo de relación existente entre estas variables, los resultados de este ejercicio se muestran en la Tabla III-8. De acuerdo estos datos existe una correlación inversa, o negativa, de consideración para las relaciones IRE-PPB, IRE-NCP, IRE-NPE, mientras que para el caso IRE-KP, esta relación se muestra débil. Lo anterior implica que al disminuir una de las variables la otra aumenta. Si bien es de esperar que el consumo energético aumente al incrementar el número de campos en producción, así como el número de pozos produciendo o al hacerse más intensas las actividades de perforación, también se esperaría que la recuperación de energía lo haga, sin embargo, la relación negativa encontrada entre los indicadores muestra de nueva cuenta que durante el periodo estudiado el consumo está creciendo a un ritmo mayor que la producción, de hecho después de 2006 esta última no tiene un crecimiento positivo y por tanto cada vez se requiere invertir más energía para extraer menos gas y petróleo. Por otro lado, el hecho de que, conforme el precio del barril incrementa el IRE disminuye, exhibe la relación inversa que existe entre estos dos indicadores, dicha relación puede leerse de las siguientes dos maneras: 1) La extracción de recursos energéticos con menor índice de retorno requiere de un mayor precio en el barril para lograr cubrir el incremento asociado a los costos energéticos de obtención o 2)

el incremento en el precio del barril hace rentable la extracción de recursos que requieren un mayor esfuerzo para su explotación.

Tabla III-8 Coeficiente de correlación lineal entre el IRE y algunos indicadores petroleros.

Variables	Coeficiente de Correlación
IRE-PPB	-0.70
IRE-NCP	-0.81
IRE-NPE	-0.81
IRE-KP	-0.36

Extracción de Petróleo y Gas Nivel Regional

Región Norte

En la Figura III-7 se muestran los datos asociados a la recuperación y el consumo de energía realizado en la Región Norte. Dentro de los datos de consumo destacan los asociados a 2001 y 2010, el primero por presentarse como un incremento considerable y el segundo como una disminución importante con respecto. Como ya se ha hecho notar la información que PEMEX [107] reporta como consumo energético no cuenta con gran detalle y por tanto no es posible explicar a partir de la fuente original la naturaleza de estas variaciones, sin embargo, si éstas no corresponden a un error, entonces quizá podrían estar parcialmente explicadas por las actividades de perforación, ya que en esos años se observan incrementos y reducciones sustanciales en esta actividad.

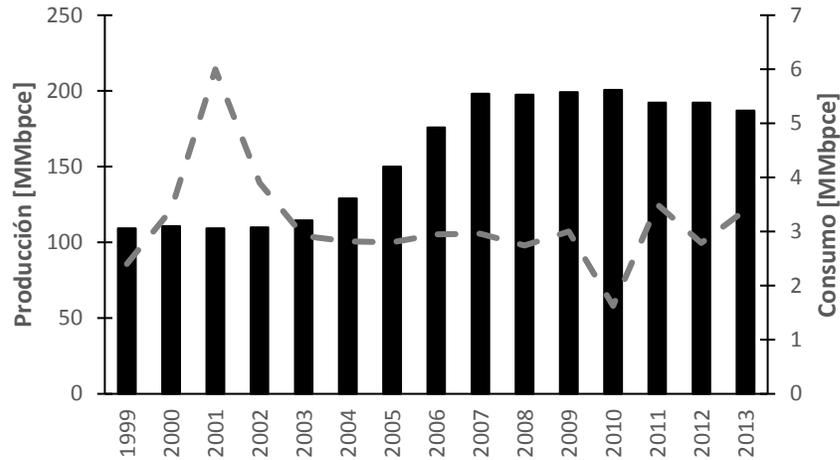


Figura III-7 Producción (barras) y Consumo (línea punteada) de Energía para la extracción de petróleo y gas en la Región Norte 1999-2013. Elaborado con datos de [107] [108].

Los resultados obtenidos al evaluar el IRE para esta región muestran una tendencia negativa durante 1999 y 2001 (ver Figura III-8), dicha tendencia estaría asociada con el aumento en el consumo de energía, posiblemente vinculado con una alta intensidad en perforación, y una tendencia constate en la recuperación energética. Posteriormente el IRE incrementa hasta un pico máximo con un valor de 123 en el año 2010, este último se corresponde a la disminución abrupta que se presenta en el consumo de energía potencialmente asociado a una disminución en las actividades de perforación.

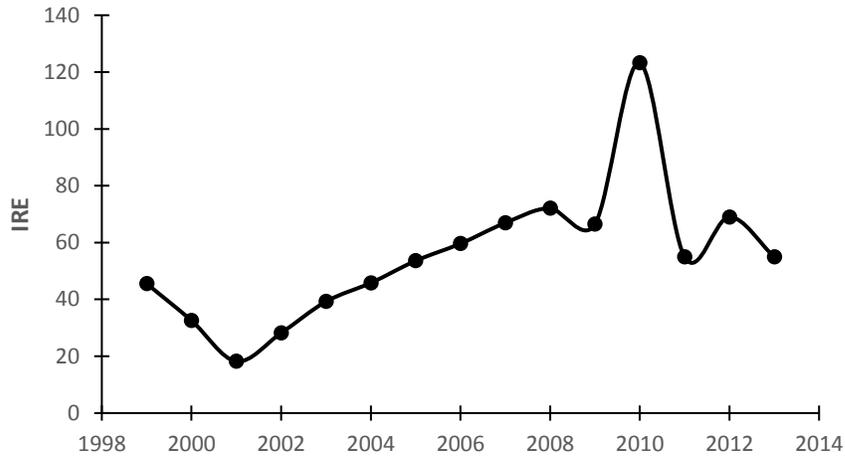


Figura III-8 IRE para la extracción de petróleo y gas en la Región Norte 1999-2013.

Región Sur

En la Figura III-9 se resume la información sobre la recuperación y consumo de energía realizado dentro de la Región Sur durante 1999 a 2013. Existe una tendencia general a la baja, desde 1999 y hasta 2006, tanto en lo que respecta a la recuperación como en lo referente al consumo, teniendo que la tasa de decrecimiento anual promedio para estos años es alrededor del 3% para la producción y del 6% para el consumo. A partir del 2006 y hasta el 2010 tanto el consumo como la producción muestran una tendencia a incrementar con una tasa anual promedio del 2.3 y 2.9% respectivamente.

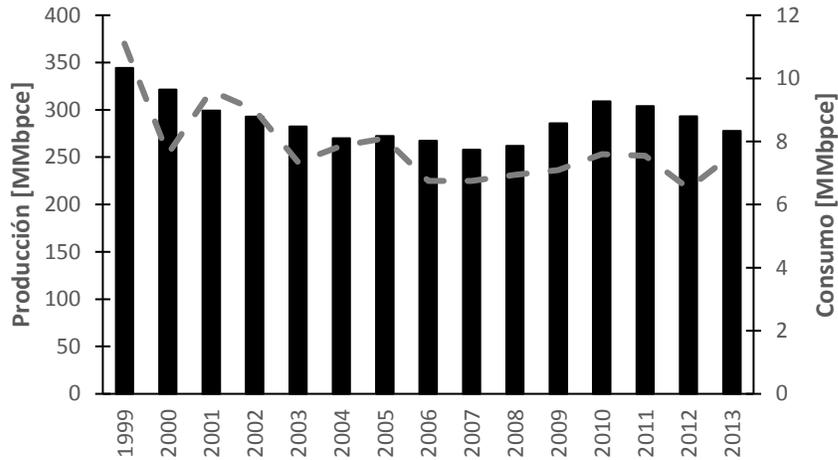


Figura III-9 Producción (barras) y Consumo (línea punteada) de Energía para la extracción de petróleo y gas en la Región Sur 1999-2013. Elaborado con datos de [107] [108].

En la Figura III-10 se aprecia la tendencia a la alza del IRE, pasando de 31 en 1999 a 36.6 en el año 2013, exhibiendo un valor máximo de 45 en 2012. Este comportamiento se explica debido a diferencia que existe entre las tasas de crecimiento anual promedio que presentan el consumo y captación de energía, si bien es cierto que durante los años comprendidos entre 1999 y 2006 ambas cantidades se encuentran disminuyendo, el consumo lo hace con una mayor velocidad lo cual resulta en un incremento del IRE, por otro lado, durante el periodo que va de 2006 a 2010 la velocidad de crecimiento en la recuperación de energía es ligeramente mayor que la que experimenta el consumo, resultando en una evolución positiva del IRE.

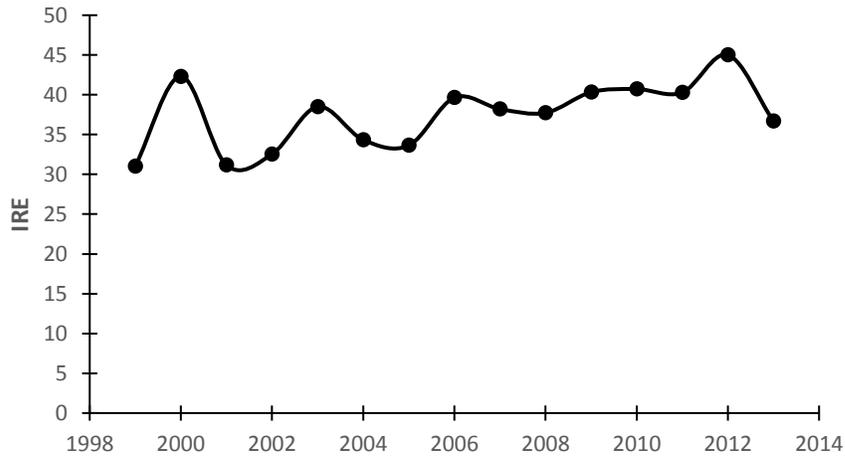


Figura III-10 IRE para la extracción de petróleo y gas en la Región Sur 1999-2013.

Región Marina Noreste

Las tendencias asociadas a la producción y consumo de energía dentro de esta región se muestran en la Figura III-11. Se destaca que el máximo valor asociado a la recuperación energética ocurrió en 2004, lo cual está asociado con la ocurrencia de un pico en la producción del campo gigante Cantarell. Por otro lado, el consumo de energía muestra una tendencia general a la alza, lo anterior posiblemente dominado por las altas inversiones hechas para mantener la presión de yacimiento y producción de Cantarell, esto último mediante la implementación del proyecto de inyección de gas nitrógeno el cual entró en operaciones a partir del año 2000 [135].

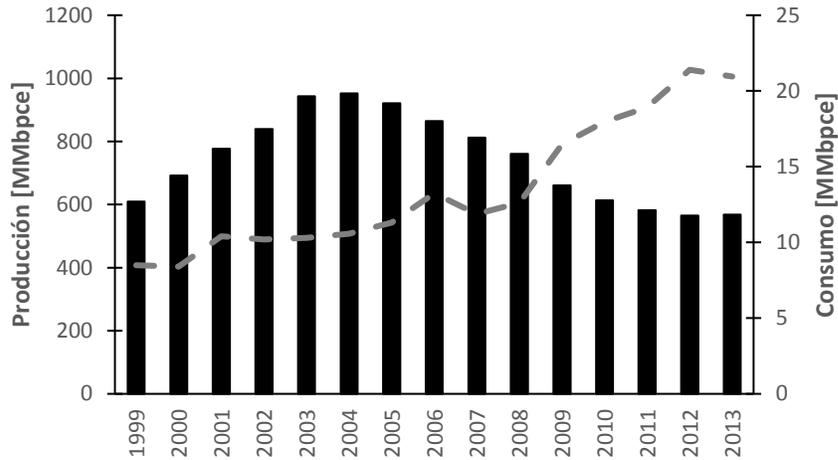


Figura III-11 Producción (barras) y Consumo (línea punteada) de Energía para la extracción de petróleo y gas en la Región Marina Noreste 1999-2013. Elaborado con datos de [107] [108].

La tendencia asociada al IRE de esta región se muestra en la Figura III-12. Se exhibe una clara tendencia a disminuir durante el periodo de estudio, pasando de un valor de 71 en 1999 a uno de 27 en el 2013. El hecho de que las otras 3 regiones estudiadas muestren tendencias positivas en el IRE, junto con la información de que esta región aportó cerca del 50% de la energía recuperada a nivel nacional durante el periodo observado, permite confirmar que la disminución en el IRE para extracción de petróleo y gas en el país está dominada por la situación que se presenta en Cantarell.

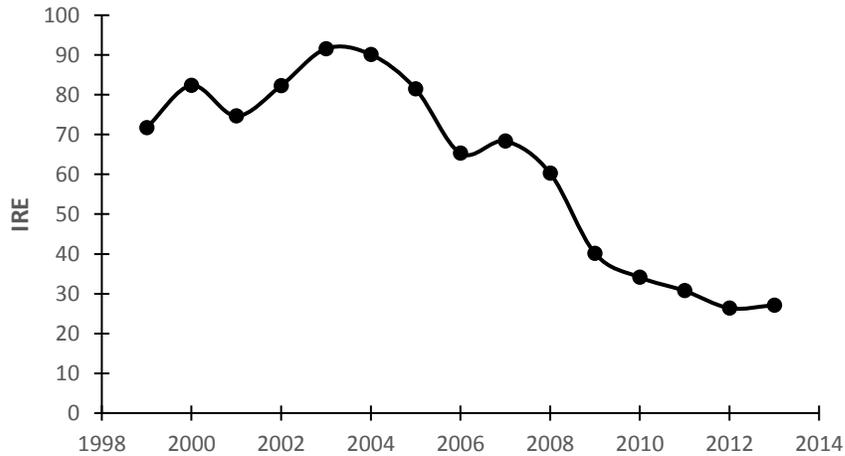


Figura III-12 IRE para la extracción de petróleo y gas en la Región Marina Noreste 1999-2013.

Región Marina Suroeste

La recuperación y consumo de energía asociados a esta región se muestra en la Figura III-13. Se aprecia una disminución en la producción, a partir de 1999 y hasta 2004, año a partir del cual comienza a presentar una tendencia a la alza. Durante todo el periodo el consumo muestra una tendencia general a incrementar.

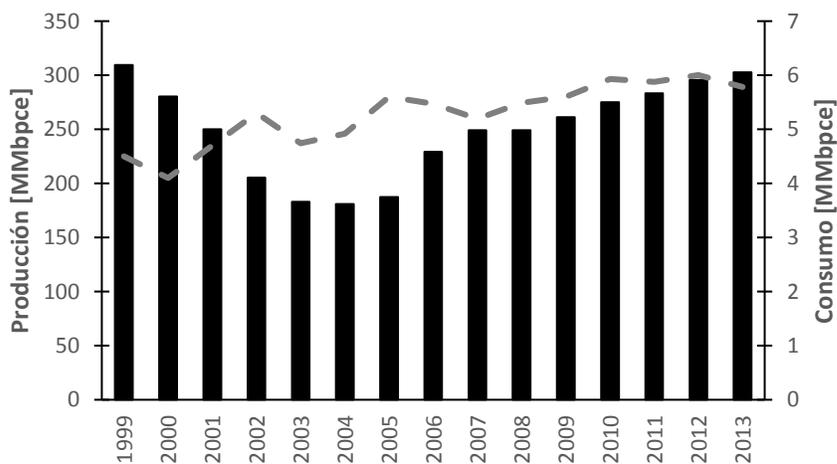


Figura III-13 Producción (barras) y Consumo (línea punteada) de Energía para la extracción de petróleo y gas en la Región Marina Suroeste 1999-2013. Elaborado con datos de [107] [108].

La combinación de las tendencias presentes en el consumo y la recuperación energética resultan en una disminución continua en el IRE desde 1999 y hasta 2005, cayendo de 68.7 a 33.44. Desde el 2005 y hasta el 2013 el indicador se recupera alcanzado un valor de 52.33.

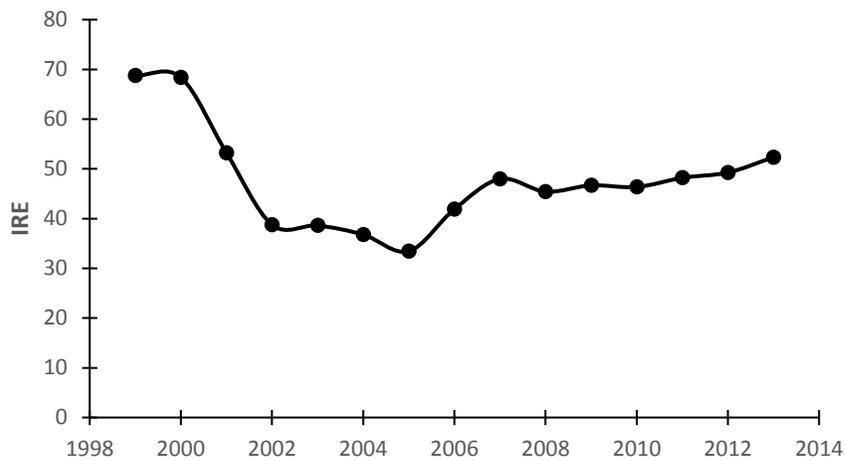


Figura III-14 IRE para la extracción de petróleo y gas en la Región Marina Noreste 1999-2013.

Refinación de Petróleo Nivel Nacional

Los resultados obtenidos para el IRE vinculados con la etapa de refinación de petróleo en el país muestran una tendencia clara a disminuir situándose alrededor de 6 en 1999 y cayendo a un valor de 4.5 en el 2013. Si bien el consumo energético exclusivo de la etapa de refinación parece disminuir ligeramente durante el periodo observado (ver Figura III-5) esto último no se traduce en un efecto positivo sobre el IRE como consecuencia de la disminución el recuperación de energía en forma de petrolíferos y el aumento en el consumo durante la etapa de extracción.

Uno de los hechos que más llama la atención sobre los resultados obtenidos, es que la magnitud los valores del IRE asociados a la etapa de refinación son notablemente inferiores a los asociados a la etapa de extracción, sin embargo, este fenómeno está en

perfecta sintonía con lo observado en otros trabajos en donde se ha estudiado el IRE para la obtención de productos derivados del petróleo (ver Capítulo II).

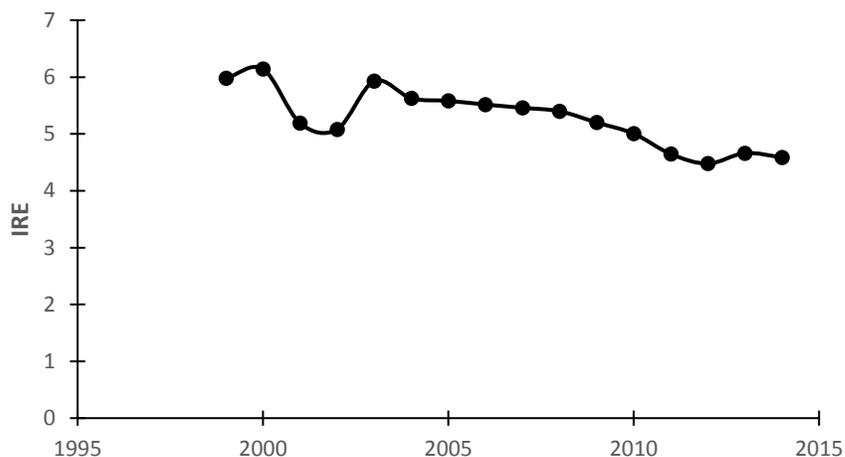


Figura III-15 IRE para la etapa de refinación de petróleo en México 1999-2013.

3.2. Cálculo del Índice de Retorno Energético en el periodo 1999-2014 Mediante Emisiones de CO_2

En esta sección se estima el IRE asociado a las actividades de extracción y refinación de hidrocarburos en el país haciendo uso de un método que aprovecha la información sobre las emisiones de dióxido de carbono relacionadas estas actividades. La idea general consiste en notar que las emisiones de CO_2 generadas tanto por los procesos de extracción así como por los de refinación de hidrocarburos están directamente relacionadas con el uso de combustibles fósiles y por lo tanto constituyen una muestra indirecta del consumo de energía. Por otro lado, teniendo presente que una vez que los hidrocarburos recuperados sean consumados también desprenderán ciertos niveles de CO_2 , se puede hacer una estimación del IRE al comparar los volúmenes de CO_2 asociados con el consumo y la recuperación de energía.

Existen trabajos previos en donde se han utilizado métodos similares al que aquí se emplea (por ejemplo en [51] [45]), e incluso aplicados al caso mexicano [131]. El incremento en la conciencia alrededor de la problemática ambiental por la cual hoy se atraviesa permite suponer que en el futuro cercano las políticas y regulaciones aplicadas a la industria energética le obligarán a reportar una mayor cantidad de datos relacionados con su impacto al medio ambiente, en este escenario procedimientos similares al que se muestra en esta sección pueden convertirse en herramientas muy útiles para estudiar el comportamiento del índice de retorno energético.

3.2.1 Fuentes de Información y Preparación de Datos

La información referente a las emisiones de CO_2 asociadas a las actividades de extracción de petróleo y gas en el país así como a los procesos de refinación del petróleo se tomaron de los informes de sustentabilidad de PEMEX [107]. Los datos son reportados como millones de toneladas de dióxido de carbono anuales. De acuerdo a estos reportes no todas las emisiones se encuentran asociadas de forma directa a un proceso de consumo de energía, parte de ellas es atribuible a las actividades de quema y venteo de gas natural; durante el periodo estudiado es posible calcular que, en promedio, el 24.5% de las emisiones están relacionadas con este tipo de actividades. Por lo anterior, es necesario realizar una corrección sobre los datos con el objetivo de solo tener presentes aquellas emisiones que sí corresponden al consumo de energía, dicha corrección consiste en restar del total de emisiones reportadas la fracción asociada a la quema y venteo de gas. Para aquellos años en los que no ha sido posible encontrar de forma explícita dicha fracción se utiliza el promedio calculado y mencionado anteriormente.

Para obtener la cantidad de emisiones de dióxido de carbono asociada a los volúmenes de petróleo, gas y petrolíferos es necesario la aplicación de factores apropiados que permitan su obtención. Para la etapa de extracción, en lo que respecta al gas recuperado, se toma en cuenta el factor de emisión para el gas natural publicado por la Administración de Información Energética de Estados Unidos (EIA por sus siglas en

inglés), dicho factor establece que se emiten 0.05312 kg de CO_2 por cada pie cubico de gas que se consume [136]. En lo que se refiere al petróleo crudo extraído se hace necesario derivar un factor de emisión ya que este hidrocarburo no es consumido como tal. El primer paso para calcular dicho factor requiere de conocer la densidad del petróleo extraído, en el presente trabajo se ha construido una densidad promedio a partir de la siguiente ecuación:

$$\bar{\rho} = \sum_{i=1}^3 (\rho_i \cdot \bar{f}_i) \quad (\text{III-2})$$

En donde ρ_i se refiere a la densidad particular y representativa de cada uno de los tipos crudo extraídos en el país (ver Tabla III-9) y \bar{f}_i representa la participación promedio que ha tenido cada uno de estos tipos de crudo en el volumen total recuperado durante el periodo que va de 1999 a 2014, siendo esto último calculado a partir de la información disponible en los anuarios estadísticos de PEMEX [108]. De acuerdo a nuestros cálculos la densidad promedio del crudo extraído en el país es de 0.8977 [gr/cc], este valor tiene sentido al considerar que durante el periodo bajo estudio es posible calcular que, en promedio, alrededor del 61% de la producción total de crudo fue del tipo pesado

Tabla III-9 Densidades por Tipo de Crudo. Elaborado con datos de [137].

Tipo de Crudo	Densidad [gr/cc]
Pesado	0.9248
Ligero	0.8628
Súper ligero	0.8324

Una vez conocida la densidad se tiene en cuenta que en la composición por peso para un crudo típico el Carbono (C) representa entre el 83 y 87% del mismo [138], para los cálculos que se presentan a continuación se tendrá en cuenta el promedio de estos

últimos como valor representativo, esto es 85%. Teniendo en cuenta que un barril de crudo equivale a un volumen de 159 litros se puede concluir, haciendo uso de la densidad derivada arriba, que cada barril de crudo contiene aproximadamente 142.7 [kg] de petróleo que a su vez consistirían en 121.3 [kg] de C. Por otro lado, si la masa molar del CO_2 es de 44 [gr/mol] y la del carbono es de 12 [gr/mol], entonces este último representa el 27.27% de la masa total del primero. Asumiendo que todo el carbono presente en un barril de petróleo termina por convertirse en CO_2 se obtiene que se pueden generar alrededor de 444.8 [kg CO_2 /barril] lo cual representa solo un valor aproximado ya que en realidad no todo el carbono presente en un barril de petróleo termina por convertirse en dióxido de carbono. Finalmente, en lo que respecta a los líquidos del gas y condensados, al no contar con un factor de emisión particular se ha recurrido a transformarlos a barriles de petróleo crudo equivalente y hacer uso del factor derivado previamente.

Tabla III-10 Datos sobre emisiones de CO_2 asociadas al consumo y recuperación de energía para las etapas de Extracción y Refinación de Hidrocarburos en México [MMton]. Elaboración a partir de datos de [107] [108].

Año	Extracción		Refinación	
	CO_2 - Consumo	CO_2 - Producción	CO_2 - Consumo	CO_2 - Producción
1999	13.87	620.99	15.09	185.28
2000	14.23	636.16	14.18	180.15
2001	13.26	650.93	13.69	184.63
2002	10.50	654.13	14.20	184.87
2003	11.52	688.37	16.09	188.01
2004	10.00	694.86	16.20	188.77
2005	9.93	689.43	15.64	183.25
2006	11.18	687.49	15.75	181.94
2007	15.50	667.75	15.69	179.21
2008	25.70	634.60	15.62	177.14
2009	21.76	606.28	15.02	183.12
2010	17.90	603.07	13.90	169.77
2011	14.10	591.81	14.30	161.70
2012	12.58	584.50	14.40	162.19
2013	14.14	579.35	14.92	171.49
2014	19.16	567.26	14.49	157.76

En la Tabla III-10 se presentan los datos relativos a las emisiones de CO_2 asociadas a la recuperación y consumo de energía por parte de las actividades de extracción de petróleo y gas en el país, mientras que en la Figura III-16 se muestran las tendencias de los mismos. Se debe hacer notar que a diferencia de lo que se exhibe en la Figura III-4, la cual muestra una clara tendencia positiva en el consumo de energía, las emisiones de CO_2 , en teoría directamente proporcionales a dicho consumo, muestran una tendencia a la baja durante el periodo que va 1999 a 2005 y de nueva cuenta entre 2008 y 2012. Esta disparidad ocurre como resultado de la implementación de distintas acciones orientadas directamente a la reducción en las emisiones de este gas tomadas por parte de PEMEX en una búsqueda por mitigar su impacto ambiental. Dentro de dichas acciones se tiene el aprovechamiento del CO_2 en procesos de recuperación secundaria y la incorporación de infraestructura que permitió aprovechar el gas natural recuperado, reduciendo con ello el volumen enviado a quema y venteo [107]. En el año 2009 por ejemplo se presenta una disminución en las emisiones de CO_2 como consecuencia del inicio de las actividades de reinyección de gas al yacimiento Cantarell. Por otro lado, de acuerdo a PEMEX [107] el incremento drástico que ocurre en la emisiones de dióxido de carbono durante el periodo de 2005 a 2008 tiene origen en diversos factores entre los cuales están: el incremento en el consumo de energía derivado de las necesidades de producción, fallas en el equipo de procesamiento de gas y el incremento en los volúmenes de gas producido con gran contenido de nitrógeno provenientes del campo Cantarell, volúmenes para los cuales no se contaba con la infraestructura suficiente para lograr manejarlos derivando ello en la necesidad de enviarlos a quema y venteo. De estas observaciones se puede concluir que si bien es posible medir el IRE mediante los datos asociados a las emisiones de CO_2 , se debe tener cierta cautela al usar esta información ya que la misma puede no reflejar de manera adecuada el consumo real de energía que ocurre debido a que parte de las emisiones pueden ser aprovechadas, y todo volumen de CO_2 aprovechado, y que por tanto no es liberado a la atmósfera, no figurara dentro de las tendencias finales.

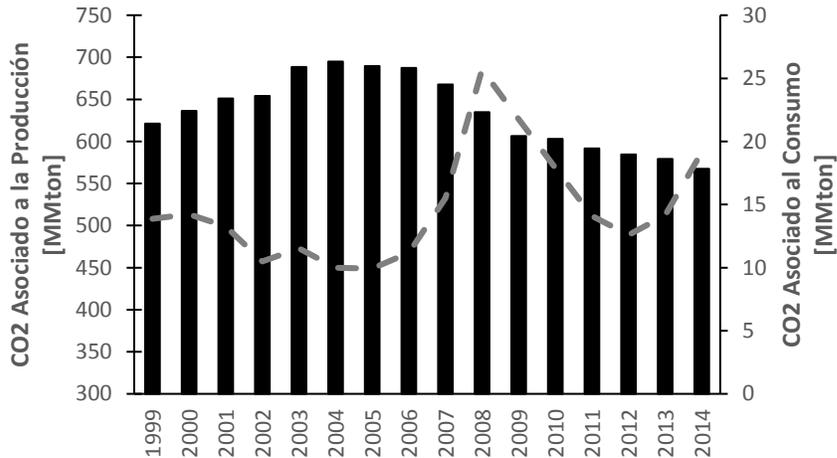


Figura III-16 Emisiones de CO_2 asociadas a la Producción (barras) y Consumo (línea discontinua) de energía de las actividades de extracción de petróleo y gas en México 1999-2014. Elaborado con datos de la Tabla III-10.

Las emisiones de CO_2 asociadas a los petrolíferos elaborados durante la etapa de refinación se obtienen al considerar que cada kilogramo de combustible, una vez consumado, genera alrededor de 3.15 kilogramos de CO_2 [139] [134] (De acuerdo a esto un barril de crudo nacional con peso aproximado de 142.7 [kg] generaría 449.5 [kg] de dióxido de carbono, esto es alrededor de un 1% mayor que el valor estimado arriba). Los volúmenes de petrolíferos elaborados se obtienen de los anuarios estadísticos [108] y las masas correspondientes a los mismos se obtienen utilizando las densidades particulares de cada uno de ellos (ver Tabla III-11), para el caso del gas natural se utiliza el mismo factor que para la etapa de extracción.

Tabla III-11 Densidades para diferentes tipos de petrolíferos. Elaborado con los datos de [134].

Petrolífero	Densidad [kg/l]
Gas Licuado	0.525
Gasolina	0.739
Turbosina	0.783
Diésel	0.826
Combustóleo	0.999

En la Tabla III-10 se presentan los datos relativos a las emisiones de CO_2 asociadas a la etapa de refinación en México, mientras que en la Figura III-17 se resumen las tendencias de los mismos. Es posible apreciar que las emisiones exclusivas a la etapa de refinación muestran una tendencia a mantenerse constantes durante el periodo observado, dicho comportamiento es el mismo que exhiben los datos de consumo de energético (ver Figura III-5). Este último hecho permite concluir que las emisiones asociadas a quema y venteo de gas no tienen gran efecto sobre las emisiones reportadas para las actividades de refinación de hidrocarburos. Por otro lado, en las emisiones totales, que incluyen tanto las de la etapa de extracción como las de refinación, se aprecia una tendencia general a incrementar con una clara sensibilidad a lo que ocurre en la etapa de extracción.

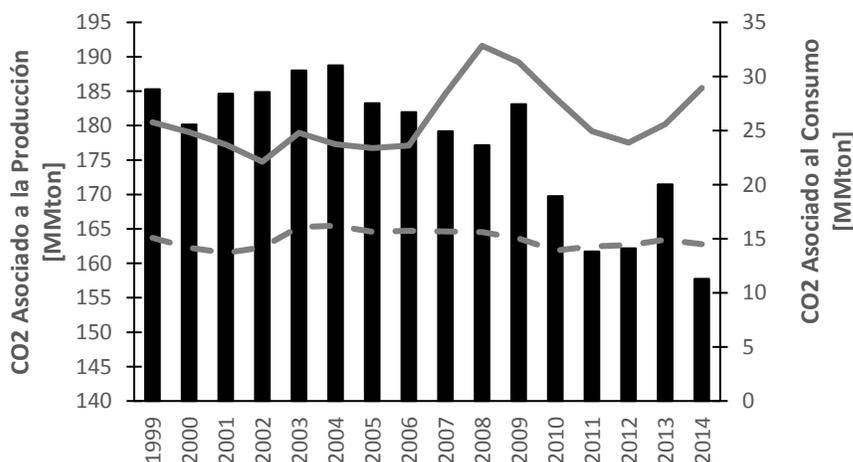


Figura III-17 Emisiones de CO_2 asociadas a los petrolíferos elaborados (barras) y Consumo de energía exclusivo para Refinación (línea discontinua) y Refinación y Extracción (línea continua) en México 1999-2014. Elaborado con datos de la Tabla III-10.

3.2.2 Metodología

El IRE para la etapa de extracción de petróleo y gas se calcula de acuerdo a la ecuación (III-3), en ella $\theta_{CO_2,i}$ se refiere al factor de emisión de dióxido de carbono por

volumen de hidrocarburo, $V_{Hci,t}$ es el volumen del hidrocarburo extraído en el año t, $E_{CO_2-CE,t}$ son las emisiones asociadas a las actividades de extracción de petróleo y gas durante el año t, como ya se ha mencionado ya que no todas estas emisiones son originadas directamente por el uso de combustibles, este volumen es modificado restando la fracción que corresponde al CO_2 generado por la quema y venteo de gas natural, esta última queda representada por $\%CO_{2,QV}$.

$$IRE_{CO_2,t} = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{CO_2,i} \cdot V_{Hci,t})}{E_{CO_2-CE,t} \cdot (1 - \%CO_{2,QV})} \quad (III-3)$$

Para la etapa de refinación se utiliza la ecuación (III-4) en donde ρ_i es la densidad particular de cada petrolífero, $V_{Hci,t}$ es el volumen particular de cada petrolífero elaborado durante el año t, mediante la multiplicación de estos dos últimos factores se obtiene la masa total producida para cada producto de la refinación y de acuerdo a lo dicho en la sección anterior las emisiones de CO_2 corresponden a un factor de 3.15 veces esta masa; finalmente $E_{CO_2-CR,t}$ se refiere a las emisiones de dióxido de carbono asociadas directamente a la etapa de refinación.

$$IRE_{CO_2,t} = \frac{3.15 \cdot \sum_{i=1}^n (\rho_i \cdot V_{Hci,t})}{E_{CO_2-CR,t} + E_{CO_2-CE,t} \cdot (1 - \%CO_{2,QV})} \quad (III-4)$$

3.2.3 Resultados

Extracción de Petróleo y Gas Nivel Nacional

Los resultados obtenidos para la etapa de extracción de petróleo y gas en México se muestran en la Figura III-18. La tendencia general muestra existe una disminución en el indicador durante el periodo estudiado al pasar de un valor de 58.1 a uno de 39.2 durante el inicio y final del mismo, si bien este es el mismo comportamiento encontrado al calcular el IRE a partir de los datos de consumo de energía (ver Figura III-6) en este caso la tendencia no es tan marcada, este fenómeno puede deberse al hecho de que las emisiones de CO_2 asociadas a estas actividades no reflejan de manera fiel el consumo energético ocurrido, esto último como una consecuencia de las acciones que se han tomado por parte de PEMEX para mitigar la expulsión del dióxido de carbono a la atmosfera. También resalta que los valores para el IRE obtenidos mediante este procedimiento son mayores que los calculados en la sección 3.1, esto, además de lo ya expuesto en relación a la falta de fidelidad al representar el consumo de energía, se puede explicar en principio debido a que cerca del 80% del consumo energético se satisface con gas natural el cual tiene un factor de emisión alrededor de 48.7 [kg CO_2 /GJ de gas] que resulta ser menor en comparación con el asociado al petróleo crudo, alrededor de 72.7 [kg CO_2 /GJ de petróleo crudo], el cual promedio constituye el 74% de la energía recuperada.

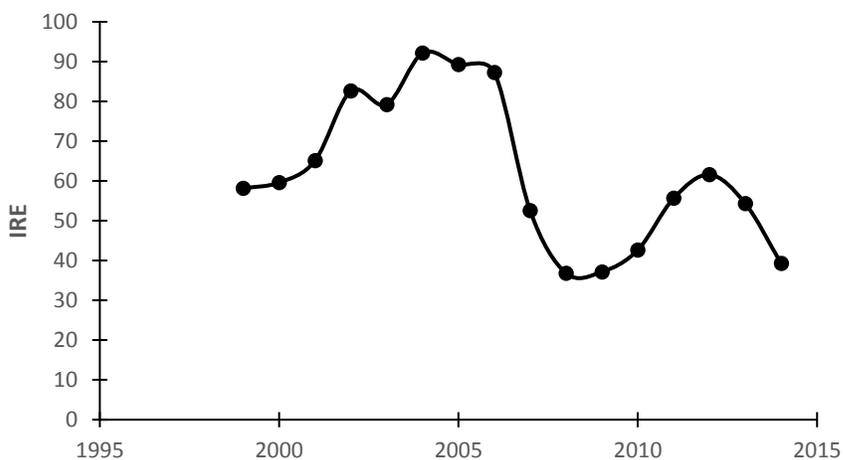


Figura III-18 IRE para la extracción de petróleo y gas en México mediante emisiones de CO_2 1999-2014.

Refinación de Petróleo Nivel Nacional

En la Figura III-19 se muestran los resultados obtenidos para la etapa de refinación, a diferencia de lo obtenido para la extracción aquí parece conservarse bien tanto la tendencia y la magnitud en el IRE obtenidas en la sección 3.1, se muestra una disminución en el indicador, pasando de un valor de 7.1 en 1999 a uno de 5.45 en el año 2014.

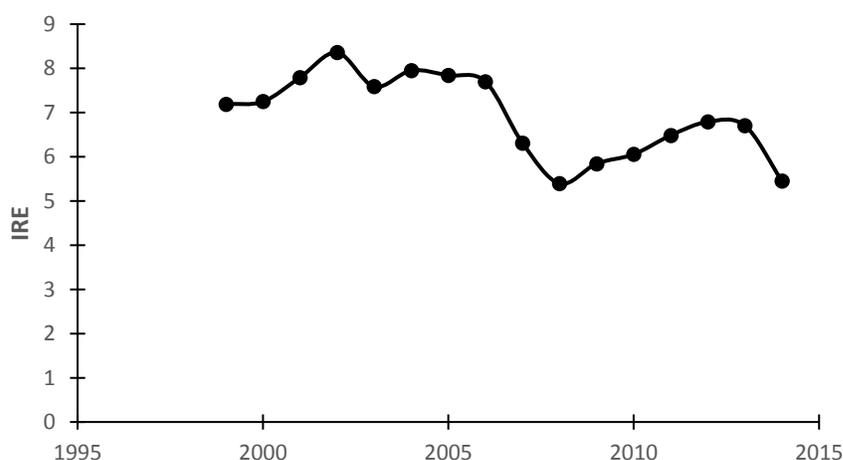


Figura III-19 IRE para la etapa de refinación de petróleo en México mediante emisiones de CO₂ 1999-2013.

3.3. Cálculo del Índice de Retorno Energético en el periodo 1979-2018 Mediante Precios Promedio de Crudo

En esta sección se estima el IRE asociado a las actividades de extracción de petróleo en México durante el periodo de 1979 a 2018 haciendo uso de una metodología basada en el precio promedio de la mezcla mexicana de exportación.

Distintos autores han estudiado y descrito la relación que existe entre el IRE y los precios de la energía concluyendo de manera general que esta es negativa o inversa, además de lo anterior, se han propuesto distintas formulaciones matemáticas que capturan dicha relación (ver sección 1.7.1), aquí se presenta un ejemplo del razonamiento

que se puede seguir para llegar a conclusiones similares. La idea general consiste aprovechar la intensidad energética del país, definida como el cociente entre el consumo nacional de energía y el producto interno bruto, para hacer una estimación del consumo energético de las actividades de extracción. Lo anterior se logra partiendo del hecho que 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, conocido el valor económico que genera el volumen de hidrocarburos que se extrae del subsuelo es posible estimar el consumo energético asociado al mismo. Si bien este consumo estimado representa solo una aproximación del consumo real, como consecuencia de que el valor de intensidad energética empleado es solo un promedio y puede no representar de manera fiel la intensidad del sector energético, en comparación con los métodos de las dos secciones anteriores, en donde solo se considera el consumo directo, este 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 cuenta todos los costos energéticos directos e indirectos que están asociados a los materiales e infraestructura utilizada además de los salarios que sirven para mantener a los trabajadores. Por otro lado, la energía recuperada por los procesos de extracción se obtiene de manera sencilla al emplear el equivalente energético de un barril de petróleo, con esta información se construye el IRE de esta sección, de acuerdo a la clasificación que se presenta en la Tabla I-1 este IRE sería equivalente al $EROI_{1,lab}$.

La expresión (III-7) que aquí se deduce para obtener el IRE es idéntica a la formulación obtenida por Kaufmann en 1986 [140] (citado en [111]) para obtener el EROI del petróleo importado por Estados Unidos y al índice de intensidades energéticas (EIR por sus siglas en inglés) definido por King en el año 2010 [70]. De acuerdo al trabajo de este último autor el EIR es un indicador representativo del EROI, conclusión que se obtiene al comparar los valores de EIR calculados para el petróleo, gas y carbón contra los del EROI asociados a los mismos.

3.3.1 Fuentes de Información y Preparación de Datos

Para construir los valores de intensidad energética propios de la economía mexicana es necesario emplear datos sobre el producto interno bruto y el consumo nacional de energía. Los primeros se obtuvieron de la base de datos del Banco Mundial [61] y son reportados en dólares sin ajustes por inflación. La información sobre consumo nacional de energía, reportada en peta joule, se toma de la base de datos de SENER [141]. La intensidad energética se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$i_t = \frac{E_{c,t}}{PIB_t} \quad (\text{III-5})$$

Donde E_c se refiere a la energía consumida y PIB al producto interno bruto nacional, en ambas situaciones el subíndice t indica que estos valores son característicos para cada año estudiado. En la Figura III-20 se puede apreciar la tendencia de los valores obtenidos.

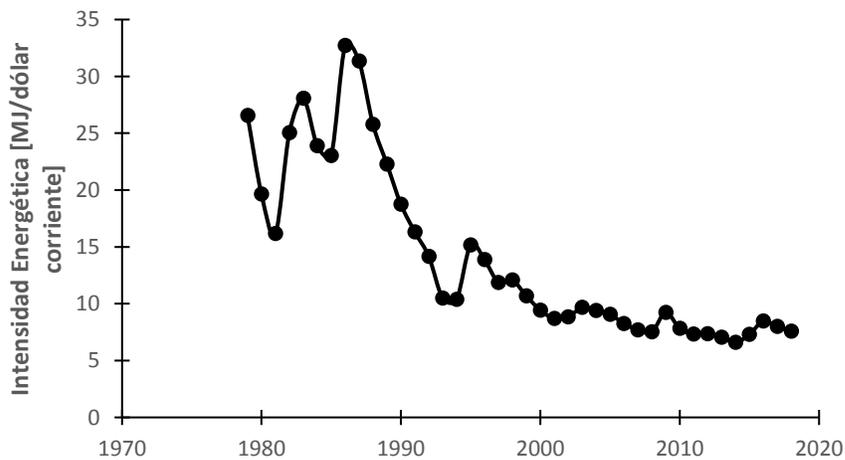


Figura III-20 Intensidad Energética en México 1979-2018. Elaborado con datos de [61] [141].

Los precios del barril de petróleo se toman de los anuarios estadísticos de PEMEX y de la base de datos de SENER [108] [141] reportados como el precio promedio del barril de exportación en dólares por barril, todos ellos sin correcciones por inflación. La tendencia en los precios del crudo se puede apreciar en la Figura III-21.

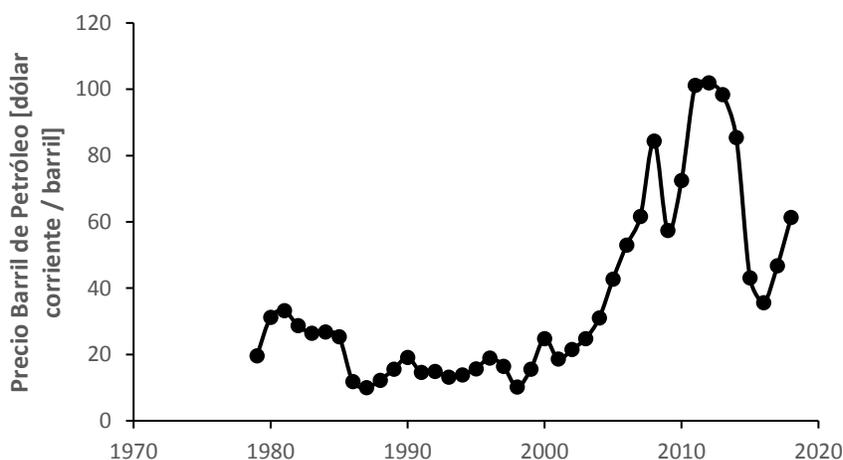


Figura III-21 Precio Promedio del Barril de Petróleo 1979-2018. Elaborado con datos de [108] [141].

3.3.2 Metodología

El índice de retorno energético se calcula de acuerdo con la ecuación (III-6) donde $E_{o,t}$ se refiere a la energía recuperada a través de la extracción del petróleo y $E_{e,t}$ representa el consumo energético asociado a dichas actividades.

$$IRE_t = \frac{E_{o,t}}{E_{e,t}} \quad (III-6)$$

Para calcular el término E_o presente en el numerador que define al IRE se hace uso del equivalente energético de un barril de petróleo θ y la cantidad total N de barriles extraídos a lo largo de un año de actividades, en este caso se ha considerado un valor de 6.11 giga joules por cada barril de crudo aunque se debe resaltar que esto solo representa una aproximación ya que la cifra real cambia de acuerdo a la composición química del

crudo. Finalmente la cantidad total de energía recuperada por los procesos de extracción queda definida como $E_o = N \cdot \theta$. Por otro lado, la energía empleada E_e durante la obtención del petróleo se aproxima haciendo uso de la intensidad energética de la economía nacional. De nueva cuenta, si N es la cantidad total de barriles extraídos y p el precio promedio de cada barril, entonces es posible argumentar que dicho volumen de petróleo puede, potencialmente, generar una cantidad monetaria equivalente al producto de estos términos. Si la intensidad energética define la cantidad promedio de energía que se debe consumir dentro de una economía para generar una unidad monetaria dentro de la misma, el consumo de energía asociado a la extracción de petróleo se puede obtener como $E_e = N \cdot p \cdot i$. Sustituyendo estos resultados en la ecuación (III-6) se deduce que el IRE puede calcularse de forma sencilla siguiendo la ecuación (III-7).

$$IRE_t = \frac{\theta}{p_t \cdot i_t} \quad (III-7)$$

3.3.3 Resultados

En la Figura III-22 se presentan los resultados obtenidos para el cálculo del IRE de acuerdo a lo descrito en la sección de metodología, se ha ajustado una línea de tendencia considerando una media móvil con un periodo de 5 años con la finalidad de suavizar un poco el comportamiento que se presenta. Se observan dos tendencias generales, la primera de ellas se muestra positiva durante el periodo que va de 1979 al 2001 pasando de un valor de 11.7 a uno de 37.7 entre el inicio y final de este intervalo. Por otro lado entre los años 2001 y 2018 el indicador presenta una disminución al posicionarse en un valor de 13 hacia el final del intervalo. A partir de la tendencia que muestran los precios del crudo este comportamiento en el IRE significaría que la disminución que ocurre en los primeros entre 1979 y 2001 obligaría a que las actividades de extracción de petróleo se mudaran hacia aquellos recursos que cuentan con mejor retorno energético. A su vez el incremento general que se observa en los precios promedios desde 2001 y hasta 2014 habría

permitido la implementación de técnicas más intensivas energéticamente hablando o la explotación de recursos de menor calidad en cuanto a su IRE se refiere. Este último punto debe ser claro, el IRE que aquí se obtiene no es necesariamente el asociado al recurso físico real, y, en la opinión del autor de este trabajo solo debe interpretarse como el posible camino que el indicador pudo haber seguido durante el periodo estudiado.

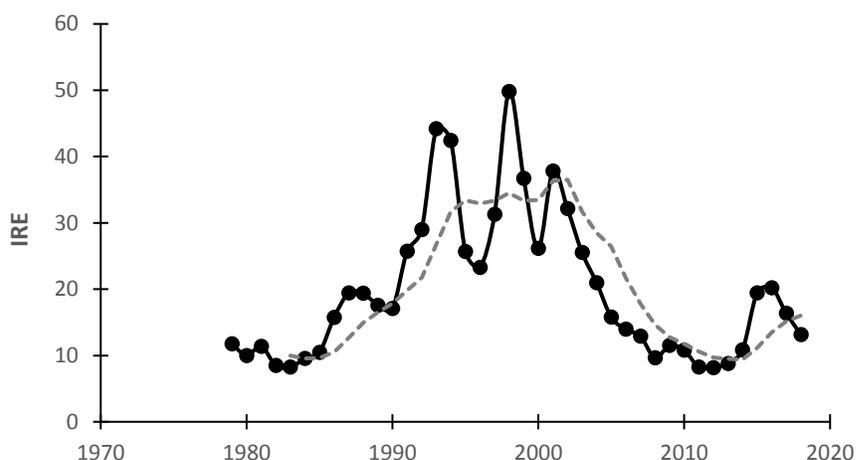


Figura III-22 IRE para la extracción de petróleo en México basado en el precios promedio de barril 1979-2018.

La magnitud de los IRE obtenidos aquí es menor que los encontrados en las dos secciones anteriores, este hecho estaría en correspondencia con lo teorizado respecto a la consumo energético que se considera en esta sección, el cual se esperaba que al estar construido a partir del precio del crudo tuviera en cuenta no solo los costos energéticos directos, sino también los asociados a el uso de materiales, infraestructura y pago de salarios.

Como punto final de esta sección se calcula el IRE asociado a los proyectos de aguas profundas del Golfo de México partiendo del precio promedio de crudo, estimado por encima de 90 dólares, que estos necesitan para ser rentables y la intensidad energética de la economía calculada para el año 2018. A partir de esta información y la ecuación (III-7) se obtiene que el IRE de estos proyectos es de 8.9, este resultado se encuentra

dentro de los rangos reportados previamente para este tipo de recurso pero dentro de los límites geográficos de Estados Unidos (ver sección 2.2.2).

3.4. Cálculo del Índice de Retorno Energético en el periodo 1938-2010 Mediante Gasto en Petrolíferos

El gasto en energía, también llamado costo de la energía, se refiere a la cantidad de dinero que se desembolsa para pagar por la energía que una economía consume y usualmente se expresa como una fracción del producto interno bruto [60]. Distintos autores han señalado que por lo general existe una relación inversa entre el gasto en energía y la tasa anual de variación en el PIB, esto es, cuando el primero de ellos crece el segundo disminuye, e incluso, en algunos casos presenta recesiones (ver sección 1.7.5). Como una explicación al mecanismo que actúa detrás de este fenómeno algunos autores (ver sección 1.7.5) han propuesto que cuando se presenta un incremento en los precios de la energía, los consumidores dentro de una economía tienden a reducir su gasto en actividades no esenciales ya que ahora tienen que dedicar una mayor parte de sus ingresos en adquirir la energía que consumen además de pagar por bienes y servicios básicos más caros ya que por lo general el incremento en el precio de la energía también incrementa el precio de todos los otros productos dentro de una economía (ver Figura I-27), lo anterior resulta en una disminución general de la actividad económica.

En la sección 1.7.2 del presente trabajo se ha deducido una formulación matemática que relaciona de forma explícita al gasto en energía visto como una fracción del PIB y el IRE una sociedad, aquí se utilizara el mismo procedimiento para estudiar el IRE asociado al gas y petrolíferos que se consumen dentro del territorio nacional. Para conseguir lo anterior se requiere información relacionada al gasto monetario nacional que se hace en gas y petrolíferos además de conocer la participación que tienen estos productos dentro del consumo nacional de energía. Lo primero ha sido aproximado utilizando el valor de las ventas internas de PEMEX, dichas ventas solo representan el valor monetario facturado a los distribuidores y no el gasto real que los usuarios finales hacen para adquirir la energía,

en un intento por solventar este hecho se han utilizado el precio final promedio a consumidor, que sí incluye impuestos, junto con los volúmenes de algunos petrolíferos seleccionados, de tal forma que se pueda estimar un valor más cercano al gasto real que se hace en petrolíferos.

Al igual que como se ha señalado en la sección 3.3, al trabajar con el valor monetario de los energéticos se espera que el IRE obtenido considere el consumo energético que se dedica de forma directa a la recuperación y proceso de la energía así como el asociado a todos los materiales, infraestructura y sustento de los trabajadores. Por otro lado, ya que el precio utilizado se refiere al de productos refinados y terminados entonces el IRE obtenido aquí extiende los límites de estudio hasta la etapa de refinación y distribución y podría considerarse equivalente al $EROI_{2,lab}$ de la Tabla I-1.

3.4.1 Fuentes de Información y Preparación de Datos

La información necesaria para poder construir los datos sobre el gasto nacional en energía proviene de los Anuarios Estadísticos de PEMEX [108] y las series históricas para el PIB de la economía nacional recopiladas y trabajadas por Aparicio [142], trabajo que cubre un periodo de poco más de 100 años al incluir datos que van desde el año 1900 y hasta el 2010.

En lo que se refiere exclusivamente al gasto en energía se han tenido en cuenta dos enfoques distintos, en el primero de ellos se ha utilizado la información sobre las ventas internas de gas y petrolíferos, reportadas por PEMEX desde el año 1938, como un proxy del gasto nacional en este tipo de recursos energéticos. De acuerdo a PEMEX estos datos se refieren al valor facturado a los distribuidores nacionales excluyendo impuestos. Simbólicamente este hecho puede representarse como: $G_t \approx \$_{ventas\ internas}$ en donde G_t se refiere al gasto monetario en gas y petrolíferos. Por lo mencionado anteriormente debe ser claro que este gasto no representa el gasto total real que el usuario final hace para tener acceso al gas y a los derivados del petróleo, en un intento por remediar este hecho se ha realizado una segunda aproximación pero esta vez teniendo en cuenta los precios promedio al consumidor final, que sí incluyen impuestos, y el volumen de los petrolíferos

vendidos dentro del país. Dentro de este segundo enfoque solo se han considerado tres tipos de combustible que son: gasolina, diésel y combustóleo; esta decisión se ha tomado debido a que la gran mayoría de los datos no se encuentra dentro de una base digitalizada y por tanto se ha requerido realizar una captura manual de la información abarcando un periodo que va de 1938 a 2010. La construcción matemática para este segundo caso se puede expresar con la ecuación (III-8), donde $\bar{p}_{i,t}$ es el promedio aritmético del precio final al consumidor de cada una de las distintas presentaciones (e.g. combustóleo ligero y pesado) de los petrolíferos que se tienen en cuenta. Por otro lado $V_{i,t}$ se refiere al volumen total del petrolífero vendido dentro del país, en los reportes de PEMEX es posible encontrar el volumen total de combustibles vendidos dentro del territorio nacional ya sea etiquetado por categoría, o presentación, (e.g. barriles de gasolina magna y barriles de gasolina premium) o bajo un nombre genérico (e.g. volumen de gasolinas, diésel y combustóleo), el volumen $V_{i,t}$ se refiere a este último caso.

$$G_t = \sum_{i=1}^3 \bar{p}_{i,t} \cdot V_{i,t} \quad (\text{III-8})$$

Una vez que se cuenta con la cantidad total de dinero que fue destinada por la sociedad para hacerse del gas y petrolíferos consumidos entonces esta se puede comparar contra el producto interno bruto de la economía y así obtener el gasto en energía visto como una fracción del PIB. La expresión (III-9) representa este hecho.

$$f_t = \frac{G_t}{PIB_t} \quad (\text{III-9})$$

En la Figura III-23 se presentan las tendencias de los resultados obtenidos para el gasto nacional en energía, específicamente en gas y petrolíferos, visto como una fracción del PIB, aquí se pueden distinguir con claridad dos periodos con características diferentes,

el primero de ellos ocurre entre 1938 y 1981 y el segundo entre 1982 y 2010, a lo largo del primer intervalo se observa un nivel de gasto en energía relativamente bajo y estable, mientras que en el segundo es clara y marcada una tendencia creciente en el indicador con algunos incrementos abruptos. Para el caso en el que se han considerado las ventas internas como un proxy del gasto nacional en gas y petrolíferos se tiene un valor promedio para la fracción f de 2.5 y 4% para el primer y segundo intervalo respectivamente. En cuanto a la construcción hecha a partir de los precios finales a consumidor estos valores son de 2.4 y 5.6%. Vale la pena mencionar que en lo que se refiere a la tasa anual de variación en el PIB, durante 1938 y 1981 esta se encuentra, en promedio, alrededor del 6%, mientras que durante el segundo intervalo, esto es entre 1982 y 2010, su valor promedio es de 1.9%. Este fenómeno coincide con lo que ha sido señalado dentro de la literatura especializada, esto es, que el incremento en el gasto en energía se encuentra asociado con una disminución en el crecimiento económico.

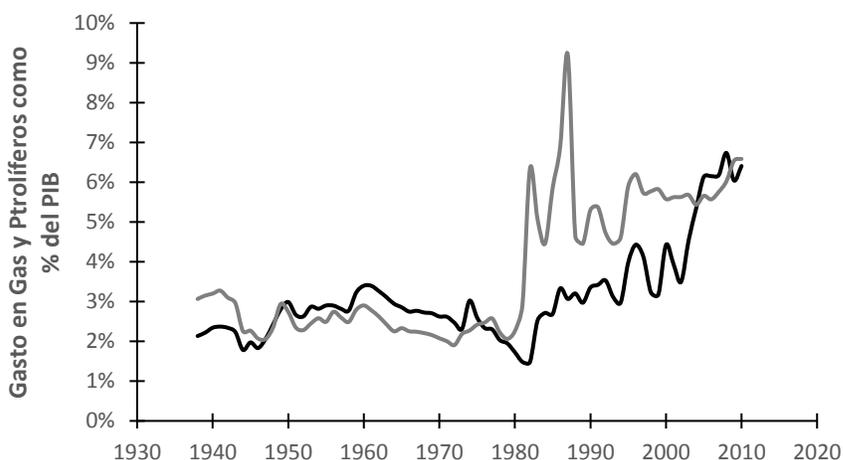


Figura III-23 Estimación del Gasto en Gas y Petrolíferos (línea gris exclusivamente gasto en gasolina, diésel y combustóleo) vistos como un porcentaje del PIB en México durante 1938-2010.

Otro parámetro importante para la construcción del IRE que se obtiene en esta sección es la fracción del consumo total de energía que ocurre en el país que se satisface con gas y derivados de petróleo. Este indicador se ha calculado a partir de la información

que se proporciona en la base de datos de SENER [141], dicha base comprende el periodo de 1965 a 2018 por lo que solo cubre una parte del intervalo que se puede estudiar con la información disponible sobre el gasto en energía. Con el objetivo de ampliar la información disponible se ha ajustado un modelo lineal simple a los datos para estimar la posible contribución en el pasado del gas y petrolíferos dentro del consumo nacional de energía.

De acuerdo a las tendencias obtenidas para la contribución del gas y petrolíferos dentro del consumo total de energía (ver Figura III-24 (a)), entre 1965 y 1982 dicha participación es creciente, el ajuste lineal a los datos comprendidos durante este intervalo arroja un coeficiente de determinación de 0.96 ($R^2 = 0.96$) (ver Figura III-24 (b)), suponiendo que esta evolución positiva también estuvo presente a lo largo de los 30 años precedentes, se utiliza el modelo lineal ajustado para hacer una estimación de la participación de los hidrocarburos en el consumo energético durante 1938 y 1964.

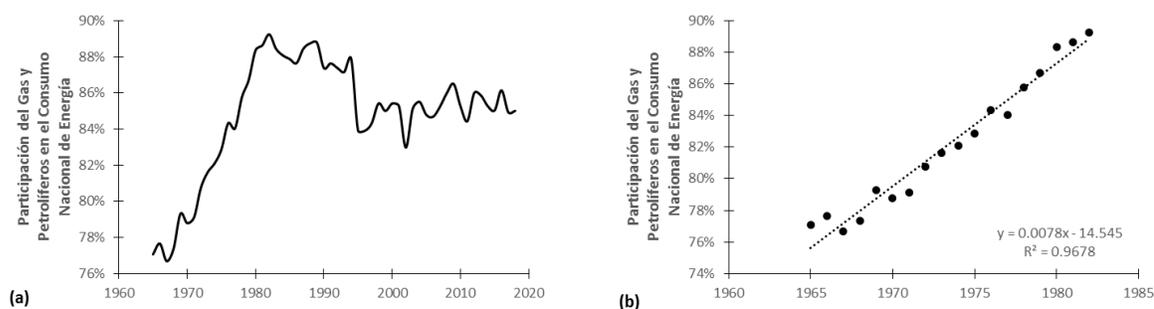


Figura III-24 (a) Participación del Gas y Petrolíferos en el consumo total de energía 1965-2010 y (b) Ajuste lineal a la participación del gas y petrolíferos 1965-1990. Elaborado con datos de [141].

Como se mencionó, el segundo enfoque para estimar el gasto en energía solo considera tres tipos de petrolíferos, dejando fuera al gas natural, es por ello que también se ha hecho necesario tener en cuenta la participación de los derivados del petróleo dentro del consumo nacional de energía. Las tendencias obtenidas para dicha participación se muestran en la Figura III-25 (a), de manera análoga se ha realizado un ajuste lineal al

intervalo entre 1965 y 1981 para estimar la participación en el pasado, este ajuste arroja un coeficiente de determinación de 0.72 ($R^2 = 0.72$) (ver Figura III-25 (b)).

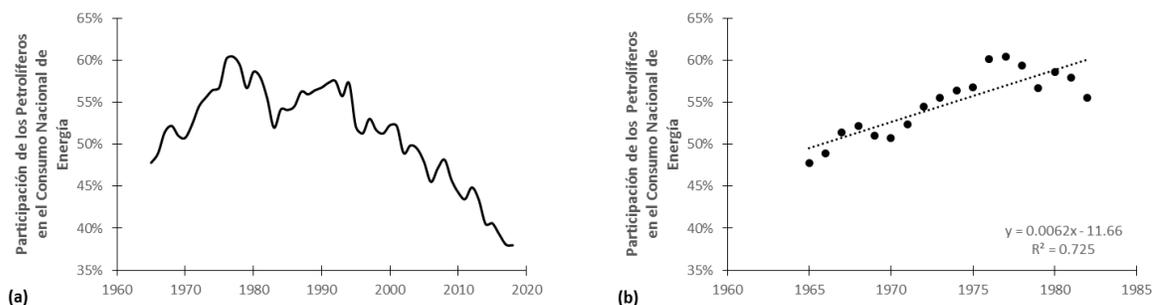


Figura III-25 (a) Participación de los Petrolíferos en el consumo total de energía 1965-2010 y (b) Ajuste lineal a la participación de los petrolíferos 1965-1990. Elaborado con datos de [141].

3.4.2 Metodología

Para obtener una relación que permita calcular el IRE asociado al gas y petrolíferos que se consumen en el país a partir del gasto monetario que se desembolsa en estos y de su participación dentro del consumo total de energía se partirá del supuesto de que el IRE de un recurso energético se puede describir mediante la ecuación (III-10) (ver su derivación en la sección 3.3) en donde θ_i y p_i representan el contenido energético y precio por cada unidad de recurso, mientras que \hat{t} se refiere a la intensidad energética de la economía.

$$IRE_i = \frac{\theta_i}{p_i \cdot \hat{t}} \quad (III-10)$$

Por otro lado, por definición, el IRE asociado a un conjunto de n productos o fuentes energéticas se refiere al cociente entre la cantidad total de energía que estos aportan y la energía que se debe invertir para obtenerlos. Matemáticamente esto puede expresarse de

acuerdo a la ecuación (III-11), en donde E_i se refiere a la cantidad de energía que aporta el recurso i , mientras que C_i representa la energía invertida para poder explotar dicho recurso. Además, aquí se está aprovechando el hecho de que para cada recurso i el consumo C_i puede expresarse como $C_i = E_i \cdot IRE_i^{-1}$, en donde IRE_i es el índice de retorno energético del recurso i .

$$IRE = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n C_i} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{IRE_i}} \quad (III-11)$$

Sustituyendo la expresión (III-10) en la ecuación anterior y aprovechando la definición habitual para la intensidad energética, esto es $\hat{i} = E_c \cdot PIB^{-1}$, donde E_c es el consumo nacional de energía y PIB el producto interno bruto de la economía, se obtiene lo siguiente:

$$IRE = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{E_i}{\theta_i}\right) \cdot p_i \cdot \hat{i}} = \frac{PIB}{E_c} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{E_i}{\theta_i}\right) \cdot p_i}$$

Por definición el cociente $\left(\frac{E_i}{\theta_i}\right)$ es igual a las unidades de masa o de volumen (e.g. barriles, pies cúbicos, toneladas) N_i del recurso energético i , el producto entre esta cantidad y el precio por unidad de recurso p_i define el gasto monetario G realizado para adquirir el energético:

$$IRE = \frac{PIB}{E_c} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n N_i \cdot p_i} = \frac{PIB}{E_c} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{G}$$

En nuestro caso la suma $\sum_{i=1}^n E_i$ presente en la expresión anterior representa la cantidad de energía que se obtiene del gas y petrolíferos que se consumen dentro del territorio nacional, y por tanto, la división de esta entre el consumo total de energía define la participación de los hidrocarburos dentro de la matriz energética del país, denotaremos dicha participación como por el termino e_t . Por otro lado, el cociente entre el *PIB* y el gasto en energía G constituye el inverso de la ecuación (III-9) que define al gasto en energía visto como una fracción del producto interno bruto y se denota por f_t . Teniendo estas observaciones presentes el IRE asociado al gas y petrolíferos que se consumen en México queda definido de acuerdo a la ecuación (III-12).

$$IRE_t = \frac{e_t}{f_t} \tag{III-12}$$

3.4.3 Resultados

Los resultados obtenidos para el IRE asociado al gas y petrolíferos que se consumen en México se muestran en la Figura III-26, de acuerdo a los mismos el IRE habría pasado de un valor de 26.7 en 1938 a un máximo de 60.2 en 1982, para posteriormente sostener una tendencia general negativa alcanzando un valor de 13.3 en el año 2010. El comportamiento anterior confirma la teoría de que el IRE tiende a exhibir una evolución en forma de campana alcanzando su punto máximo antes de que ocurra el auge en la recuperación de energía. Al igual que los resultados obtenidos en las secciones anteriores aquí se observa una tendencia negativa desde comienzos del siglo XXI.

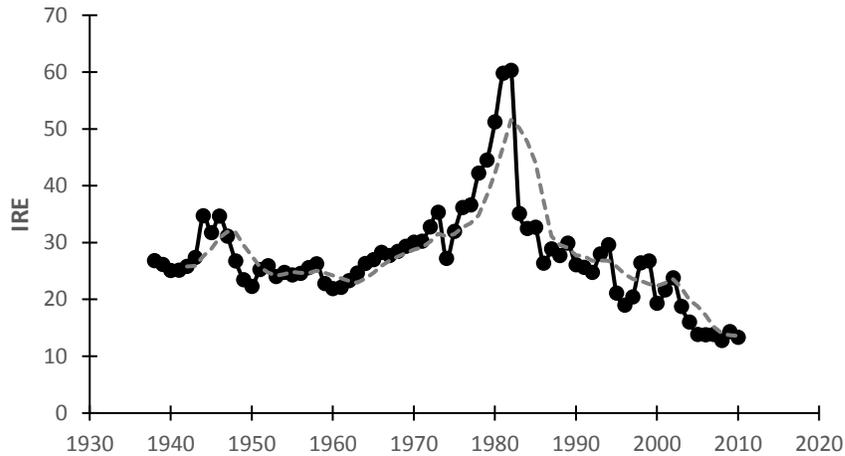


Figura III-26 IRE para el Gas y Petrolíferos que se consumen en México calculado a partir de las ventas internas de PEMEX como proxy del gasto monetario realizado en estos productos energéticos durante 1938-2010.

Los resultados obtenidos para el IRE cuando se ha utilizado únicamente el gasto en petrolíferos construido a partir del precio promedio al consumidor se muestra en la Figura III-27. Al igual que en el caso anterior se aprecia una tendencia positiva durante las primeras cuatro décadas en la que se estudia el indicador, el cual pasa de 11.6 en 1938 a un máximo de 28.6 en 1972, presentando una caída abrupta en 1982 al posicionarse en 8.7, a partir de este punto se exhibe una tendencia general negativa alcanzado un valor de 6.7 en el año 2010. De nueva cuenta se aprecia un comportamiento con forma de campana y resalta el hecho de que la magnitud de los valores obtenidos aquí es similares a las calculadas en las secciones anteriores para la etapa de refinación.

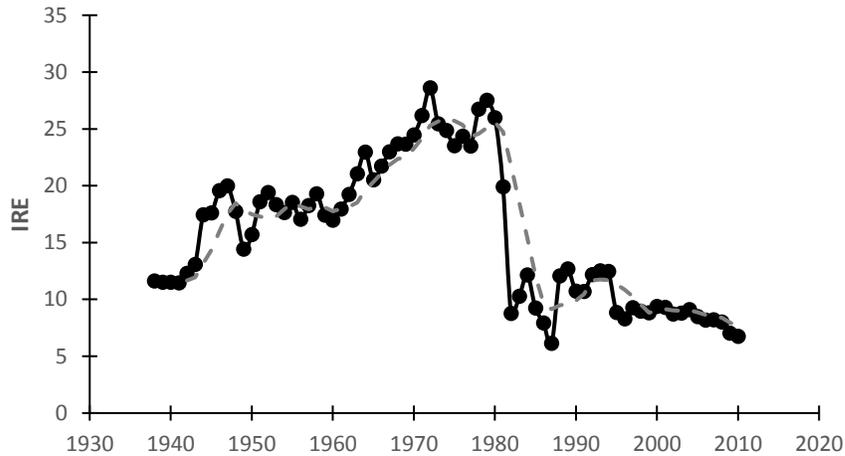


Figura III-27 IRE para los Petrolíferos que se consumen en México calculado a partir del gasto monetario, construido a partir del precio promedio al consumidor y los volúmenes consumados, realizado en estos productos energéticos durante 1938-2010.

3.5. Cálculo del Índice de Retorno Energético en el periodo 1938-2014 Mediante un Modelo Lineal de Múltiples Variables para Estimar el Consumo Directo de Energía

Durante el análisis de los datos de consumo energético directo, reportados por PEMEX [107] y utilizados en la sección 3.1 para calcular el IRE asociado a las actividades de extracción de hidrocarburos en el país, se encontró que existe una correlación lineal significativa entre estos y otros indicadores petroleros como lo son: el número de campos y pozos en producción y la cantidad de pozos y kilómetros perforados. En la Tabla III-12 se presentan los coeficientes de correlación lineal que existen entre dichas variables durante el periodo de 1999 a 2014. Esta relación parece lógica si se tiene presente que mantener más y más campos, o pozos, en producción debe resultar en un incremento en el consumo de energía que es necesario realizar para mantener las actividades de operación y proceso de los hidrocarburos que se obtienen de los mismos. Por otro lado, incrementar 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 sea mayor conforme la profundidad de los pozos perforados aumente.

Tabla III-12 Coeficientes de correlación lineal entre el consumo directo de energía asociado a las actividades de extracción de hidrocarburos y distintos indicadores petroleros durante 1999-2014.

Variables	Coeficiente de Correlación
C-Kilómetros perforados	0.46
C-Pozos perforados	0.55
C-Pozos en producción	0.84
C-Campos en Producción	0.85

En esta sección se ha buscado aprovechar la existencia de esta relación para construir un modelo lineal de múltiples variables que permita estimar el consumo energético directo que pudo haber tenido en el pasado la extracción de hidrocarburos en México, esto último haciendo uso de los registros que PEMEX mantiene desde 1938 para los distintos indicadores petroleros mencionados. Al combinar esta estimación del consumo energético junto con la referente a la energía recuperada a través de los hidrocarburos extraídos se logra calcular el IRE asociado a las actividades de extracción durante el periodo de 1938 a 2014.

3.5.1 Fuentes de Información y Preparación de Datos

Toda la información que ha sido utilizada en esta sección se ha tomado de los Anuarios Estadísticos de PEMEX [108]. En lo referente a la recuperación de energía se han utilizado los datos sobre producción total de hidrocarburos reportados en millones de barriles de petróleo crudo equivalente y por lo tanto no requieren de ninguna modificación.

3.5.2 Metodología

Matemáticamente el modelo lineal utilizado para obtener el consumo energético directo realizado por las actividades de extracción de hidrocarburos se expresa de acuerdo a la ecuación (III-13). En esta ecuación $N_{km,t}$ y $N_{pp,t}$ denotan la cantidad de kilómetros y pozos perforados durante el año t , mientras que $N_{Ce,t}$ y $N_{Pe,t}$ representan, respectivamente,

el número de campos y pozos en bajo explotación. Los términos α_i son los coeficientes lineales para cada una de las variables independientes.

$$C_t = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot N_{km,t} + \alpha_3 N_{pe,t} + \alpha_4 N_{ce,t} + \alpha_5 N_{pp,t} \quad (\text{III-13})$$

Al realizar la regresión lineal, utilizando los datos de consumo de energía reportados por PEMEX y correspondientes a cada uno de los indicadores petroleros reportados durante el periodo de 1999-2014 y el modelo que describe la ecuación anterior se han tenido en cuenta dos casos, en el primero de ellos se considera que $\alpha_1 \neq 0$ y en el segundo que $\alpha_1 = 0$. Los resultados obtenidos para cada modelo se muestran en la Tabla III-13 y la Tabla III-14. Basado en estos resultados se puede determinar que en general ambos modelos son significativos, y por tanto explican parcialmente el fenómeno, al obtenerse en ambos casos un Valor crítico de $F < 0.05$ que por lo general es el límite tolerable, sin embargo, cuando se observa el desempeño individual de cada una de las variables involucradas se aprecia que en el caso en el que se considera $\alpha_1 \neq 0$, tres de las variables no resultan significativas ya que su Probabilidad es mayor que 0.05, por otro lado, para el modelo con $\alpha_1 = 0$ se tiene que todas las variables se encuentran dentro del rango tolerable y por tanto contribuyen a la explicación del consumo energético. Además de lo anterior, se tiene que tanto el valor R cuadrado, como el R cuadrado ajustado, son mayores para el caso en donde $\alpha_1 = 0$. A partir de estas observaciones se ha decide seleccionar el segundo modelo para obtener el consumo de energía.

Tabla III-13 Bondad de los casos considerados para el modelo de consumo energético.

	$\alpha_1 \neq 0$	$\alpha_1 = 0$
R²	0.83860674	0.996926664
R² ajustado	0.77991829	0.912824996
Error típico	1.80881032	1.965764848
F	14.2891259	973.1378392
Valor crítico de F	0.0002469	6.11656E-14

Tabla III-14 Resultados de la regresión lineal múltiple para el modelo de consumo energético.

	$\alpha_1 \neq 0$				$\alpha_1 = 0$			
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	14.9977	8.4197	1.7813	0.1025	0	-	-	-
$N_{km,t}$	-0.0118	0.0044	-2.6746	0.0216	-0.0107	0.0047	-2.2548	0.0436
$N_{Pe,t}$	0.0002	0.0010	0.2142	0.8343	-0.0013	0.0006	-2.3018	0.0401
$N_{Ce,t}$	0.0394	0.0394	0.9998	0.3389	0.1074	0.0107	10.0800	0.0000
$N_{Pp,t}$	0.0299	0.0110	2.7091	0.0203	0.0263	0.0118	2.2263	0.0459

Para obtener el IRE se ha utilizado la expresión (III-14), donde C_t es el consumo energético realizado durante el año t y calculado a partir de la ecuación (III-13) considerando el caso $\alpha_1 = 0$, mientras que P_t se refiere la producción total de hidrocarburos registrada durante el mismo año t.

$$IRE_t = \frac{P_t}{C_t} \quad (III-14)$$

3.5.3 Resultados

Los resultados obtenidos para el consumo de energía asociado a las actividades de extracción de hidrocarburos en México durante el periodo de 1938 a 2014 se muestran en la Figura III-28, aunque estos presentan cierta variabilidad, la tendencia general observada es un incremento progresivo en el consumo energético. Además de lo anterior se incluyen los datos de consumo reportados por PEMEX [107] para el periodo de 1999 a 2014.

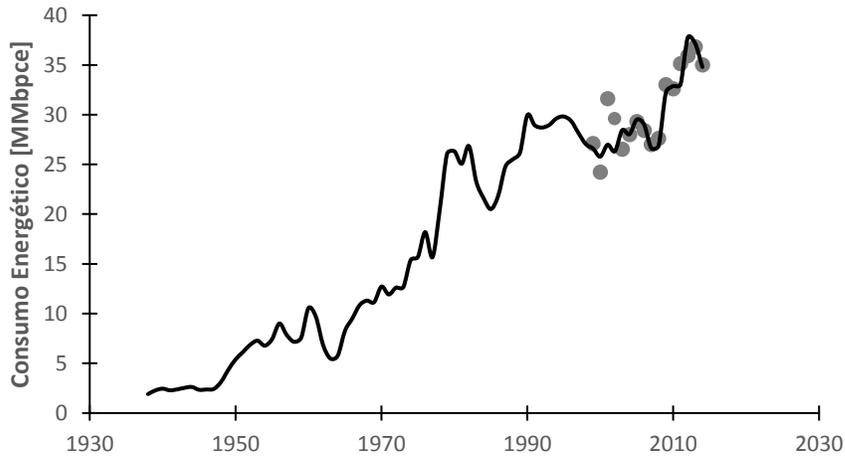


Figura III-28 Consumo Energético asociado a las actividades de extracción de hidrocarburos en México durante 1938-2014 (línea continua) calculado a partir del modelo lineal de múltiples variables y consumo energético asociado a las mismas reportado por PEMEX [107] para el periodo 1999-2014 (puntos).

Los resultados obtenidos para el IRE se muestran en la Figura III-29, de acuerdo a los mismos, el indicador muestra una tendencia general positiva durante el periodo que va de 1938 a 1985 al pasar de un valor de 23 a un máximo global de 64 entre el principio y final del intervalo, dentro de este mismo periodo se observa un incremento acelerado entre los años 1979 y 1985, teniendo en cuenta que el IRE global de un sistema energético resulta ser un promedio ponderado de los subsistemas que lo componen, es posible que esta evolución se deba a la incorporación de la producción proveniente del campo Cantarell, dicho de otra manera, conforme la participación de este campo en la producción nacional fue incrementando el IRE de la extracción de hidrocarburos en México se fue acercando al índice de retorno energético particular de las actividades en Cantarell, de hecho, de acuerdo al trabajo de Tripathi y Brandt [118], durante 1970 y 1985 el IRE para la extracción de hidrocarburos en Cantarell se encontraba alrededor de 70 (ver Figura III-2). Después de 1985 se puede hablar de una tendencia general negativa, aunque entre los años 1995 y 2007 parece existir una ligera recuperación. Finalmente se destacará el hecho de que durante los años 1979 y 2014 el comportamiento general del IRE calculado en esta sección muestra una forma de U invertida, este mismo fenómeno se observa en el IRE calculado en la sección 3.3 a partir del precio promedio del barril de petróleo.

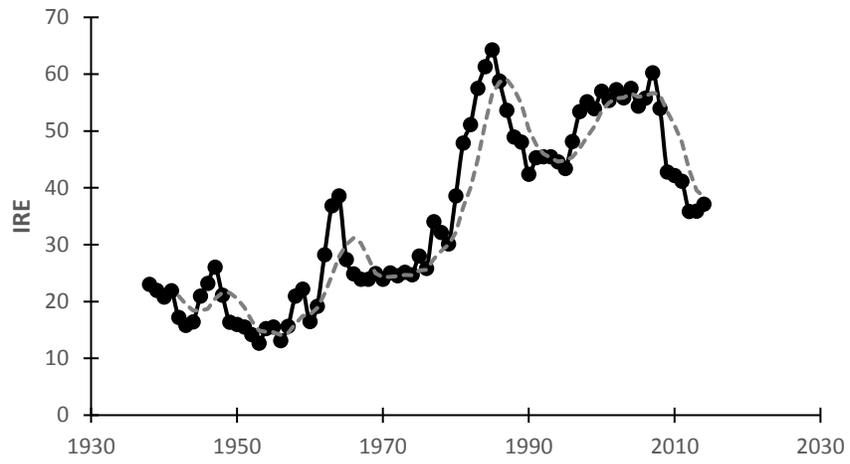


Figura III-29 IRE para la extracción de petróleo y gas en México durante el periodo de 1938-2014. La línea punteada es una media móvil sobre un periodo de 5 años.

CAPÍTULO IV - Algunas Implicaciones para la Economía Nacional

Introducción

Los resultados obtenidos en el capítulo anterior confirman el hecho de que el IRE de los recursos petroleros, que se extraen y consumen dentro del territorio mexicano, está disminuyendo, en este apartado se tratará de vislumbrar los posibles efectos que este hecho puede tener para la economía nacional. Primero se revisarán las relaciones entre el consumo de energía, el precio de la energía, el gasto monetario en energía con la economía mexicana. Posteriormente partiendo del conocimiento sobre la relación que guardan estas mismas variables pero con el IRE se inferirán los efectos potenciales que puede tener la caída de este indicador.

El argumento a defender es que la energía abundante y barata constituye un binomio, sin el cual no es posible mantener una dinámica de crecimiento económico continuo, la disminución en el IRE, junto con la caída en la producción de petróleo y gas son un claro indicador de que en México, así como en el resto del mundo, la era del petróleo abundante y barato ha llegado a su fin, comprometiendo con ello la existencia de los dos factores que han resultado clave para el modelo de desarrollo económico y social basado en el uso de recursos fósiles.

Al intentar defender el argumento de que la energía barata y abundante es un recurso vital para el buen funcionamiento de las economías, el caso nacional se presenta como un verdadero reto al mostrar una aparente paradoja, esto es último es debido a que la era de mayor abundancia petrolera en México también coincide con una era de bajo desempeño económico, siendo este hecho un punto que requiere de alguna explicación. Como se verá, la solución a esta cuestión parece encontrarse en las políticas fiscales seguidas en nuestro país a lo largo de los últimos dos siglos, ya que el efecto neto de su implementación a lo ha sido un encarecimiento artificial de los combustibles fósiles que se consumen en la economía. De esta manera, aunque en México se disfrutaba de una gran abundancia de energía fósil, en gran medida gracias al campo gigante Cantarell, la carga impositiva a los

derivados del petróleo terminaba por crear una situación en la que aparentemente la energía era cara. Partiendo de lo anterior todo indica que no hay manera de sostener que los límites al crecimiento económico en México a lo largo de las últimas cuatro décadas hayan sido de una naturaleza física sino más bien tienen que ver con las políticas y estrategias tanto económicas como fiscales seguidas en el país, las cuales transformaron al petróleo y a sus derivados de una fuente de energía a una fuente de ingresos para el Estado. Contrario a lo anterior, la realidad actual es muy distinta pues ahora la naturaleza física de los recursos petroleros que explotamos y de los que quedan por explotar hacen de ellos recursos costosos, esto es, ya no se requiere de la aplicación de impuestos para encarecerlos, de hecho, podría ser que ocurriera todo lo contrario e incluso fuera necesario subsidiarlos para evitar repercusiones importantes sobre los consumidores. Lo anterior quiere decir que aunque hoy, basados en la experiencia acumulada, se consiguiera confeccionar las estrategias y políticas más efectivas sobre el cómo aprovechar los recursos fósiles que tenemos, la calidad de estos últimos, calidad medida a partir del costo energético de extraerles y procesarlos, ya no es la misma, el petróleo y gas que hoy se tiene y queda, aunque siguen constituyendo un recurso energético, distan mucho de ser parecidos a lo que se tuvo. El no tener presente el hecho de que la calidad, junto con otras características físicas y técnicas, entre los distintos recursos o fuentes de energía no es la misma, hace de cualquier plan de desarrollo energético u económico solo un conjunto de estrategias y recomendaciones vacías, ya que ignoran un elemento clave que se encuentra presente y operando en la realidad material sobre la cual pretenden intervenir.

4.1. Consumo de Energía y Crecimiento Económico en México

Todos los bienes y servicios que se producen, distribuyen y consumen dentro de una economía son producto de una inversión de energía realizada en algún momento del tiempo. Visto de esta manera es posible entender a las economías como un sistema que se encarga de explotar los recursos naturales disponibles en el ambiente creando a partir de ellos productos que sirven para satisfacer las necesidades humanas, en otras palabras, la economía, a través de distintas etapas, se encarga de realizar una recolección,

combinación, transformación y distribución no natural de la materia presente en el entorno para que esta sirva a los fines e intereses humanos, por supuesto, todos y cada uno de los procesos citados requieren del uso de energía. Siguiendo lo anterior y teniendo presente que el PIB, que en su definición más simple se refiere al valor monetario de la suma de todos los bienes y servicios que se crean dentro de una economía y que por tanto sirve como una medida del tamaño de la misma, resulta natural e intuitivo el hecho de que exista una relación positiva entre el consumo de energía, el tamaño y crecimiento de una economía representado por su PIB o en la variación anual de estas variables. Lo anterior es un hecho bien conocido y se ha comprobado que prevalece tanto entre las naciones, ricas y pobres, así como a lo largo del tiempo [68].

Como habría de esperarse, la economía mexicana no representa un caso extraordinario en cuanto a la relación que existe entre el consumo de energía y crecimiento económico. Sobre esta línea se tienen, por ejemplo, trabajos como el de Ramírez y Hall [130] quienes han reportado que históricamente ha existido una correlación estrecha entre la producción de petróleo crudo y el PIB de la economía nacional. Por otro lado, trabajos como el de Castañeda [143], quien ha realizado una reconstrucción histórica sobre el consumo de energía en México, aparentemente la única en su tipo hasta el momento, a lo largo de un periodo que abarca 135 años y los cuales corren de 1880 a 2015, dan cuenta de que el crecimiento económico, medido por PIB de la economía nacional, históricamente ha venido acompañado de un incremento en el uso de energía (ver Figura IV-1).

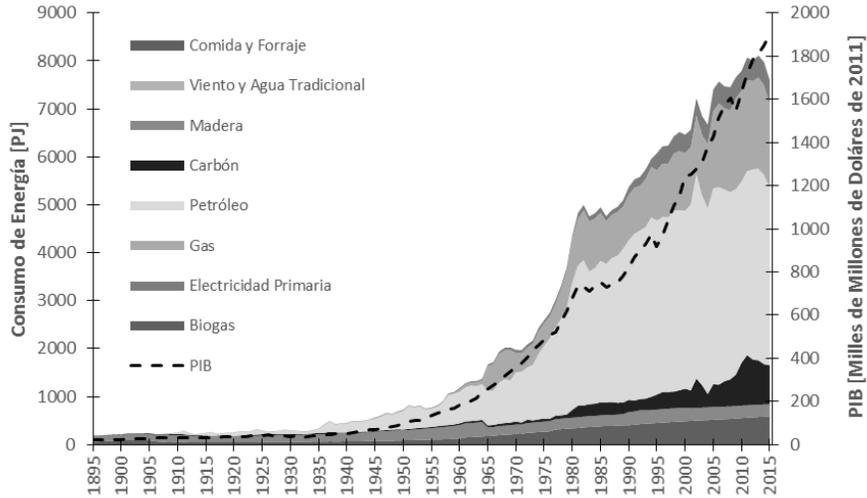


Figura IV-1 Evolución en el consumo de energía y el PIB en México durante 1895-2015. Elaborado con los datos de [143] [144].

Como se ha dicho, la energía que se empleada en todo proceso económico tiene la finalidad de brindar bienes y servicios que satisfagan las necesidades humanas y esto solo puede conseguirse explotando y transformando los recursos disponibles en el medio ambiente, es por lo anterior que no debe ser sorpresa que el crecimiento económico no solo viene de la mano de un aumento en el consumo de energía sino que también va acompañado de un incremento en el flujo de materiales que se explotan y consumen. El caso particular de México ha sido estudiado por Gonzalez-Martinez y Schandl [145] quienes han construido series históricas para la extracción, exportación, importación y consumo de materiales en el país para el periodo que va de 1970 a 2003, los materiales considerados en esta investigación incluyen: minerales de uso en construcción, minerales de uso industrial, minerales metálicos, biomasa (alimento, forraje, animales, madera, entre otras) y combustibles fósiles. De acuerdo a los resultados obtenidos, estos autores muestran que el consumo total de materiales en el país se ha triplicado a lo largo de las tres décadas estudiadas al pasar de un nivel de 370 millones de toneladas en 1970 a poco más de mil millones en 2003 (ver Figura IV-2).

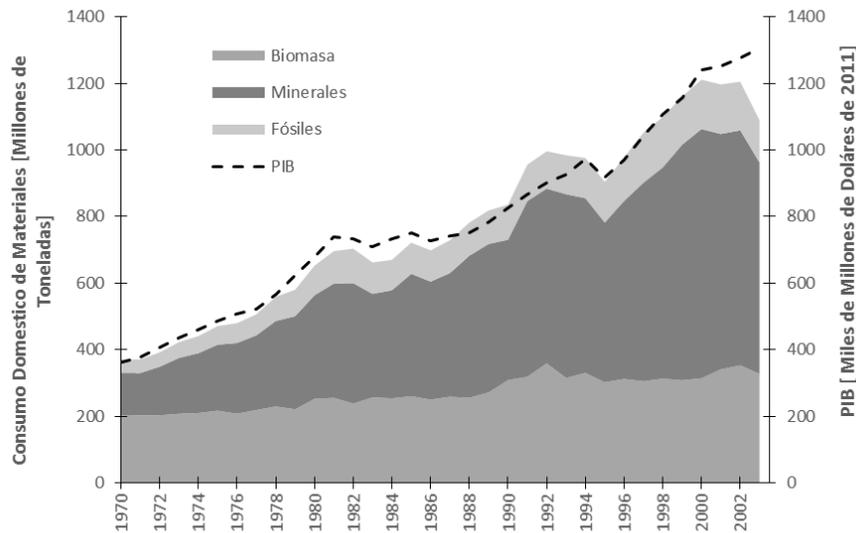


Figura IV-2 Evolución en el consumo de materiales y el PIB en México durante 1970-2003. Elaborado con los datos de [146] [144].

La Figura IV-3 presenta la estrecha correlación que existe entre el consumo de energía y el crecimiento económico, en este caso se han utilizado los datos de consumo de petróleo y gas natural debido a que cuando en México se habla de energía necesariamente se está hablando de combustibles fósiles, esto último debido a la gran dependencia que tiene la matriz energética nacional con respecto a este tipo de fuentes energéticas, solo por ilustrar lo anterior se puede mencionar que, de acuerdo a los datos de BP [32], durante el periodo que va de 1965 a 2018, en promedio, cerca del 88% del consumo total de energía primaria fue cubierto por estas fuentes. Al igual que en la Figura IV-1, la Figura IV-3 (a) muestra la relación positiva que históricamente ha existido entre el consumo de energía, en este caso petróleo y gas, y el crecimiento económico, dicha relación se hace aún más evidente cuando los datos sobre las tasas anuales de variación que presentan estas variables se comparan entre sí (ver Figura IV-3 (b)), al hacer este ejercicio es claro que los incrementos en la actividad económica se siguen de cerca con un aumento en el uso de energía. Finalmente si se comparan los datos sobre el PIB de la economía nacional contra los de consumo de petróleo y gas puede apreciarse que entre ellos existe una correlación lineal casi perfecta, el mejor ajuste lineal indica un coeficiente

de determinación del 0.97 (ver Figura IV-3 (c)). Como se ha dicho, estas relaciones no son producto de una coincidencia, la economía no produce cosas sino que las transforma, toma recursos naturales del medio ambiente y haciendo uso de la energía los convierte en bienes y servicios para el uso humano, generando a la par desperdicios, esto último quedando ilustrado en la Figura IV-3 (d). El crecimiento económico en México también ha resultado en un aumento en las emisiones de dióxido de carbono, una situación inescapable debido a la alta dependencia de los recursos fósiles que tiene la economía nacional.

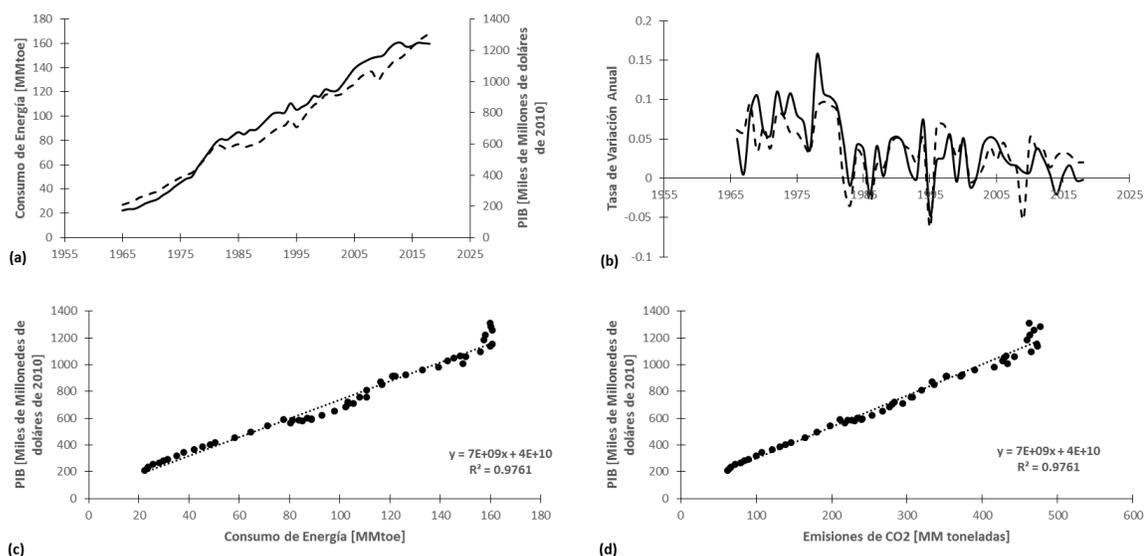


Figura IV-3 (a) Evolución en el consumo de petróleo y gas (línea sólida) y el PIB 1965-2018 (línea punteada), (b) tasas de variación anual en el consumo de petróleo y gas (línea sólida) y el PIB (línea punteada) 1965-2018, (c) PIB vs consumo de petróleo y gas 1965-2018, (d) PIB vs emisiones de dióxido de carbono 1965-2018. Elaborado con los datos de [32] [61].

Los datos históricos sobre la producción de petróleo y gas en México muestran que esta ya ha pasado su pico máximo de producción (ver Figura IV-4 (a)). En el caso del petróleo el valor máximo alcanzado fue de 3382 [Mbd] durante el año 2004, mientras que en lo que se refiere al gas, el pico de producción tuvo lugar en el año 2009 con un valor de 7030 [MMpcd]. Lo anterior también resulta cierto cuando se considera la producción total de hidrocarburos (petróleo, gas, líquidos del gas y condensados), que en el contexto

de este trabajo tiene un significado de máxima producción energética, con un valor máximo de 1618 [MMbpce] en el año 2009 (ver Figura IV-4 (b)). Si históricamente, a lo largo de los últimos 80 años, el crecimiento económico en el país ha ido ligado a un aumento en el consumo de energía, principalmente petróleo y gas, el pico en la producción de estos recursos representa un reto colosal para que el crecimiento basado en el uso de hidrocarburos pueda continuar.

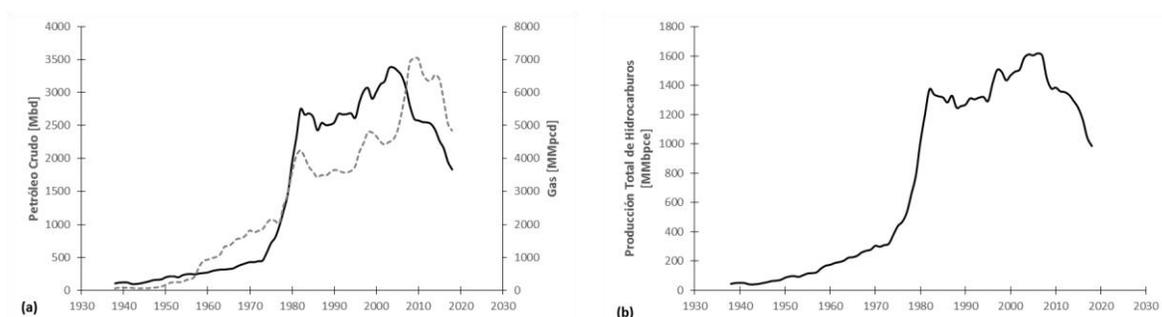


Figura IV-4 (a) Producción de Petróleo Crudo (línea continua) y Gas (línea punteada) en México 1938-2018. (b) Producción Total de Hidrocarburos (petróleo, gas, líquidos del gas y condensados) en México 1938-2018. Elaborado con los datos de [108] [141].

4.2. Precio de la Energía y Crecimiento Económico en México

La evidencia empírica ha mostrado de manera contundente que los precios altos de la energía están relacionados con un bajo desempeño económico. Por ejemplo, se ha mostrado que 10 de las últimas 11 recesiones que se han experimentado en los Estados Unidos desde la segunda guerra mundial han estado precedidas por incremento en los precios del petróleo [90], por otro lado, se ha dado evidencia de que toda vez que el precio del barril del petróleo estuvo por encima de 80 dólares (considerando valores ajustados por inflación a precios del 2008), durante el periodo de 1970 y 2007, la economía de los Estados Unidos ha experimentado sus mayores recesiones [91]. Investigaciones similares pero concentradas en otros países no parecen arrojar conclusiones diferentes (ver trabajos citados en [86]), el incremento en los precios de la energía afecta de forma negativa a las economías.

Como se ha mencionado antes, si los precios altos de la energía resultan perjudiciales para la economía, entonces, los precios bajos deben tener un efecto contrario, sin embargo, aunque esto último es cierto en gran medida, los precios bajos conducen a otra suerte de situaciones que no son menos problemáticas [92], entre ellas se puede mencionar que, cuando se trata de combustibles fósiles, los precios bajos motivan su consumo, lo cual facilita que se dé un proceso de expansión económica el cual involucra un mayor consumo de recursos naturales, un mayor impacto a los ecosistemas y puntualmente una mayor emisión de gases efecto invernadero. Por otro lado, la posibilidad de acceder a recursos fósiles baratos hace que otras fuentes de energía, como lo son las energías renovables, resulten menos competitivas, deprimiendo la inversión que se hace en ellas y con ello retrasando los procesos de una transición energética urgente. En pocas palabras se puede decir que la energía fósil barata permite que las economías funcionen de la misma manera en como lo han venido haciendo en los últimos 200 años, con todos sus beneficios pero también con todos sus contras.

Si bien los aspectos antes expuestos son de suma importancia, el punto más relevante para discusión que se quiere plantear aquí se encuentra en el cómo los precios bajos de la energía pueden terminar afectando al crecimiento económico en el mediano y largo plazo debido a los efectos que tienen sobre la disponibilidad futura de energía¹⁵. Lo anterior debido a que la reducción en los precios del hidrocarburo desmotivan la inversión en el desarrollo de nuevos recursos petroleros a la par de que motivan su consumo, lo cual, tiene la capacidad de crear situaciones de tensión potencial entre la oferta y la demanda del recurso, lo que a su vez puede desencadenar un aumento en los precios del petróleo trayendo consigo todos los efectos negativos para las economías que ya hemos comentado antes. La razón que explica el por qué los precios bajos de la energía conllevan efectos negativos para la industria energética se encuentra dentro de la naturaleza misma de la explotación de un recurso energético como lo es el gas y el petróleo, en donde

¹⁵ Ver sección 1.7.4 para una discusión más detallada sobre el cómo los precios bajos de la energía afectan la disponibilidad de energía.

conforme se avanza en su aprovechamiento inescapablemente tienen que enfrentarse costos de explotación crecientes.

Lo que debe tenerse claro es que la producción de petróleo y gas prosigue a la inversión, no se puede producir lo que no ha descubierto y no se puede utilizar el petróleo que no ha sido extraído, pero, una vez que la producción comienza esta tenderá a seguir una forma característica de campana en donde se tendrá un primer periodo de crecimiento, posteriormente se alcanzará un punto máximo de producción, que en efecto puede resumirse a un solo punto o puede extenderse durante algunos años, y finalmente, la producción entrará en un periodo de declinación, es precisamente este último aspecto el que más importa para el punto que se quiere señalar aquí, la producción de petróleo, provenga de donde provenga, tenderá natural y eventualmente a declinar con el paso del tiempo, por lo cual, mantener una producción creciente que sirva para satisfacer una demanda creciente, o incluso mantener un nivel constante de producción, requiere necesariamente del desarrollo continuo de nuevos recursos petroleros cuya producción sustituya y/o aumente aquella que eventualmente se va a ir perdiendo de los recursos anteriores. La disponibilidad de petróleo en el futuro queda en gran parte determinada por la inversión que se hace en el presente y es esta inversión la que se puede ver potencialmente afectada por la existencia de precios bajos del hidrocarburo, sobre todo cuando los recursos que quedan por desarrollar son de una naturaleza costosa.

La coexistencia de la incapacidad de las economías para tolerar y funcionar adecuadamente ante precios altos de la energía y la necesidad de mantener precios altos de la energía que sirvan para justificar la explotación de los recursos que aún quedan remanentes, crean una situación de inestabilidad económica que autores como Murphy y Hall [91] han denominado como “La paradoja del crecimiento” en donde la economía, en su búsqueda por el crecimiento, queda atrapada en un vaivén de expansiones y contracciones. En pocas palabras, mantener una dinámica de crecimiento económico requiere obtener energía de recursos que por su naturaleza necesitan de altos precios para ser explotados, eventualmente este incremento en los precios termina por disminuir o aniquilar el crecimiento alcanzado, con una depresión en la dinámica económica,

también se disminuiría la demanda de energía, disminuyendo con ello el precio de la energía, lo cual coloca a la economía de nuevo en condiciones para su reactivación y entrar en un nuevo ciclo.

En lo relativo a los precios de la energía la economía mexicana no se comporta de manera diferente a lo que ha sido observado y documentado en la literatura especializada para otras economías a nivel mundial. Los precios altos de la energía están relacionados con un bajo desempeño económico nacional, mientras que los precios bajos, si bien muestran una correlación positiva con el crecimiento económico, estos tienden a tener efectos negativos sobre la capacidad evolutiva de la industria energética, en este caso particular, de la industria petrolera en nuestro país.

4.2.1 Precios Altos

La economía mexicana constituye un caso verdaderamente representativo del como los altos precios de la energía pueden afectar de forma negativa el desempeño económico de una nación. La historia de México a lo largo de los últimos dos siglos puede dividirse en dos etapas bastante diferenciadas en lo que se refiere a precios de la energía y desempeño económico. La primera de ellas, que va desde la nacionalización de la industria petrolera en México, ocurrida en 1938, y hasta fines de los años 70 principios de los 80, está caracterizada por la existencia de precios de la energía bajos y altas tasas de crecimiento. En la segunda etapa, que va de principios de los 80 hasta la actualidad, ocurre todo lo contrario y se muestran altos precios de la energía que coinciden con un desempeño económico pobre.

Primera etapa: De 1938 a finales de los años 70 y principios de los 80

Las características a resaltar sobre esta primera etapa son, en primer lugar, la disponibilidad de cantidades suficientes, aunque no verdaderamente abundantes, de petróleo que permiten cubrir en gran medida las exigencias del mercado interno, a lo largo

de este primer periodo la producción de petróleo tiene como objetivo principal satisfacer las necesidades energéticas del país con productos energéticos a precios bajos, siendo esto último una política que eventualmente terminaría por limitar la capacidad expansiva de la empresa petrolera nacional PEMEX y que hacia principios de los años 70 haría de México un importador neto de petróleo (ver detalles sobre este caso en la siguiente sección). En segundo lugar se tiene que, al estar la producción de petróleo orientada hacia el mercado interno solo se enviaban al exterior los excedentes que llegaran a producirse, de esta manera se tiene que entre 1938 y 1976 las exportaciones de crudo solo representaban, en promedio, el 6% de la producción nacional (ver Figura IV-5 (b)). El tercer punto a destacar es que en aquel momento el uso que reciben los recursos fósiles que se explotan es casi exclusivamente como fuentes de energía y no como medios que permitan la captación de recursos económicos para el Estado, en este sentido se tiene que desde 1938 y hasta 1979 los ingresos petroleros representaron menos del 10% de los ingresos del gobierno federal (ver Figura IV-5 (a)). Finalmente se tiene que la firma característica del desempeño económico durante este periodo de energía barata son grandes tasas de crecimiento, con un valor promedio del 6% anual, estas tasas son las más altas registradas a lo largo de los últimos 80 años de historia (ver Figura IV-8 (a)).

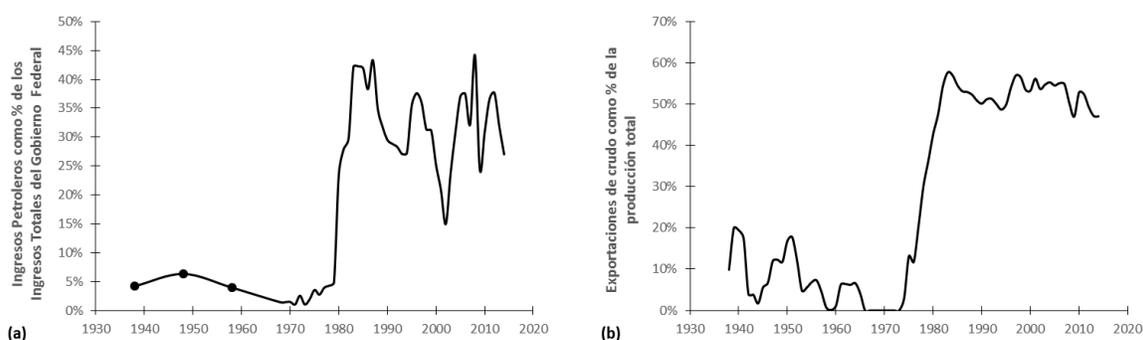


Figura IV-5 (a) Ingresos petroleros como % de los ingresos totales del Gobierno Federal y (b) Exportaciones de petróleo como % de la producción total. Elaborado con datos de [147] [148] [149] [108] [141].

Segunda etapa: De finales de los años 70 y principios de los 80 a la actualidad

Esta etapa es la de mayor abundancia petrolera que México ha disfrutado, como ejemplo de ello se tiene que de acuerdo a los datos que PEMEX [108] mantiene sobre la producción de petróleo y gas en el país, hasta 2014 la producción acumulada de hidrocarburos totales (petróleo, gas, líquidos del gas y condensados) era equivalente a 58816.4 [MMbpce], si para el año de 1980 esta cifra ascendía a 11397 [MMbpce] y la calculada para 1938 era equivalente a solo 1918 [MMbpce], se tiene que solo en los últimos 34 años del periodo que va de 1938 a 2014 se extrajeron el 83% de todos los hidrocarburos que se habían extraído hasta entonces (ver Figura IV-6). Otra forma de apreciar la gran abundancia petrolera de este periodo se consigue observando las tasas de producción tanto del petróleo como del gas, de esta manera se tiene que entre 1938 y 1980, en promedio, se producían 385 [Mbd] y 989 [MMpcd], de petróleo y gas, respectivamente, posteriormente para el periodo que va de 1981 a 2014, se tiene que para el caso del petróleo esta cifra era, en promedio, casi seis veces mayor al situarse en 2780 [Mbd], mientras que para el caso del gas se aprecia un incremento que es casi del cuádruple al posicionarse en 4660 [MMpcd].

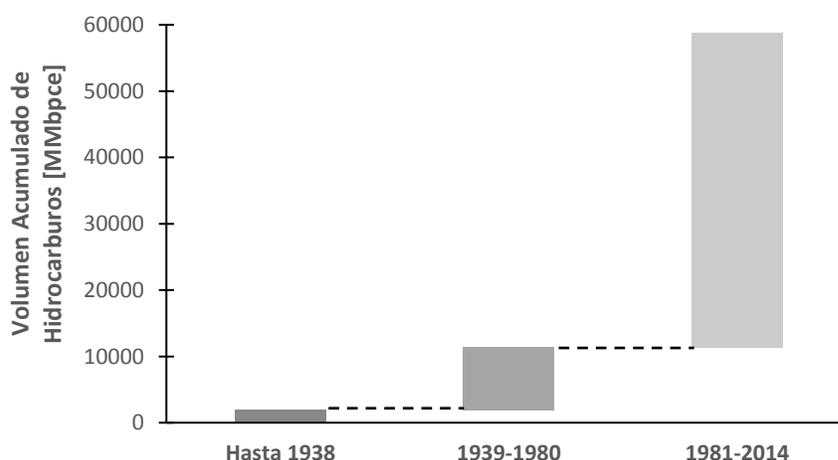


Figura IV-6 Producción acumulada de hidrocarburos entre 1938 y 2014. Elaborado con datos de [108].

En un contraste sumamente notorio con la riqueza y abundancia energética que hemos descrito, durante esta segunda etapa de la historia de México, la economía nacional muestra un desempeño que puede calificarse como de pobre cuando se le compara con la dinámica que se había mostrado en décadas anteriores. Mientras que a lo largo del periodo que va de 1938 a 1980 la tasa anual de variación en el PIB fue, en promedio, del 6%, para periodo de 1981 a 2010 solo se alcanza un 2% anual. Ante estos hechos parece surgir una suerte de paradoja ya que, si verdaderamente la energía constituye un elemento crítico y vital para el buen funcionamiento y evolución de las economías entonces deben encontrarse respuestas que puedan explicar el siguiente cuestionamiento: ¿Cómo es posible que la era de mayor abundancia energética en México también sea la era de peor desempeño económico?

Ante un fenómeno tan complejo como lo es una economía y su comportamiento, el cual depende de la interacción de una gran cantidad de elementos, individuos y situaciones tanto a nivel local como global, debe ser claro que no pueden existir, ni aceptarse, repuestas reduccionistas que apunten a un simple elemento aislado (como la energía) para explicar lo que en ella ocurre, sin embargo, en este trabajo se considera que dentro de un marco en el cual se acepte el rol fundamental que juega la energía para todo proceso económico un punto clave para poder comenzar a explicar el bajo desempeño económico de la economía nacional a lo largo de los últimos 40 años es la prevalencia de energía cara en nuestro país, esto último se encuentra en concordancia con lo que ha sido señalado en la literatura especializada, esto es, que el crecimiento y buen funcionamiento de las economías no solo requiere de cantidades crecientes de energía sino que también depende de que la energía sea barata. Cualquier intento por explicar el fenómeno económico mexicano de los últimos 40 años que no integre al factor energético dentro de sus variables explicativas estará condenado a limitar su capacidad de explicar y entender el objeto de estudio. En lo que sigue se dará evidencia que muestra como el periodo de mayor abundancia energética en México también es, paradójicamente, una era de energía costosa en donde pareciera que el petróleo deja de entenderse como una fuente de energía y más bien se emplea como un medio que permite al gobierno la captación de recursos económicos. La evidencia que se da en lo relativo a los precios de la energía y

el desempeño económico es de una naturaleza empírica y como tal solo apunta a una correlación entre las variables, es decir que, aunque los datos señalan de forma clara la existencia de una relación negativa entre los altos precios de la energía y el crecimiento económico, no es posible señalar el mecanismo preciso a través del cual ocurre la interacción entre estas variables, esto es, ¿los precios altos de la energía afectan principalmente los procesos de oferta o es a la demanda? Para el caso particular de los Estados Unidos tanto economistas como no economistas parecen coincidir en que el mecanismo principal a través del cual los precios de la energía afectan a la economía es a través de una reestructuración de la demanda [91] [102] [150], en resumen, cuando la energía se encarece los consumidores se ven obligados a pagar más por la energía que consumen así como por otros bienes y servicios básicos que también aumentan su precio, lo anterior los deja con una menor disposición de dinero gastar en otros bienes y servicios, principalmente de carácter discrecional, lo cual termina por provocar una menor actividad económica. Teniendo esto último en mente debe ser claro que el no poder contar con una explicación causal específica para el caso mexicano no constituye un argumento suficiente que permita pensar que la correlación negativa que existe entre los altos precios de la energía y el desempeño económico ocurra solo por casualidad, futuras investigaciones sobre el tema deberían estar enfocadas en intentar arrojar luz sobre los mecanismos de acción específicos del caso mexicano.

En lo relativo a los precios de la energía, durante esta segunda etapa se tiene que existe una situación de precios elevados de la energía, esto último ocurre no solo en relación a los antecedentes históricos del país sino que también en comparación con lo que ocurre con otras naciones. De acuerdo a los datos utilizados para elaborar la Figura IV-7 se puede decir que el precio promedio de la gasolina en México entre 1938 y 1980 era de 1.87 [dólares de 2018/galón] mientras que para el periodo de 1981 a 2018 el precio promedio asciende a 2.93 [dólares de 2018/galón], además destaca el hecho que durante el primer periodo se observa una tendencia a la baja en los precios de la gasolina mientras que en el segundo la tendencia es más bien positiva. Por otro lado, si se compara el precio de la gasolina en México contra los precios vigentes para este mismo producto pero en los Estados Unidos (ver Figura IV-7) también se verifica que en nuestro país este recurso

energético, en promedio, ha sido más caro, salvo algunos momentos de excepción, a lo largo de los últimos 40 años. Lo anterior puede apreciarse con claridad en la Figura IV-7 (b) en donde se ha calculado la relación de precios vigentes de la gasolina en México y los Estados Unidos, los valores mayores a la unidad indican que el precio en nuestro país es superior al que existe en el país vecino del norte, el caso contrario ocurre cuando este indicador se encuentra por debajo de ella. Como puede apreciarse desde 1938 y hasta finales de los años 70 los precios vigentes en nuestro país eran mucho menores a los existentes en Estados Unidos, sin embargo, desde finales de los 70 principios de los años 80 el caso contrario ha prevalecido. Otro aspecto interesante radica en el hecho de que en los Estados Unidos la tendencia general en los precios de la gasolina ha sido a la baja, por ejemplo, si calculamos el precio promedio para el periodo de 1938 a 1980 se obtiene un valor de 2.71 [dólares de 2018/galón], mientras que para el periodo de 1980 a 2018 este valor promedio se redujo a 2.37 [dólares de 2018/galón]. Lo anterior implica que, mientras que México se convertía en una potencia petrolera, los precios de la energía con la cual se alimentaba su mercado interno se encarecieron, por otro lado, a la par de que Estados Unidos se hacía aún más dependiente de las importaciones de petróleo para satisfacer su demanda interna el país disfrutaba de precios más bajos.

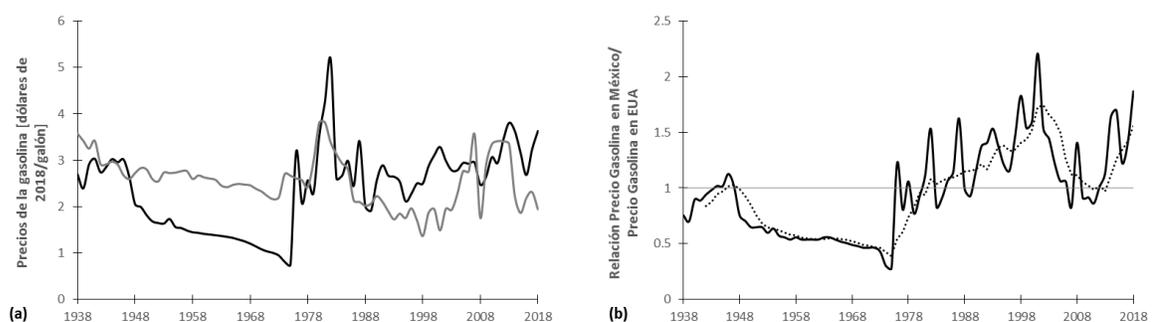


Figura IV-7 (a) Precios de la gasolina en México (línea negra) y Estados Unidos (línea gris) y (b) Relación entre los precios de la gasolina en México y Estados Unidos (línea continua) y promedio móvil sobre un periodo de 5 años. Elaborado con datos de [151].

Cuando esta situación de precios elevados de la energía se compara contra las tasas anuales de variación de PIB de la economía mexicana se hace evidente que entre ellas

existe una correlación negativa (ver Figura IV-8). En este caso particular se han utilizado el precio promedio del diésel y la gasolina en México, los resultados obtenidos muestran que durante el periodo de 1938 a 1980, la tendencia a la baja en el precio de estos energéticos se acompaña con altas tasas de crecimiento económico, como se ha mencionado, con un valor promedio del 6% anual. Por otro lado el periodo de 1980 a 2010, se muestra con tasas de crecimiento en el orden del 2% anual con una tendencia general en los precios que se exhibe creciente. Sumado a lo anterior también destaca que los puntos de contracción económica en México coincidan con los incrementos abruptos en los precios de los petrolíferos, situación similar a la que se ha descrito para los Estados Unidos pero en aquel caso haciendo referencia al precio del crudo. Finalmente en la Figura IV-8 (b) se puede apreciar que, en efecto, la pendiente del ajuste lineal entre los datos confirma la existencia de una relación negativa entre las variables.

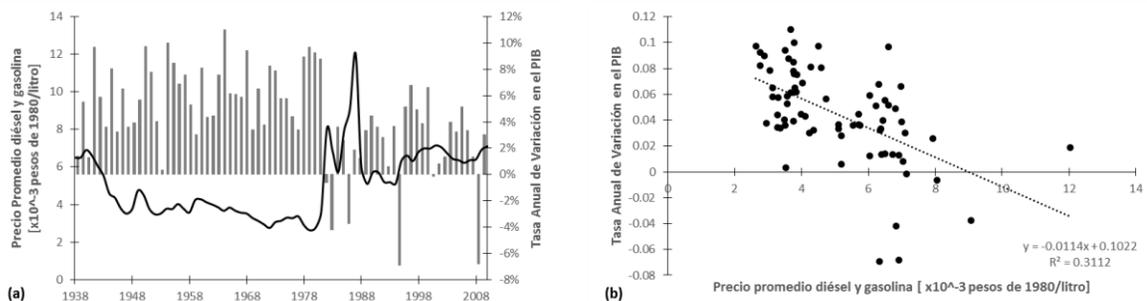


Figura IV-8 (a) Precio promedio del diésel y gasolina en México (línea negra) y tasas anuales de variación del PIB (barras) durante 1938-2010 y (b) Tasa anual de variación en el PIB vs precio promedio diésel y gasolina en México. Elaborado con datos de [142] [108].

Lo que se ha expuesto hasta el momento muestra que a lo largo de los últimos 40 años en México, a pesar de contarse con una gran abundancia energética, esta, paradójicamente, no se ha traducido en la posibilidad de disponer de productos energéticos baratos para suministrar a los procesos económicos nacionales, de hecho lo que ha ocurrido es el caso contrario en donde la situación que ha prevalecido es tal que los precios altos de la energía han sido la norma hasta el momento, en línea con lo que se ha señalado dentro de la literatura científica, este periodo de energía cara ha ido de la

mano con una era de bajo desempeño económico, la cuestión que de manera natural emerge ante estos hechos gira alrededor del ¿por qué en México la energía es cara? y ¿por qué lo es, incluso cuando el país se ha convertido en un importador de petrolíferos y los precios internacionales de estos productos han caído en algunos momentos? Tal y como se argumentará en lo que sigue, la respuesta a estos cuestionamientos parece encontrarse en las políticas fiscales que se aplican en el país, mismas que han terminado por convertir a una fuente energética, como lo es el petróleo, en una fuente de recursos económicos para el gobierno.

Sumado al desempeño económico pobre y a los precios elevados de la energía, otra característica fundamental que se debe destacar durante la segunda etapa que hemos planteado se refiere al deterioro de la concepción del petróleo como un recurso energético, lo anterior se aprecia en el hecho de que durante esta segunda etapa se le da un gran peso a la exportación de este recurso y de este modo el objetivo principal de la producción deja de ser buscar cubrir las necesidades del mercado interno. De acuerdo a los datos de la Figura IV-5 (b) se tiene que entre 1980 y 2014, en promedio, el 52% de la producción nacional de crudo tuvo como destino los mercados extranjeros. La posibilidad de utilizar el petróleo como un instrumento financiero para la captación de recursos económicos del extranjero se tradujo en una oportunidad para que el gobierno mexicano pudiera hacerse de los medios para solventar sus gastos, de este modo, un hecho que acompaña al crecimiento de las exportaciones petroleras es el desarrollo de una gran dependencia de los ingresos de gobierno federal en relación a los ingresos petroleros, entre 1980 y 2018, en promedio, estos últimos representaron el 30% de todos los ingresos del gobierno (ver Figura IV-5 (a)). Adicionalmente a lo anterior, el hecho que nos permite afirmar que durante este periodo la concepción que se tiene sobre el petróleo sufre una evolución que lo convierte de un recurso energético a un mero instrumento financiero se encuentra en el crecimiento, lento pero continuo, de la dependencia de las importaciones de gas y petrolíferos para poder satisfacer la demanda interna de energéticos. En la Figura IV-9 se han comparado el volumen total de petrolíferos y gas importados con el volumen total de las ventas internas de estos productos, las tendencias obtenidas son claras y muestran que desde 1980 se ha dado un incremento en la dependencia de las importaciones para

poder cubrir los requerimientos internos de estos productos, por ejemplo, mientras que en 1980 los petrolíferos importados solo representaban el equivalente al 1% de las ventas internas para el año 2014 este valor ya era del 37%. Para el caso del gas natural se tiene que en 1982 las importaciones representaban cerca del 0.5% de las ventas internas, para el año 2014 el valor registrado es del 39%.

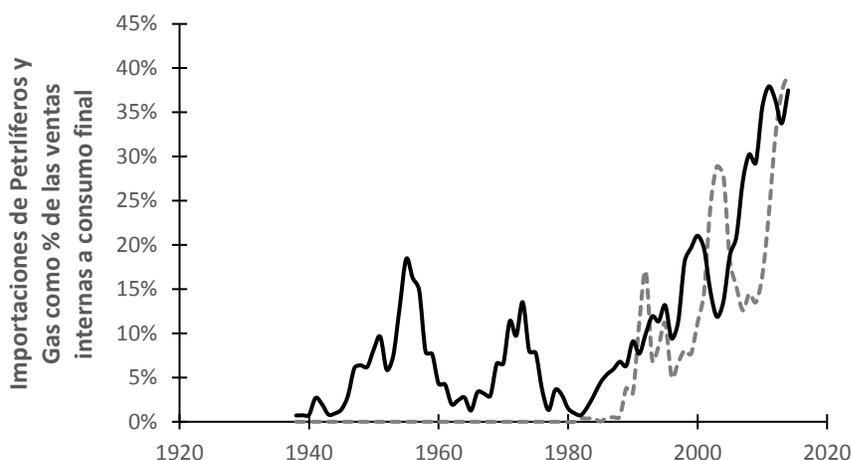


Figura IV-9 Importaciones de gas (línea gris discontinua) y petrolíferos (línea negra continua) como % de las ventas internas de PEMEX entre 1938 y 2014. Elaborado con datos de [108].

Al ser los ingresos del gobierno federal sumamente dependientes de los ingresos petroleros se creó en ellos un cierto grado de inestabilidad que se encuentra en función de la variabilidad de los precios internacionales del petróleo y es dentro de este marco en el cual los precios de los productos derivados del petróleo que se consumen en el país también han quedado profundamente ligados a las necesidades de las finanzas públicas. Desde la segunda mitad de los 70 el incremento en los precios de los productos petrolíferos ha estado enfocado en beneficiar los ingresos del gobierno federal [152]. Por ejemplo, Colmenares [153] comenta que de no haber sido por un aumento sustancial en la recaudación proveniente de los petrolíferos que se comercializaban dentro del país, la caída de los precios del crudo en el año de 1986 hubiera reducido aún más los ingresos petroleros del gobierno federal, de acuerdo a los datos de la Figura IV-5 (a) la participación

de dichos ingresos pasó de representar el 42% en 1985 al 38% en el año siguiente, lo cual significa una reducción del 9.5%, mientras que la reducción observada en los precios del petróleo fue de alrededor del 53% al pasar de 25.3 a 11.8 [dólares/barril] (según datos de BP [32]). Lo que estos hechos parecen mostrar es que en nuestro país el impuesto a los derivados del petróleo funciona como un medio alternativo de recaudación ante los ingresos que se pierden por las reducciones en los precios internacionales del petróleo, en la Figura IV-10 se expone este fenómeno.

Lo que se muestra en la Figura IV-10 (a) son los elementos que componen el precio final que pagan los consumidores por la gasolina en México, estos se han dividido en precios al productor, el cual corresponde al precio que debe pagarse para cubrir todos los gastos asociados a la extracción y refinación, por otro lado también se muestra la participación de los impuestos y finalmente se tiene el rubro “otros” que engloba aspectos como márgenes de ganancias para la venta final del producto y conceptos de distribución. Lamentablemente no se cuenta con una serie de datos mucho más extendida que permita conocer la evolución de estos elementos a lo largo de los últimos 40 años, sin embargo, con los datos disponibles se puede apreciar que desde 1995 y hasta 2003 los impuestos a la gasolina han representado, en promedio, el 48% del precio final que se pagó por la gasolina en el país. Posteriormente la carga impositiva ha ido disminuyendo hasta convertirse en un subsidio en años como 2008, 2011 y 2012, dicha disminución ha ido a la par de un incremento en los precios internacionales del crudo, lo cual confirma lo que se ha señalado antes, los impuestos a los petrolíferos actúan como un elemento compensador ante las pérdidas en los ingresos por la disminución en los precios del crudo, la Figura IV-10 (b) muestra claramente este hecho al exponer la existencia de una relación negativa significativa entre los precios de la mezcla mexicana de exportación y la participación de los impuestos en el precio final del combustible derivado. En conclusión podemos decir que, si los precios de los derivados del petróleo en México son elevados, esto se debe a la carga impositiva que se pone sobre ellos.

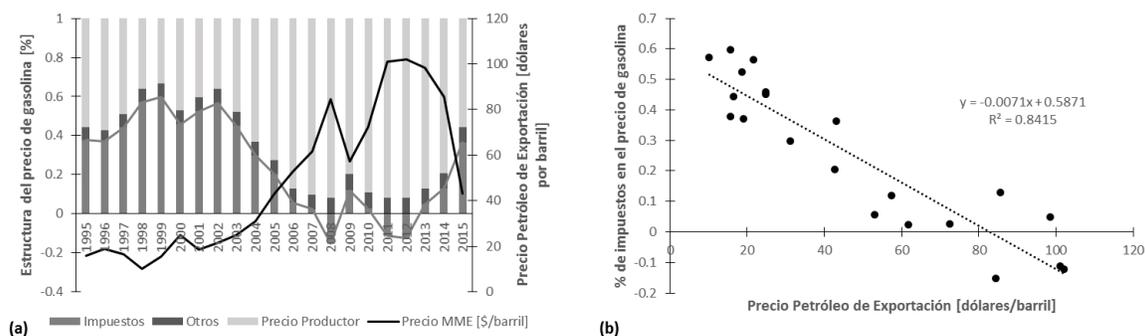


Figura IV-10 (a) Estructura del precio de la gasolina en México destacando la participación de los impuestos (línea gris) y precio de la mezcla mexicana de exportación durante 1995-2015 (línea negra) y (b) Participación de los impuestos en el precio final de la gasolina vs precio de la mezcla mexicana de exportación. Elaborado con datos de [108] [141].

La política fiscal siempre va a estar compuesta por dos caras, la primera de ellas tiene que ver con el proceso de recaudación y la segunda con el ejercicio que se hace de los recursos recolectados. En el caso de México hemos visto que la primera de estas facetas ha terminado por crear un entorno de energía artificialmente encarecida que no corresponde con la abundancia energética por la cual atravesaba el país, como se ha dicho antes, en este trabajo se considera que este encarecimiento de los recursos energéticos es uno de los motivos que ha provocado un bajo desempeño económico a lo largo de las últimas cuatro décadas, sin embargo, esta postura conduce directamente a la cuestión del ¿por qué el ejercicio de los grandes ingresos petroleros no se tradujo en grandes beneficios económicos? Responder a esta interrogante está muy lejos de los objetivos y alcances de este trabajo así como de las capacidades actuales de quien lo escribe, sin embargo, debe ser evidente que la respuesta se encuentra en el cómo se han ejercido esos ingresos, y respecto a esto, lo que sí se conoce es que en los últimos años el gasto público se ha concentrado en gasto corriente y no en gasto de inversión [153], este aspecto es de suma relevancia debido a que, combatir el encarecimiento de un recurso energético puede hacerse por dos medios, ya sea que se consiga haciendo un uso más eficiente del mismo o a través de su sustitución, siendo que en ambos casos se requiere de la construcción de infraestructura física que permita conseguir estos objetivos.

Ante los puestos expuestos parece claro que el petróleo mexicano ha traído mayores beneficios económicos cuando ha sido utilizado como energético que cuando se ha

empleado como un medio para financiar al Estado, este hecho ha sido señalado por autores como Ramírez y Hall [130], quienes han mostrado que durante el periodo de 1942 a 1973 la economía mexicana generaba cerca de 1.7 veces más unidades del PIB por cada barril de petróleo producido que lo hecho durante el periodo de 1974 a 1982. Siguiendo a estos autores se ha calculado la productividad de la economía mexicana en relación con la producción nacional de hidrocarburos totales (petróleo, gas, líquidos del gas y condensados), esto es, la cantidad de unidades del PIB que se generan por cada barril de petróleo crudo equivalente producido en el país, para ello se han utilizado los datos de PEMEX [108] sobre la producción de hidrocarburos y los de las series históricas para el PIB de la economía nacional recopiladas y trabajadas por Aparicio [142]. Los resultados obtenidos al realizar este ejercicio se muestran en la Figura IV-11, en ella es claro el cambio en la productividad o aprovechamiento de la producción nacional de hidrocarburos realizado por parte de la economía mexicana, mientras que durante el periodo de 1938 a 1979 se generaban 8.1 unidades del PIB por cada barril de petróleo crudo equivalente producido, durante los tiempos de gran abundancia petrolera, caracterizados por la presencia del campo gigante Cantarell, dicha productividad se redujo casi a la mitad, siendo esta, en promedio, de 4.4 durante el periodo que va de 1972 a 2010. Lo anterior quiere decir que durante el primer periodo se generaban cerca de 1.8 más unidades del PIB que durante el segundo, aunque por supuesto son muchos otros los factores que influyen en el desarrollo y evolución de la economía a lo largo del tiempo aquí se está señalando uno bastante importante y este es, como ya se ha dicho, que el uso de la energía resulta clave para el mismo y que el verdadero valor de la energía no parece radicar en su valor monetario asociado sino que se encuentra en hacer un uso físico de la misma.

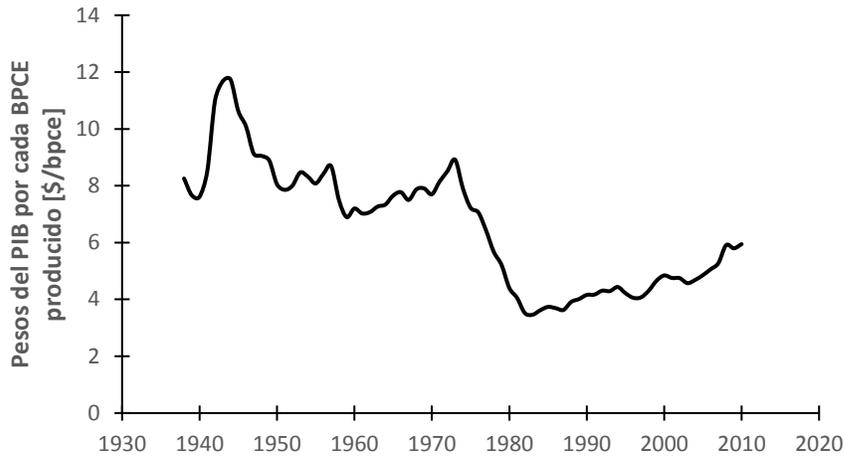


Figura IV-11 Unidades del PIB por cada barril de petróleo crudo equivalente producido durante 1938-2010. Elaborado con los datos de [142] [108].

4.2.2 Precios Bajos

Para el caso nacional existen al menos dos ejemplos de cómo los precios bajos del petróleo pueden resultar perjudiciales para el suministro de este recurso en el mediano y largo plazo. El primero de estos comenzaría a gestarse durante el periodo posterior a la nacionalización de la industria petrolera, ocurrida en 1938, y se materializaría durante los primeros años de los años 70. El segundo es uno mucho más reciente y se da posteriormente a la Reforma Energética del año 2013 con efectos hasta el día de hoy. A continuación, se dan los detalles de cada uno de ellos.

Pérdida nacional de autosuficiencia en materia el petróleo durante los años 70¹⁶

Con la nacionalización de la industria petrolera en México en el año de 1938 se dio paso a una nueva política petrolera nacional que tenía como objetivo principal satisfacer las necesidades energéticas del país, meta que se buscaba conseguir suministrando al

¹⁶ Los hechos relatados para este caso de estudio se basan en su totalidad en el trabajo “La Formación de la Política Petrolera en México 1970-1986” elaborado por Morales, Escalante y Vargas [152].

mercado interno con productos energéticos a precios bajos. Si bien es cierto que el acceso a energía barata resultó fundamental para el proceso de industrialización nacional, esta situación solo sería posible en detrimento de la disponibilidad del recurso tres décadas después. Como se ha dicho, dada la naturaleza finita de un recurso energético como lo es el petróleo y las características físicas de su explotación que son dictadas por la geología, asegurar su disponibilidad en el futuro depende de una constante inversión en el presente que permita ir remplazando los volúmenes que se van consumiendo, además de que posibilite mantener una producción creciente que pueda satisfacer una demanda en aumento. Sumado a lo anterior, también se ha señalado que es natural que la explotación de recursos energéticos se enfrente a costos crecientes con el paso del tiempo, por tanto, es de esperar que las inversiones requeridas para poner a disposición de la economía nuevos recursos también sean de un carácter creciente. La política energética de precios bajos seguida en el país después de 1938 se oponía a estas necesidades. Lo anterior se refleja en las declaraciones de personajes importantes como Antonio Bermúdez quien fuera director de PEMEX durante los años de 1947 a 1958: *“...los precios pueden ser bajos para que constituyan un estímulo a la producción (económica), pero no tanto que signifiquen un riesgo para el abastecimiento, abundante y oportuno de hidrocarburos.”* (Citado en [154]). Lo que Bermúdez señalaba era que la situación financiera a la que se orillaba a PEMEX manteniendo precios bajos en los productos que elaboraba no permitía que la empresa realizara las inversiones necesarias que aseguraran una expansión que fuera en conjunto con la demanda del mercado interno, en específico, que la falta de inversión podía llevar a una reducción en las reservas de hidrocarburos disponibles, lo cual no permitiría hacer frente a las necesidades del país, sin embargo, a pesar de sus señalamientos, un incremento en los precios de los productos energéticos solo se dio hasta el final de su gestión en 1958, dicho incremento sería el último en 15 años pues los precios se mantendrían estables hasta 1973.

Los señalamientos hechos por Bermúdez comenzarían a notarse en los años siguientes en donde la empresa tendría que enfrentarse a costos crecientes de operación, situación que combinada con los precios bajos prevalentes reducirían aún más los gastos en exploración en busca de nuevos recursos petroleros. Para ejemplificar los alcances de

la posición en la que se encontraba la empresa por aquel entonces se tiene que hacia 1964 no se tenía conocimiento de nuevas localizaciones que tuvieran el potencial de ser explotadas. La situación anterior comenzaría a remediarse durante la administración de Jesús Reyes Heróles, director de PEMEX en el periodo de 1964 a 1970, donde se reconocerían las carencias y rezagos referentes a las actividades de exploración y por tanto se pondría un énfasis especial en ello, reconociendo además que la era del petróleo “barato” había terminado y que contrario a lo que se había estado haciendo hasta aquel momento ahora se tenía que perforar a mayores profundidades e incluso costa afuera. Como resultado de aquellos esfuerzos se tiene que para 1969 ya se tenían establecidas las localizaciones que posteriormente, en los años 70, darían lugar a grandes descubrimientos petroleros.

Los logros conseguidos en materia de exploración hacia finales de los años 60 no pudieron evitar que las advertencias hechas una década antes por Antonio Bermúdez se materializaran hacia los inicios de los años 70. Desde el año de 1966 la demanda interna de hidrocarburos era tal que México había perdido su capacidad para exportar los antes excedentes de petróleo y para el año de 1971 el país ya se había convertido en un importador neto del mismo (ver Figura IV-12 (b)). La pérdida nacional de autosuficiencia en materia de petróleo que se vivió en aquel momento era el resultado de una suma de factores de entre los cuales se tiene: una demanda interna pujante, campos en declinación y los rezagos en materia de exploración. Respecto al último de los factores antes mencionados se debe agregar que si bien es cierto que para aquel momento, y como se ha mencionado antes, ya se tenía el conocimiento de localizaciones con gran potencial petrolero, todavía hacía falta explotarlas (no se puede extraer el petróleo que no ha sido descubierto y tampoco se puede hacer uso del petróleo que no ha sido extraído), para ello se requería hacer las inversiones necesarias, sin embargo, la política de precios bajos, aún operante en ese momento, dejaba a PEMEX sin los recursos necesarios para poder desarrollar esos recursos potenciales.

Las situaciones que daban lugar a la crisis de autosuficiencia de crudo en México solo comenzarían a resolverse en el año de 1973, en aquel año ocurriría el primer choque

petrolero de los años 70, el incremento en los precios internacionales del petróleo tomaría a México como un importador de este producto y por tanto causaría costes económicos importantes. Ante dicha situación tanto el Estado mexicano como el sector nacional privado reconocerían la importancia de desarrollar el potencial energético fósil del país y por primera vez en 15 años se permitiría un incremento en los precios de los productos elaborados por PEMEX además de que se crearían y facilitarían los mecanismos para que la empresa estatal pudiera acceder a distintas fuentes de financiamiento. Dichas medidas permitirían recuperar en 1974 la capacidad de satisfacer la demanda interna de petróleo además de que de nueva cuenta se comenzarían a exportar algunos excedentes (ver Figura IV-12 (b)).

Para ilustrar y acompañar la situación que se ha descrito en los párrafos de arriba se han elaborado las Figura IV-12 (a) y (b). En la primera de ellas se puede apreciar tanto la evolución de las reservas probadas de hidrocarburos así como la relación entre lo anterior y la producción anual de hidrocarburos. En relación a las reservas se aprecia cómo estas permanecen casi en un nivel constante desde 1938 y hasta 1950, año a partir del cual se comienza a dar un incremento en su volumen, sin embargo, para 1960 la evolución de las mismas vuelve a estancarse por poco más de una década hasta que vuelven a incrementar en 1974. El impacto que tiene esta falta de incorporación de reservas en relación a la producción que se mantiene se aprecia en la relación R/P, la cual puede entenderse como el número de años que durarían las reservas probadas en un año dado si la producción de ese mismo año se mantuviera constante, como puede apreciarse, en general, dicho indicador muestra una tendencia a la baja durante el periodo que va de 1938 a 1974, destacando que antes de 1969 se encontraba, en promedio, por encima de 20 años, y posterior a este año ya había caído de ese nivel. Lo que estos datos nos muestran es una situación de deterioro en donde el ritmo de incorporación de reservas se va quedando atrás respecto a la necesidad de mantener una producción creciente que sirva para satisfacer una demanda que también lo era, tal y como puede apreciarse en la Figura IV-12 (b) dicha situación se hace insostenible, primero manifestándose con el agotamiento de los excedentes para exportar y después en la necesidad de importar crudo para poder toda la demanda nacional.

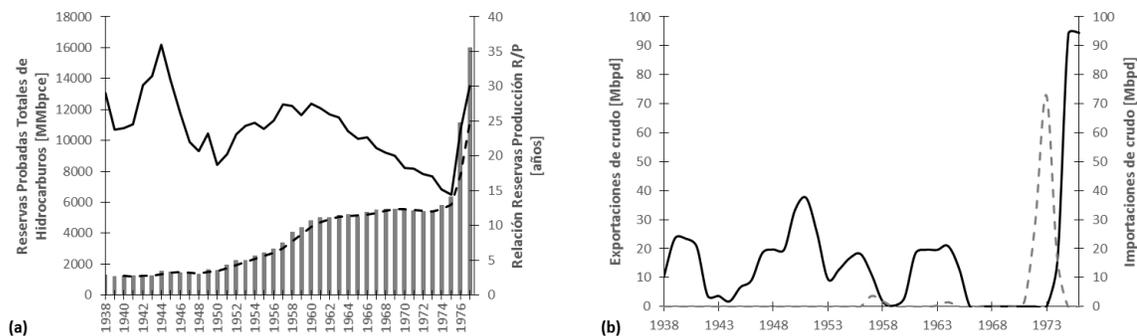


Figura IV-12 (a) Reservas probadas totales de hidrocarburos (barras y línea punteada es la media móvil) y la relación reservas producción R/P (línea negra) y (b) Exportaciones (línea negra) e importaciones de crudo durante 1938-1977. Elaborado con datos de [108].

Fracaso en los pronósticos de producción tras la Reforma Energética de 2013

Con la aprobación de la Reforma Energética en Diciembre del año 2013 se marcó un parteaguas para el sector energético mexicano. Bajo la nueva legislación se abrieron las puertas para que el capital privado, tanto el nacional como el extranjero o estos dos en asociación, pudiera participar en las actividades de exploración y extracción de hidrocarburos, terminando con ello la exclusividad que la empresa nacional PEMEX había poseído en esta materia desde su creación en 1938.

La Reforma Energética se dio dentro de un contexto en cual el sector de hidrocarburos en México se encontraba ante a varias dificultades dentro de las cuales estaban; una producción de petróleo que habiendo alcanzado su pico máximo en el año 2004 con 3382 [Mbd] ya sumaba 9 años a la baja, por otro lado, la producción de gas había tocado su pico en el año 2009 con una cantidad de 7030 [MMpcd], lo anterior sucediendo a pesar de que los años previos habían estado caracterizados por una mayor inversión en materia de explotación de recursos petroleros [155] [156] [157], esto es, cada vez se gastaba más para producir menos. La producción declinante de hidrocarburos se daba en un ambiente en el cual la demanda interna de estos energéticos presentaba un comportamiento creciente lo cual levantaba preocupaciones sobre la seguridad energética del país, sumado a esto, otro aspecto que hacia percibir la situación como de una

naturaleza crítica tenía que ver con la alta dependencia que los ingresos del gobierno federal tienen de los ingresos petroleros, los cuales, a lo largo de las últimas tres décadas han representado en promedio el 30% de estos, por lo cual, la caída en la producción con su acompañante caída en las exportaciones representaba un problema potencial para la salud de las finanzas públicas a lo largo del tiempo [155] [156] [157].

Detrás de la caída en la producción de petróleo y gas a nivel nacional se pueden identificar dos razones principales [155] [156] [157]. La primera de ellas tiene que ver con la declinación del campo petrolero súper gigante Cantarell, el cual entró en declive desde el año 2004 arrastrando consigo a la producción nacional de crudo. A lo largo de las últimas cuatro décadas este campo ha sido por mucho el más importante del país, como ejemplo de ello se tiene que entre 1979, año en el cual este entró en producción, y 2019, la producción proveniente de Cantarell representó, en promedio, el 35% de toda la producción nacional con una participación máxima del 63% en el año 2004 (ver Figura IV-13 (a)). Por otro lado, si se comparan la producción nacional contra la que proviene de este campo (ver Figura IV-13 (b)) es fácil comprobar que existe una estrecha correlación entre las mismas, el mejor ajuste lineal indica un coeficiente de correlación de 0.83, lo cual indica que la producción nacional creció con la entrada de Cantarell y cayó siguiendo su declive, situación que además no puede ser contrarrestada incluso cuando la producción proveniente de otros campos se encontraba en franco ascenso (ver Figura IV-13 (a)). El caso contrario a lo anterior ocurre cuando se repite el mismo ejercicio pero ahora la producción nacional se compara contra la producción que proviene de todos los otros campos explotados en el país, en este caso el coeficiente encontrado es solo del 0.03, por supuesto esto último no quiere decir que el resto de campos no tengan importancia, sin embargo, es claro que los niveles de influencia al decidir el comportamiento global de la producción de ninguna manera es el mismo.

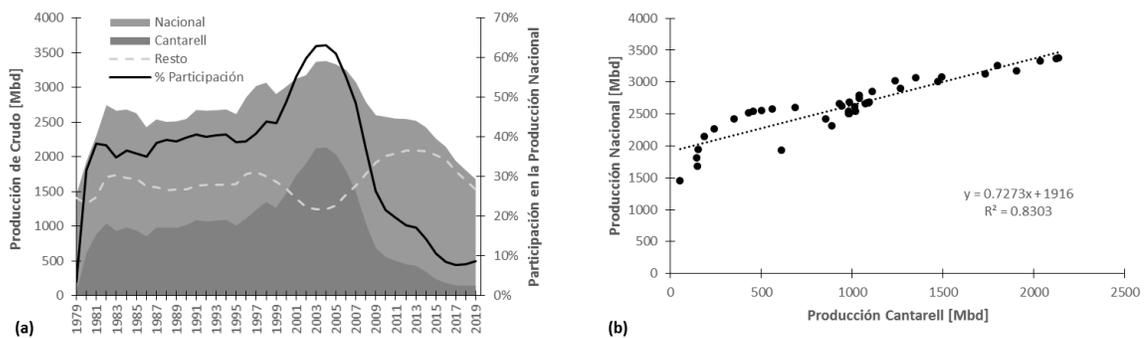


Figura IV-13 (a) Producción nacional de crudo y producción proveniente de Cantarell durante 1979-2019 (especificaciones en la figura) y (b) Producción nacional de crudo vs producción proveniente de Cantarell. Elaborado con datos de [158].

La segunda razón detrás de la caída en la producción nacional de petróleo y gas tiene que ver con la gran carga fiscal que la empresa nacional PEMEX ha tenido que sobrellevar a lo largo de las últimas cuatro décadas. En este sentido se ha argumentado [155] [157] [159] que la alta carga impositiva que el gobierno mexicano ha puesto sobre la empresa petrolera la ha privado de los recursos necesarios para realizar las inversiones necesarias en proyectos de exploración, extracción y transformación de hidrocarburos, además, de que le ha impedido el poder invertir en el desarrollo o la adquisición de las tecnologías e infraestructura necesaria para explotar los recursos potenciales que el país alberga en las aguas profundas del Golfo de México, así como en los denominados yacimientos no convencionales de shale oil y shale gas. Sumado a esto, el marco legal que operaba antes de la Reforma de 2013 impedía que PEMEX pudiera optar por una asociación con empresas privadas a través de la cual le fuera posible compartir los costos financieros para el desarrollo de los recursos potenciales del país y que además pudieran permitir la ocurrencia de procesos de transferencia tecnológica [155] [157]. De esta manera se entendía que la empresa petrolera nacional PEMEX no contaba con los recursos, ni financieros, ni tecnológicos, que le permitieran hacer frente al reto que suponía revertir la caída en la producción nacional de hidrocarburos.

La Reforma Energética de 2013 nace como un intento por revertir la tendencia a la baja en la producción de hidrocarburos permitiendo, a través de la inversión privada, contar con los recursos financieros y tecnológicos necesarios para poder explotar y sacar

provecho de los recursos fósiles potenciales que guarda el país en las aguas profundas del Golfo de México o en los llamados recursos no convencionales, sin embargo, coincidiendo con su implementación también ocurrió, en 2014, una caída en los precios internacionales del petróleo la cual trajo consigo una reducción en la inversiones que se realizan en el sector, esto último tanto a nivel internacional como local, con lo cual, desde nuestro punto de vista, se eliminó cualquier éxito potencial que hubiera podido tener la implementación de la Reforma Energética debido a que la viabilidad del desarrollo de los recursos fósiles a los cuales esta apuntaba requieren de precios altos de la energía.

La estrecha correlación que existe entre la inversión dentro del sector petrolero y el precio del petróleo es un hecho bien conocido y establecido [160], en este sentido México no es una excepción, en la Figura IV-14 (a) puede apreciarse como la inversión total realizada por PEMEX desde 1993 y hasta 2019 ha ido de la mano con los movimientos que sufre la mezcla mexicana de exportación, esta correlación también puede apreciarse al comparar el número de pozos perforados en el país y los precios del petróleo, como se ha realizado en la Figura IV-14 (b), de nueva cuenta se observa que la cantidad de pozos perforados es susceptible a los cambios en el precio del hidrocarburo, siendo que en ambos casos se observa como hay una caída en la actividad del sector siguiendo la caída de los precios de 2014. Lo que se quiere evidenciar con lo anterior es que si los precios del petróleo no crecen entonces no se invierte más, y si no se invierte más, no se perfora más, y cuando no se perfora no es posible encontrar más petróleo y por supuesto mucho menos es posible extraerlo. Lo anterior adquiere aún más importancia cuando se considera que los recursos que se pretendían explotar como resultado de la Reforma Energética son recursos que por su naturaleza física son mucho más costosos que los recursos convencionales, lo anterior siendo cierto incluso cuando en los últimos años se ha dado una disminución en el costo de su explotación, por ejemplo, en un estudio de 2020 la agencia Rystad Energy [98] estima que el precio mínimo que se requiere para que los proyectos en aguas profundas o aquellos en donde se explota shale gas resulten rentables se requieren de precios promedio alrededor de los 43 dólares por barril, aunque esto último parece demasiado bajo, si se compara con el precio promedio que se requirió a nivel mundial para mantener la producción de 2019, estimado en 23 dólares, dichos

requerimientos resultan ser casi del doble. Ante esto, es claro que la caída en los precios del petróleo en 2014 suponía un reto para la viabilidad de los objetivos planteados por la Reforma Energética.

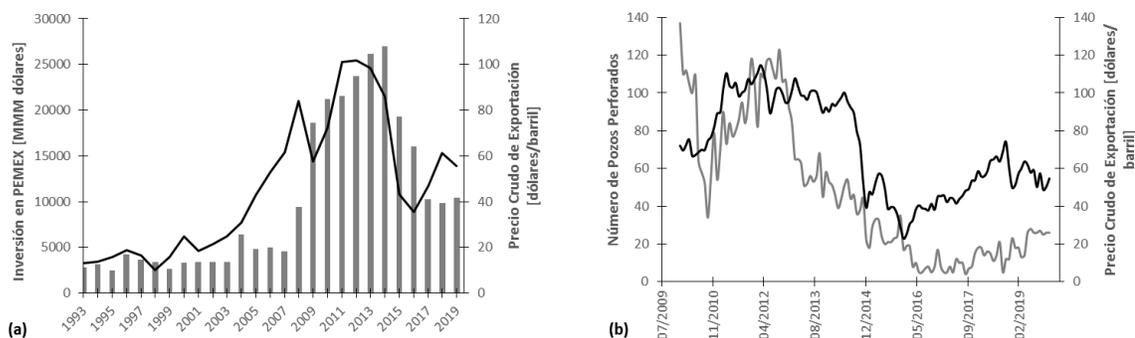


Figura IV-14 (a) Inversión total en PEMEX (barras) y precio de la mezcla mexicana de exportación (línea negra) durante 1993-2019 y (b) Número de pozos perforados (línea gris) y precio de la mezcla mexicana de exportación (línea negra) durante Enero de 2010-Diciembre de 2019.

El hecho de que los precios bajos del petróleo condenaban a que la Reforma Energética de 2013 resultará en un fracaso en lo que se refiere a los supuestos niveles de producción que podían ser alcanzados fue señalado por Hernández en 2017 [161]. Quien usó herramientas estadísticas y la información histórica disponible sobre las reservas y producción de hidrocarburos en México para elaborar distintos escenarios con estimaciones sobre los volúmenes de petróleo y gas que aún quedarían por descubrir en nuestro país. Para el caso del crudo, en el escenario bajo, se estima un volumen de reservas 1P por incorporar de poco menos de 3500 [MMb], mientras que en el caso más optimista este volumen asciende a poco más de 7600 [MMb]. Al hacer una comparación de los resultados obtenidos con los volúmenes de crudo necesarios para cumplir los escenarios de producción propuestos por SENER-CNH en 2015 [162] y que serían resultado de la implementación de la Reforma Energética de 2013, los datos dejan claro que el pronóstico máximo de producción propuesto por los organismos no parece factible al requerir un volumen de incorporación de reservas 1P equivalente a 9329 [MMb], mientras que la proyección menos optimista solo sería viable de cumplirse el caso más

optimista en cuanto a volúmenes por descubrir al necesitar de 4208 [MMb]. Los pronósticos hechos por Hernández en cuanto a los volúmenes de hidrocarburos que aún quedan por descubrir en México no tienen en cuenta aquellos que puedan provenir de recursos como los localizados en aguas profundas del Golfo de México o de los llamados no convencionales como los es el shale oil y el shale gas, lo anterior debido a que, al momento de realizar el trabajo y tal como señala la autora, este tipo de recursos no contaba con reservas certificadas o información histórica que le permitiera incorporarlos en sus cálculos, ante este hecho se señala que los pronósticos propuestos por SENER-CNH se basan y dependen de los resultados que se podrían tener al explotar este tipo de recursos como resultado de la Reforma de 2013, sin embargo, aunque se pudieran concretar descubrimientos de importancia en este sentido (situación que Hernández señala como poco probable) extraer estos recursos estaría sujeto a la capacidad de las economías de poder sostener durante varios años un precio del petróleo por encima de los 90 dólares.

Lo que el trabajo de Hernández nos dice es que los volúmenes de hidrocarburos requeridos para revertir la caída en la producción nacional de petróleo solo pueden provenir de aquellos que potencialmente se encuentran en las aguas profundas del Golfo de México o de recursos no convencionales, pero si los precios del petróleo no justifican que se realicen las inversiones necesarias para poder explotarlos, entonces, sencillamente, parece imposible revertir la caída. Con datos de producción actualizados al año 2020 es posible apreciar que a la fecha, la extracción de petróleo en el país se encuentra por debajo incluso del escenario mínimo planteado en 2015 y muy lejos del que fuera el pronóstico máximo (ver Figura IV-15).

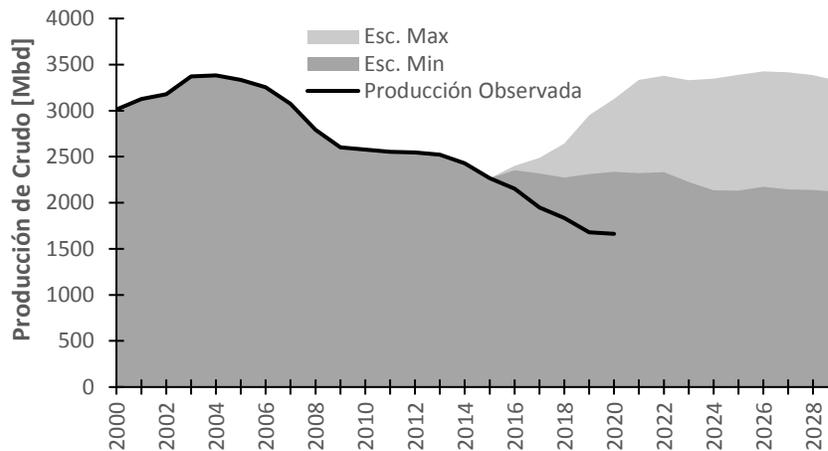


Figura IV-15 Producción nacional de crudo durante 2000-2020 y pronósticos de producción para 2015-2029 propuestos en 2015 por SENER-CNH y que serían resultado de la implementación de la Reforma Energética de 2013. Elaborado con datos de [162] [141] [108].

El caso que hemos descrito arriba guarda bastante relación con lo que ocurrió en el país durante los años 70, en aquel entonces México se encontraba ante la necesidad de explotar recursos petroleros mucho más costosos al tener que perforar a mayores profundidades e iniciar la explotación costa afuera, en aquel momento esta situación fue percibida como el fin del “petróleo barato” aunque posteriormente la historia mostraría que el país estaba lejos de ello y seguiría el periodo de mayor abundancia petrolera. La causa de la crisis petrolera de los años 70 encuentra su origen en gran medida en la política de precios bajos que impedía que PEMEX obtuviera los recursos suficientes que le permitieran realizar las inversiones requeridas para expandir sus operaciones, la solución a la situación se da precisamente en un momento de precios altos de la energía, en donde ante los costos económicos que significaba ser un importador de petróleo se decide aprobar un incremento en los precios de los productos elaborados por PEMEX y facilitar otros mecanismos para que la empresa pudiera allegarse de recursos de tal modo que se pudieran solventar los gastos de desarrollo requeridos, esto es, transitar hacia recursos más costosos requirió de un incremento en los precios de la energía. Con el declive de Cantarell en el año 2004 México parece entrar, esta vez de verdad, en la era del fin del petróleo barato, pero a diferencia de lo ocurrido en los 70 ahora se sabe con cierto grado

de certeza en donde potencialmente se encuentran los recursos fósiles que quedan por explotar y con ello se conoce que son recursos verdaderamente costos. La Reforma Energética del año 2013 fue propuesta como una solución a los retos que el país tenía que enfrentar en materia de energía, sin embargo, contrario a lo que sucedió en la crisis de los 70 en donde los precios de la energía incrementaron, los precios cayeron, sin un cambio sustancial en esta situación es difícil que México pueda realmente aprovechar los recursos petroleros remanentes.

La situación que ha sido planteada en esta sección establece que México se encuentra ya ante la llamada “paradoja del crecimiento”, en donde los precios que requiere para explotar los recursos energéticos fósiles de los que aún dispone se requiere de altos precios de la energía, sin embargo, y como se ha visto, los precios altos de la energía resultan contraproducentes para la actividad económica, por lo cual podrían terminar por reducir o aniquilar el crecimiento deseado.

4.3. Gasto en Energía y Crecimiento Económico

El gasto en energía, también llamado costo de la energía, se refiere a la cantidad de dinero que se desembolsa dentro de una economía para pagar por la energía que esta consume y usualmente se expresa como una fracción del producto interno bruto [60]. Distintos autores han señalado que por lo general existe una relación inversa entre el gasto en energía y la tasa anual de variación en el PIB, esto es, cuando el primero de ellos crece el segundo disminuye, e incluso, en algunos casos presenta recesiones (ver sección 1.7.5). Bashmakov [100], por ejemplo, ha estudiado los gastos en energía para Estados Unidos y para el grupo de los países miembros de la OCDE teniendo en cuenta los precios al consumidor, a partir de ello ha determinado que existen límites para el gasto en energía por debajo de los cuales no es posible encontrar una correlación entre estos y el crecimiento económico, sin embargo, una vez que dichos límites han sido alcanzados o superados tanto el crecimiento económico como la demanda de energía se ven reducidos hasta que el gasto en energía regresa a niveles por debajo del límite. Para Estados Unidos, Bashmakov calcula que el límite en el gasto en energía se encuentra entre el 8 y 10%,

mientras que para el conjunto de los países miembros de la OCDE este límite se encuentra en un rango entre el 9 y 11%. Por debajo de este umbral son otros factores los que determinan el comportamiento en el crecimiento económico y la energía no representa un límite para el mismo, pero una vez que dicho umbral ha sido alcanzado o superado el efecto de otros factores que contribuyen al crecimiento económico queda anulado y este se ve reducido.

Por otro lado, Murphy y Hall [91] han mostrado gráficamente que la economía de los Estados Unidos entra en recesión cada que el gasto en petrolíferos realizado por la sociedad supera el 5.5% del PIB. Aucott y Hall [101] han calculado los gastos en energía para Estados Unidos considerando el gasto en energía primaria, incluyendo aquí el gasto en carbón, gas, petróleo crudo y mineral nuclear, y han comparado estos con la tasa de crecimiento económico del país de 1950 a 2013. Sus resultados confirman de nueva cuenta la existencia de una relación inversa entre el tasa de variación anual del PIB y los gastos en energía, de acuerdo al mejor ajuste lineal realizado para los datos obtenidos, el límite de gastos en energía por encima del cual no hay crecimiento económico se encuentra en una vecindad del 4%.

Otro ejemplo lo constituye el trabajo de Fizaine y Court [60] quienes han calculado series históricas para el gasto en energía en Estados Unidos, Reino Unido y el Mundo, combinando esta información con la referente a la variación en el producto interno bruto han logrado identificar que, en general, aquellos periodos caracterizados por altos gastos en energía están asociados con recesiones económicas y tasas de crecimiento bajas, por el contrario los periodos en donde se ha encontrado que el gasto en energía es bajo muestran tasas de crecimiento económico altas. Para el caso particular de los Estados Unidos dichos autores han estimado que el gasto máximo en energía que puede esta economía puede tolerar sin sufrir una recesión es del 11% y cuando solo se tienen en cuenta los gastos en petrolíferos el límite se ubica en el 6%.

Por su lado, Roberts y colaboradores [163] han estudiado, para un grupo de 15 diferentes países, la relación que existe entre los gastos en energía y el desempeño económico y social, siendo estos representados por el PIB de la economía y el PIB per

cápita, respectivamente. Los resultados de estos autores confirman de nueva cuenta la existencia de una relación negativa entre los altos niveles de gasto en energía y el desempeño económico. Sumado a lo anterior este grupo de investigadores también ha calculado, para 14 de los 15 países estudiados, el límite mínimo por encima del cual el gasto en energía comienza a afectar de forma negativa al desempeño económico, los resultados obtenidos muestran que existe un amplio rango de posibilidades para estos valores, teniendo por ejemplo países como Sudáfrica con límites de tolerancia en el rango del 3% mientras que otros, como lo es China, muestran una mayor resiliencia con un dato reportado del 25%, de acuerdo a los investigadores esta variedad podría explicarse por las diferencias en la disponibilidad de combustibles en cada país. En el caso general que considera a todos los países el valor máximo tolerable es del 7.7%.

Como una explicación al mecanismo que actúa detrás de la relación negativa que existe entre el gasto en energía y el desempeño de las economías algunos autores [91] [102] han propuesto que cuando se presenta un incremento en los precios de la energía, los consumidores dentro de una economía tienden a reducir su gasto en actividades no esenciales ya que ahora tienen que dedicar una mayor parte de sus ingresos en adquirir la energía que consumen además de pagar por bienes y servicios básicos más caros ya que por lo general el incremento en el precio de la energía también incrementa el precio de todos los otros productos dentro de una economía lo anterior resulta en una disminución general de la actividad económica. En la Figura IV-16 se ha reproducido la Figura I-27 presentada previamente en la sección 1.7.5, la cual permite ejemplificar el fenómeno de la redistribución de los gastos realizados por los consumidores dentro de la economía antes y después de experimentar un incremento en los precios de la energía, se debe aclarar que esta figura solo tiene el objeto de ilustrar la situación y no corresponde a una redistribución real que haya sido medida a través de datos empíricos.

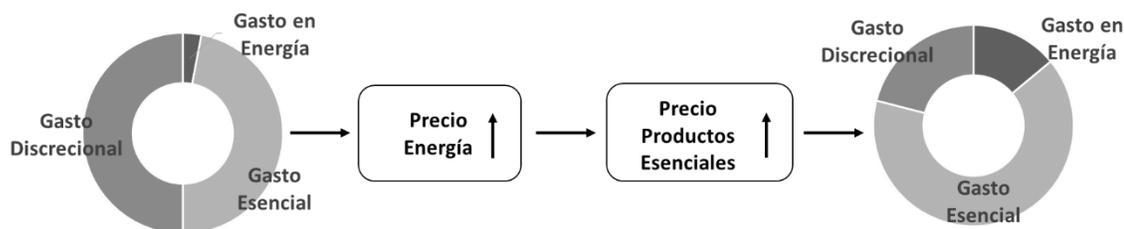


Figura IV-16 Redistribución del gasto realizado por los consumidores una vez que se experimenta un incremento en los precios de la energía.

En lo referente al gasto en energía, la economía mexicana tampoco se comporta de manera diferente a lo que se ha observado para otros países y como se verá en breve, las altas tasas de crecimiento económico se encuentran asociadas con bajos niveles de gasto en energía, mientras que cuando este gasto ha sido alto, el desempeño de la economía nacional se ha reducido.

En este trabajo se han construido dos series históricas diferentes para poder observar el comportamiento del gasto monetario que la economía nacional destina para pagar el gas y/o petrolíferos que consume anualmente (ver sección 3.4 para detalles). La primera de estas series utiliza el valor de las ventas internas de gas y petrolíferos, reportadas por PEMEX desde el año 1938, como un proxy del gasto nacional en este tipo de recursos energéticos, estos datos no incluyen los impuestos que el usuario final paga por los productos que consume y por tanto no representan el verdadero gasto en energía que se realiza en nuestro país, como se ha visto en la sección anterior, los impuestos a los derivados del petróleo, al menos en las últimas décadas, han representado un componente importante del precio final que se paga por los energéticos y por tanto debería tenerseles en cuenta. En vista de lo anterior y en busca de obtener una mejor aproximación al comportamiento real que ha tenido el gasto en energía en nuestro país se ha construido una segunda serie pero esta vez teniendo en cuenta los precios promedio al consumidor final, que sí incluyen impuestos, y el volumen de los petrolíferos vendidos dentro del país. Dentro de este segundo enfoque solo se han considerado tres tipos de combustible que son: gasolina, diésel y combustóleo; esta decisión se ha tomado debido a que la gran

mayoría de los datos no se encuentra dentro de una base digitalizada y por tanto se ha requerido realizar una captura manual de la información abarcando un periodo que va de 1938 a 2010.

En la Figura IV-17 se han comparado los datos calculados para el gasto en gas y petrolíferos en México durante el periodo de 1938 a 2010 contra las tasas anuales de crecimiento del PIB nacional durante el mismo periodo, tal y como puede apreciarse en la imagen, se hace evidente la existencia de una correlación negativa entre las variables. Al igual que como se ha señalado en la sección anterior, los datos obtenidos dejan ver la existencia de dos periodos sumamente distintos, uno de energía barata y grandes tasas de crecimiento y otro de energía costosa que se acompaña con bajo desempeño económico. En el caso particular que aquí se expone, se tiene que durante el periodo de 1938 a 1981 el gasto nacional en gas y petrolíferos representó, en promedio, el 2.5% del PIB nacional, mientras que de 1982 a 2010 este valor equivalente al 4% del PIB. Para en el caso en el que se consideran los precios finales al consumidor, se tiene un valor para el primer periodo de 2.4% mientras que durante el segundo este es de 5.6%, este mayor incremento es claramente un reflejo del efecto causado por una mayor carga tributaria. En lo que concierne a las tasas de variación del PIB, durante 1938 y 1981 estas fueron en promedio del 6% anual, mientras que de 1982 a 2010 el promedio es de 1.8%. Dichos datos corroboran la existencia de una relación negativa entre el crecimiento económico y el aumento en el costo de la energía en México.

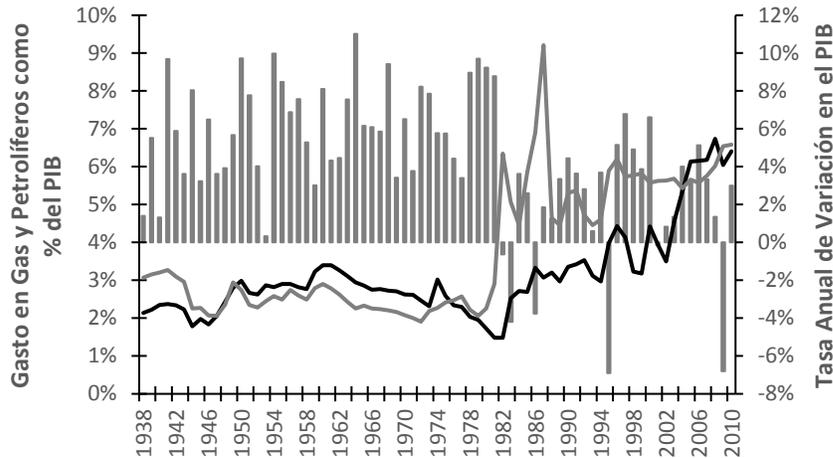


Figura IV-17 Estimación del gasto en gas y petrolíferos (línea negra) y el gasto en petrolíferos seleccionados (línea gris) vistos como un porcentaje del PIB y tasas anuales de variación del PIB en México durante 1938-2010. Elaborado con datos sobre el gasto en energía obtenidos en la sección 3.4 y [142].

Como se ha señalado al principio de esta sección, la literatura especializada no solo apunta a la existencia de una relación negativa entre el gasto en energía y el crecimiento económico sino que también postula la existencia de valores máximos por encima de los cuales el crecimiento económico se ve reducido o incluso anulado y revertido. Para países miembros de la OCDE, Bashmakov [100] estima que los límites tolerables se encuentran en un rango entre el 9 y el 11%, mientras que para el caso específico de México, Roberts y colaboradores [163] han estimado un valor de 6.4%. Si se realiza una comparación simple entre los datos que se han calculado para el gasto nacional en gas y/o petrolíferos y las tasas anuales de variación de la economía mexicana (ver Figura IV-18) se puede verificar la existencia de una relación negativa entre las variables además de que el ajuste lineal a estos datos permite estimar el gasto máximo tolerable en el cual el crecimiento económico se vuelve cero. Para el caso en el que las ventas internas de PEMEX figuran como proxy del gasto en energía, el gasto máximo tolerable calculado es del 7.57%, mientras que en el caso en donde se han utilizado los precios finales al consumidor de la gasolina, el diésel y el combustóleo, el valor que se obtiene es del 7.31%. En ambos casos los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos reportados por la literatura especializada.

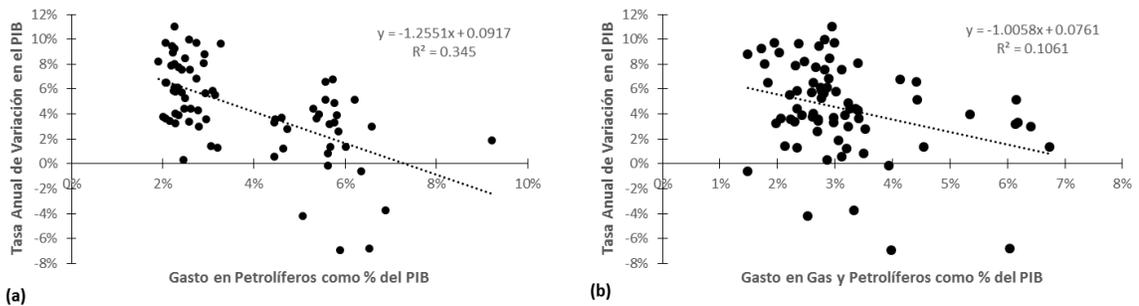


Figura IV-18 (a) Tasa anual de variación en el PIB vs gasto en petrolíferos como % del PIB y (b) Tasa anual de variación en el PIB vs gasto en gas y petrolíferos como % del PIB. Elaborado con datos sobre el gasto en energía obtenidos en la sección 3.4 y [142].

En la Figura IV-19 se ha repetido el ejercicio de comparar las series históricas sobre el gasto en gas y/o petrolíferos y el desempeño de la economía nacional pero ahora incluyendo los datos sobre los rangos máximos tolerables, siendo el mínimo de 6.4%, el máximo de 9% y para el caso medio se ha utilizado el promedio de los obtenidos del modelo lineal que se muestra en la Figura IV-18. Lo que en la Figura IV-19 se puede apreciar es que durante los periodos de recesión en México como lo fueron los años 82, 83, 86, 95 y 2009, el gasto en energía se encontraba dentro o cercano al umbral máximo tolerable, siendo un aspecto relevante de lo anterior, que salvo el año 2009, la serie que se encuentra dentro del rango máximo es la serie de petrolíferos, la cual sí incluye el concepto de impuestos pagados sobre estos productos, este hecho revela de nueva cuenta lo ya antes dicho, esto es, que la energía en México ha sido cara por la carga impositiva que se coloca sobre los productos energéticos.

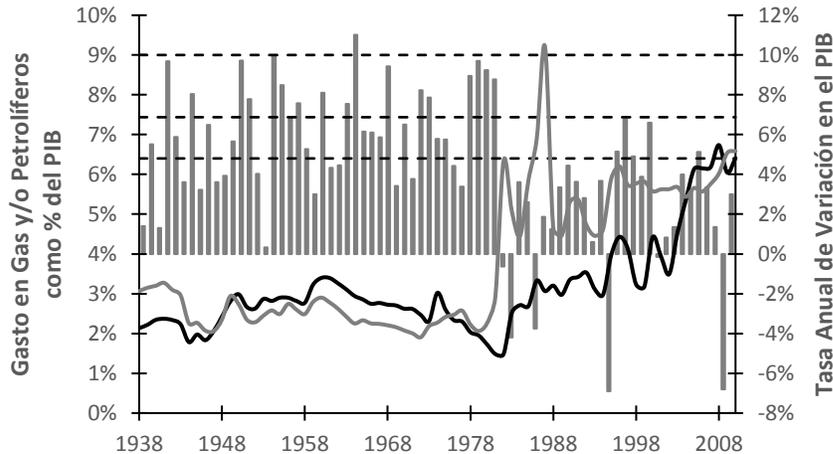


Figura IV-19 Estimación del gasto en gas y petrolíferos (línea negra) y el gasto en petrolíferos seleccionados (línea gris) vistos como un porcentaje del PIB, tasas anuales de variación del PIB en México durante 1938-2010 (barras) y posibles límites máximos tolerables por la economía para el gasto en energía (líneas punteadas).

4.4. El IRE y el Crecimiento Económico

Hasta este punto se ha dado evidencia de que la economía mexicana no se comporta de forma extraña o diferente a lo que se ha reportado dentro de la literatura científica y de esta manera se ha visto que: 1) Históricamente el crecimiento económico en México siempre ha venido acompañado de un aumento en el uso de energía, 2) que los precios altos (bajos) de la energía están correlacionados con el bajo (alto) desempeño económico medido por la tasa anual de variación en el PIB y 3) que existe una relación negativa (positiva) entre los altos (bajos) niveles de gasto en energía y el crecimiento de la economía. Ahora, partiendo de esta evidencia y en combinación con el conocimiento que se tiene sobre las relaciones que el IRE guarda con cada una de las variables mencionadas es posible conocer las implicaciones potenciales que puede tener sobre la economía nacional la tendencia negativa que se ha observado sobre este indicador.

Sobre el IRE, lo que se debe tener presente es que tanto teórica como empíricamente se ha mostrado que: 1) El IRE guarda una relación inversa con la energía neta, 2) existe una relación negativa entre el IRE y los precios de la energía y a partir de lo anterior se tiene 3) que el IRE guarda una relación inversa con el gasto en energía. A partir de estos

hechos lo que se puede razonar sobre la relación entre IRE y el crecimiento económico es que entre ellos debe existir una relación positiva, esto es, los altos niveles de retorno energético deben estar correlacionados con un alto desempeño económico debido a que:

- 1) Al reducirse la cantidad de energía neta disponible para la economía, debería haber una reducción general en la actividad económica ya que ante esta situación habría menos energía disponible para realizar otras actividades distintas a la obtención de energía,
- 2) una reducción en el IRE de los recursos que se explotan conduce a la necesidad de tener precios altos de la energía que justifiquen la inversión económica de explotarlos y como se ha visto los precios altos de la energía impactan de forma negativa al desempeño económico, finalmente,
- 3) la necesidad de dedicar una mayor cantidad de energía y materiales para explotar recursos con un IRE bajo se manifiesta económicamente como un aumento en los gastos en energía, y al igual que en el punto anterior, se ha visto que dicha situación está asociada a una disminución en la actividad económica.

Un aspecto importante que se debe tener presente con relación a lo antes dicho es que si bien es de esperar que exista una relación positiva entre el IRE y la economía, también es de esperar que dicha relación sea de un tipo no lineal, esto se deriva tanto de los planteamientos teóricos como de las observaciones empíricas que describen la relación entre el IRE y variables como la energía neta, el precio de la energía y el gasto en energía. Como consecuencia de esta naturaleza no lineal es posible que la disminución en el IRE no genere efectos negativos perceptibles en la economía hasta que ciertos umbrales críticos hayan sido alcanzados, matemáticamente estos límites se pueden ubicar en valores de IRE menores a 10.

Para corroborar si las mediciones para el IRE se encuentran relacionadas de manera positiva con el desempeño de la economía nacional se han comparado las series históricas obtenidas en las secciones 3.4 y 3.5 con las tasas anuales de variación del PIB en México. La primera aproximación para este ejercicio se ha hecho utilizando los datos para el IRE calculados en la sección 3.5, se debe recordar que este IRE se construyó haciendo una estimación del consumo directo de energía que fue empleado para realizar las actividades de extracción de petróleo y gas en nuestro país, esto es, este IRE se refiere al retorno energético de la extracción de hidrocarburos en México. Los resultados obtenidos se

muestran en la Figura IV-20 (a), los mismos parecen contradecir por completo la hipótesis de que el IRE guarda una relación positiva con el crecimiento económico, ya que el periodo de 1938 a 1981 que muestra las tasas de crecimiento más altas con un valor promedio del 6% anual tiene un valor de IRE promedio de 23, mientras que de 1982 a 2010 las tasas de crecimiento son, en promedio, de alrededor del 2% anual con valor promedio para el IRE de 52. La Figura IV-20 (b) también da prueba de la relación negativa que existe entre los datos al mostrar que a mayor IRE menores tasas de crecimiento económico. Estos resultados de nueva cuenta nos dan evidencia de la aparente paradoja que ha prevalecido en México a lo largo de las últimas décadas, ya se ha dicho que a partir de finales de los años 70 y principios de los 80 México ha disfrutado la era de mayor abundancia petrolera y los datos del IRE para este periodo corroboran lo anterior al indicar que esta época fue una de energía sumamente barata. Dentro de las razones que se podrían dar y por las cuales no se puede encontrar la relación positiva esperada entre estos datos está, en primer lugar, que la economía no consume petróleo ni gas crudos, la economía requiere de productos procesados (como los derivados del petróleo) y los costos energéticos asociados a este procesamiento no se incluyen en el IRE que aquí se ha utilizado, por tanto es posible que al incluir estos costos pudiera darse una mejor aproximación del verdadero costo energético de la energía y con ello la posibilidad de apreciar la correlación positiva esperada, sin embargo, aunque realmente lo anterior es un punto importante, basados en la evidencia dada sobre los precios de los petrolíferos en México, la explicación a la paradoja parece encontrarse en el hecho de que los precios finales al consumidor no reflejan el verdadero costo de la energía, ni de la que se genera internamente, ni de la que se importa, los siguientes casos dan prueba de este fenómeno.

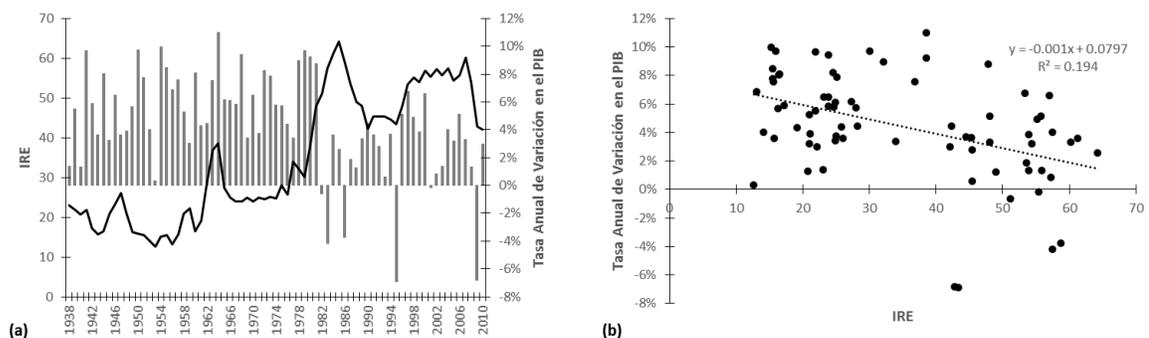


Figura IV-20 (a) IRE para la extracción de petróleo y gas en México y tasas anuales de variación durante el periodo de 1938-2014 y (b) Tasas anuales de variación vs el IRE para la extracción de petróleo y gas en México. Elaborado con los datos del IRE calculados en la sección 3.5 y [142].

En la Figura IV-21 se comparan las series históricas del IRE obtenidas en la sección 3.4 a partir de la información sobre el gasto monetario en gas y/o petrolíferos que se hace a nivel nacional, por construcción, estos valores se refieren al costo energético de la energía que efectivamente se consume dentro de la economía, esto es, al gas y/o petrolíferos utilizados. Esto último es cierto al menos en la teoría ya que como se ha visto, históricamente en México el precio de la energía ha sido manipulado, ya sea para mantener precios bajos en beneficio del desarrollo económico o precios altos en favor de las finanzas públicas. Dicho fenómeno de manipulación de precios provoca que los precios finales que paga el consumidor por la energía en México no reflejen de manera fidedigna el costo de su producción, esto al menos en el caso de la Figura IV-21 (b), en donde los datos utilizados sí contemplan la carga impositiva a petrolíferos, en el caso de la Figura IV-21 (a) es de esperar que los datos reflejen mucho mejor el verdadero costo de la energía debido a que la información para construir el indicador tiene en cuenta los precios del productor los cuales deberían ser suficientes para cubrir los costos de elaboración del producto. La necesidad de tener que utilizar información sobre los precios de la energía para construir las series del IRE provoca que las mismas solo sean un proxy del valor real del IRE de los recursos petroleros que se explotan en el país, sin embargo, el punto más importante que se debe tener en mente es que para la economía que consume estos recursos energéticos esta disparidad no importa demasiado debido a que la única información que los usuarios finales reciben sobre la energía que consumen es a través

de los precios que pagan por ella, así, si la energía es cara porque extraerla es verdaderamente costoso o lo es debido a los altos impuestos que se le imponen o la energía es barata porque obtenerle realmente lo es o esto se debe a una suerte de subsidios, la única información que se recibe en la economía es el hecho de que la energía es cara o barata, de este modo, aunque el retorno energético de la explotación de petróleo y gas en México pudiera tener valores verdaderamente altos tal y como se sugiere en la Figura IV-20 (a), al tener que pagar precios elevados por la energía que se consume, para la economía en realidad pareciera que el costo energético de obtener la energía que utiliza es elevado. En resumen, se puede decir que si por un momento se supone que el precio que los usuarios finales pagan por la energía en México refleja de manera fiel los costos asociados para obtenerle, entonces, el IRE de la energía que se utiliza en el país es precisamente el que vemos en las Figura IV-21 (a) y (b). El efecto neto que se consigue a través del encarecimiento artificial de la energía es que la economía mexicana termina funcionando como si el IRE de los recursos energéticos que consume fuera demasiado bajo. Cuánto tiempo puede mantenerse la manipulación dependerá de cuánto tiempo tarde en manifestarse el verdadero costo físico de explotar los recursos energéticos, pero una vez que esto se manifiesta entonces la situación obligará a que el precio que se paga por ellos refleje la situación física subyacente, lo ocurrido en nuestro país durante los años 70 es prueba de ello, en donde mantener precios artificialmente bajos se hace imposible ante la necesidad de tener que explotar recursos petroleros mucho más costosos, de hecho si vemos la Figura IV-20 (a) podemos apreciar que el IRE muestra un pico en el año de 1964 y luego una tendencia negativa hasta 1970, en donde finalmente se estabiliza, lo anterior quiere decir que durante este periodo, en efecto, el costo energético de obtener la energía que se consumía iba en aumento, sumado a esto, existen elementos para sostener que el IRE guarda una relación positiva con la capacidad exportadora de un país, esto último debido a que la única energía disponible para exportar es aquella que no se utiliza para explotar energía o que no se consume en algún otro sector dentro de la economía, por tanto, al disminuir el IRE, o al aumentar el costo de obtener energía, es de esperar que la capacidad exportadora se vea reducida, es por ello que no parece sorpresa que la disminución en el IRE coincida con el momento temporal en el que México había dejado

de exportar excedentes de petróleo, esto en 1966, y el periodo en el cual se había convertido en un importador neto de este recurso, a partir de 1971.

Teniendo presente la discusión anterior, entonces, es claro que la relación que existe entre el IRE y el crecimiento económico es en efecto positiva, ya que a simple vista se pueden distinguir dos etapas muy diferentes en la historia de nuestro país, en la primera de ellas, de 1938 a 1981, se observa una tendencia general creciente para los valores del IRE con valores alejados de 10 que puede considerarse como el inicio del umbral crítico, al menos matemáticamente hablando, esta primera etapa se acompaña de altas tasas de crecimiento económico. Por otro lado, para los años comprendidos entre 1982 y 2010, la tendencia general observada en el IRE es una de naturaleza negativa y la cual coincide con un deterioro en el desempeño de la economía. Hablando de forma específica, para el caso en el que se han utilizado las ventas internas de Pemex como un proxy del gasto monetario en energía para poder calcular el IRE, se obtiene que en el primer periodo el IRE era, en promedio, de 29.6 mientras que en el segundo este valor disminuye a 24.2. En el segundo caso, en donde se han utilizado los precios promedio de los petrolíferos, se obtiene para el primer periodo un valor de IRE promedio igual a 19.76, mientras que durante el segundo periodo el valor se reduce a 9.43. Las tasas anuales de crecimiento para el primer y segundo periodo son, respectivamente, 6% y 1.89%.

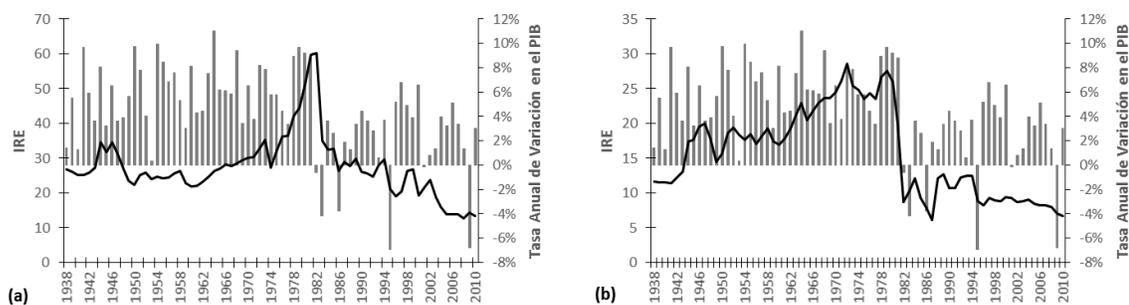


Figura IV-21 (a) IRE para el gas y petrolíferos que se consumen en México calculado a partir de las ventas internas de PEMEX como proxy del gasto monetario realizado en estos productos energéticos y tasas anuales de variación del PIB durante 1938-2010 y (b) IRE para los petrolíferos que se consumen en México calculado a partir del gasto monetario, construido a partir del precio promedio al consumidor y los volúmenes consumidos, realizado en estos productos energéticos y tasas anuales de variación del PIB durante 1938-2010. Elaborado con los datos del IRE calculados en la sección 3.4 y [142].

4.4.1 El IRE Mínimo para que Exista Crecimiento Económico

Todo recurso energético que tenga un IRE mayor a la unidad puede considerarse como una verdadera fuente de energía ya que la energía que se obtiene de su explotación es mayor a la que se invierte en el proceso de explotarle, sin embargo, la cuestión que emerge alrededor de esto último es qué tan alejado debe encontrarse el IRE de este mínimo absoluto como para que la fuente energética de cual se alimenta la sociedad sea capaz de sostener los estándares de vida de las sociedades modernas. Otra forma de ver lo anterior es pensando en qué tan costosos pueden llegar a ser los recursos energéticos sobre los cuales subsiste una sociedad antes de que el costo de explotarlos sea tal que se dé una reducción en la energía y materiales disponibles para dedicar a otro tipo de actividades distintos a los de la obtención de energía. Dada la relación matemática que existe entre el IRE y la energía neta es posible establecer que el límite se encuentra cercano a un valor de 10, la razón para suponer esto se debe a que por debajo de este valor la teoría predice que la cantidad de energía que se debe dedicar a obtener energía crece de manera exponencial reduciendo la cantidad disponible para otras actividades. En este punto vale la pena notar que la energía neta es la energía que se utiliza para llevar a cabo todas las otras actividades económicas distintas a las de extracción de energía, esto es, a la alimentación, a la educación, a la salud, al transporte, a la manufactura, protección y distintas actividades discrecionales, etc. Cuando se dice que la energía neta se “utiliza” nos referimos a que se emplea en mantener todas estas actividades funcionando en sus niveles establecidos pero además también la energía neta es la única energía disponible para incrementar los niveles de producción en cada uno de estos sectores, además de darles mantenimiento cuando se requiere. Lo que se quiere decir aquí es que, la energía neta, que en todo momento es finita, se utiliza en mantener lo que ya existe, reparar o reemplazar aquello que es necesario y además permite aumentar los niveles de producción. De lo anterior se desprende que mantener una dinámica de crecimiento requiere de cantidades crecientes de energía neta y cuando esta empieza a escasear entonces se esperarían ver que la sociedad pierde su capacidad de seguir creciendo los niveles de producción en todos esos otros sectores distintos al energético, en el peor de los casos pierde la capacidad de mantener los niveles de producción alcanzados y se ve obligada a

reducirlos. En esta sección se mostrará como utilizar la aparente existencia de un gasto monetario máximo en energía que la economía puede tolerar antes de entrar en recesión para calcular cuál sería el IRE equivalente dada la situación en la que este gasto máximo se alcanza, este valor sería el IRE mínimo por debajo del cual no existe crecimiento económico.

Para poder calcular el IRE mínimo que la economía mexicana puede tolerar antes de entrar en recesión lo primero que se debe tener presente es que de acuerdo a lo visto en las secciones 1.7.2 y 3.4 el IRE se puede obtener mediante la ecuación (IV-1), en donde, en nuestro caso particular, e_t es la participación relativa de los combustibles fósiles en el consumo total de energía y f_t el gasto monetario que se hace en estos recursos visto como una fracción del PIB.

$$IRE_t = \frac{e_t}{f_t} \quad (IV-1)$$

Si se acepta el hecho de que existe un nivel máximo de gasto en energía que la economía puede tolerar antes de entrar en recesión y lo denotamos por f_{max} , entonces, haciendo uso de la ecuación anterior podemos definir al IRE mínimo que la economía tolera antes de contraerse como:

$$IRE_{min,t} = \frac{e_t}{f_{max}} \quad (IV-2)$$

Previamente se había determinado que para el caso en el que las ventas internas de PEMEX se utilizaron como un proxy del gasto nacional en gas y petrolíferos, el gasto máximo tolerable por la economía es del 7.57%, mientras que en el caso en donde se han utilizado los precios finales al consumidor de la gasolina, el diésel y el combustóleo, el valor que se obtiene es del 7.31%. Haciendo uso de estos valores, junto la participación relativa e_t del gas y petrolíferos en el consumo nacional de energía obtenidos y utilizados

en la sección 3.4, y la ecuación (IV-2) se calcula el IRE mínimo para la economía nacional. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura IV-22, en ella se puede ver, en primer lugar, que el IRE mínimo no es un valor constante sino que, tal y como lo expresa la ecuación (IV-2), es una función del nivel de participación que tienen los combustibles fósiles en la matriz energética nacional. Otro punto que se debe comentar es que la tendencia lineal que se exhibe de 1938 a 1964 se debe a que para este periodo se ha utilizado un ajuste lineal para poder aproximar la participación relativa de los combustibles fósiles en la matriz nacional de energía (ver sección 3.4). Para el caso de gas y petrolíferos el valor promedio del IRE mínimo durante el periodo de 1938 a 2010 es igual a 10.3, mientras que para el caso de los petrolíferos este valor es de 6.7.

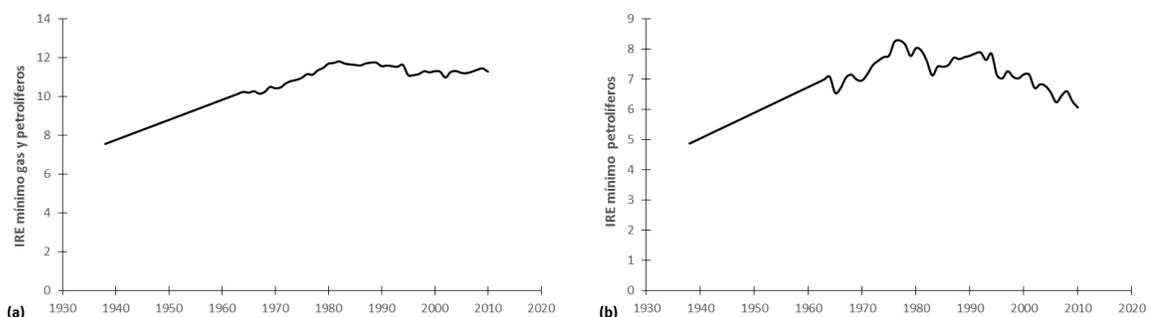


Figura IV-22 (a) IRE mínimo para el gas y petrolíferos por debajo del cual la economía nacional entraría en recesión durante 1938-2010 y (b) IRE mínimo para petrolíferos por debajo del cual la economía nacional entraría en recesión durante 1938-2010.

Una vez calculados los valores del IRE mínimos para la economía nacional estos se pueden comparar contra las series del IRE del gas y/o petrolíferos que se consumen en el país y contra el comportamiento de la economía nacional descrita por las tasas anuales de variación en el PIB, este ejercicio se muestra en la Figura IV-23. Ya se ha dicho antes que las series del IRE calculadas a partir de la información sobre el gasto en energía solo representan un proxy del IRE verdadero de los recursos energéticos que se explotan y consumen en el país, sin embargo, dado que la economía solo reconoce si la energía es cara o barata a través del precio que tiene que pagar por lo que consume, estos valores del IRE constituyen la situación física equivalente que se tendría si los precios de la

energía transmitieran de manera fiel el costo que tiene obtener la energía que se utiliza. De esta manera la situación que se dibuja en la Figura IV-23 es una en donde durante el periodo de 1938 a 1981 la tendencia general en el IRE ha sido alejarse del mínimo que provoca un bajo desempeño económico, mientras que, de 1982 a 2010 la distancia entre el mínimo y el valor observado se ha ido acortando. La Figura IV-23 es especialmente significativa porque en este caso los datos del IRE sí tienen en cuenta los impuestos que se tienen que pagar por los productos petrolíferos que se consumen, lo que podemos apreciar es como el encarecimiento artificial de la energía a través de los impuestos crea un situación física equivalente en la que el IRE se encuentra muy cercano al valor mínimo tolerable, e incluso en algunos puntos, que como se esperaría coinciden con los periodos de recesión, el IRE ha estado por debajo del mínimo.

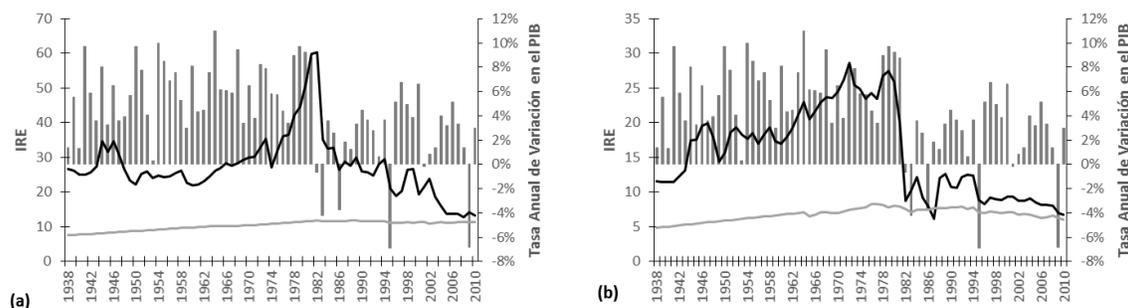


Figura IV-23 (a) IRE para el gas y petrolíferos que se consumen en México, IRE mínimo para estos recursos por debajo del cual existiría recesión económica y tasas anuales de variación del PIB durante 1938-2010 y (b) IRE para los petrolíferos que se consumen en México, IRE mínimo para estos recursos por debajo del cual existiría recesión económica y tasas anuales de variación del PIB durante 1938-2010.

4.4.2 Precio Máximo para que Exista Crecimiento Económico

Arriba se ha mostrado que si se acepta el hecho de que existe un límite máximo para el gasto en energía que la economía puede realizar sin entrar en recesión entonces es posible determinar la existencia de un IRE mínimo, otra forma de ver esta situación, es que debe existir un precio máximo de la energía que la economía se puede permitir pagar por la energía que consume. Para entender esta afirmación considere que de acuerdo a

su definición matemática, el gasto en energía puede expresarse de acuerdo a la ecuación (IV-3), en donde p_i representa el precio del recurso energético i y E_i la cantidad de energía que se consume y que proviene del recurso energético i .

$$f_i = \frac{p_i \cdot E_i}{PIB} \quad (IV-3)$$

Observe que $E_i = e_i \cdot E_{tot}$, donde e_i se refiere a la participación relativa del recurso i en el consumo total de energía E_{tot} . Sustituyendo este hecho en la ecuación anterior se obtiene la ecuación (IV-4) donde \hat{i} se refiere a la intensidad energética de la economía.

$$f_i = \frac{p_i \cdot e_i \cdot E_{tot}}{PIB} = p_i \cdot e_i \cdot \hat{i} \quad (IV-4)$$

Suponiendo que existe un gasto máximo en energía tolerable denotado por f_{max} y resolviendo la ecuación anterior para el precio de la energía, se tiene que el precio máximo de la energía que la economía puede tolerar antes de entrar en recesión es:

$$p_{i,max} = \frac{f_{max}}{e_i \cdot \hat{i}} \quad (IV-5)$$

Lo anterior indica que el precio máximo de la energía que se consume y que proviene del recurso i que la economía puede tolerar sin entrar en recesión es una función de la dependencia que tiene de este recurso energético así como de la eficiencia con la cual la economía utiliza la energía en general estando esto último representado por la intensidad energética de la economía.

Aunque en este trabajo no se determina el precio máximo que pueden tener los recursos energéticos que se consumen en México antes de que causen daño a la economía, el hecho de que, tanto el gasto en energía se haya encontrado en algún momento dentro de los límites máximos tolerables así como la situación equivalente de que el IRE haya estado por debajo de los mínimos requeridos, son indicativos de que en algún momento el precio de uno o varios recursos energéticos consumidos en el país estuvieron por encima de los máximos tolerables, futuras investigaciones podrían confirmar o refutar esta hipótesis, sin embargo, el hecho más importante se encuentra en que la teoría indica que este precio máximo soportable para un recurso en específico, de existir, es una función de la participación particular de la importancia que tiene dicho recurso en la matriz energética que alimenta a la economía y de la eficiencia con la cual se emplea la energía.

4.4.3 El Fin del Petróleo Barato y Abundante en México

Repetidamente se ha señalado que la manipulación de los precios de la energía en México no ha permitido que estos reflejen el costo verdadero que se encuentra asociado a la obtención de la misma, sin embargo, la realidad física subyacente es que con el paso del tiempo obtener petróleo y gas se ha vuelto energéticamente mucho más costoso, este hecho puede apreciarse en el IRE que se ha estimado al comparar la cantidad de energía que se obtiene de la explotación del petróleo y gas en México durante 1999 a 2014 contra la energía que PEMEX reporta haber consumido en el proceso (ver sección 3.1), dichos datos se basan en una medida física y por tanto están libres de la distorsión que se crea al trabajar con una variable económica como lo es el precio que pagan los consumidores por la energía que consumen.

Si lo anterior permite afirmar que el costo energético de la explotación de petróleo y gas en México ha ido en aumento desde principios de siglo, los datos más recientes permiten conocer que esta tendencia no se ha detenido. Al momento de escribir este último capítulo ya se encontraba disponible información que permite conocer cuál ha sido la

evolución del IRE de la extracción de petróleo y gas en nuestro país hasta 2019, sin embargo, se debe tener en cuenta que como resultado de la Reforma Energética de 2013, después de 2014 estos datos se refieren solo al consumo de energía que realiza PEMEX y solo a la producción que esta empresa genera, no obstante, en este trabajo se ha visto (sección 1.9) que el IRE de un sistema compuesto por varios subsistemas, en este caso el IRE de la extracción de petróleo y gas que proviene de varias compañías, es un promedio del IRE de cada subsistema ponderado por la participación que tienen en la producción total, esto es, que la importancia para definir el IRE global depende de que tan fuerte es la participación relativa en la producción total, en el caso que aquí se presenta, se tiene que de acuerdo a los datos de la CNH [158], entre 2016 y 2021, PEMEX continuó siendo el mayor productor de petróleo y gas en el país, participando con el 98% de la producción nacional de petróleo y el 97% de la de gas. Con los datos anteriores se puede afirmar que aunque el IRE se refiere solo al de PEMEX, dada su participación cuasi-única en la producción de petróleo y gas, este IRE refleja la situación a nivel nacional. En la Figura IV-24 se muestra la evolución del IRE hasta 2019, para estimar estos datos se ha utilizado la misma metodología descrita en la sección 3.1.

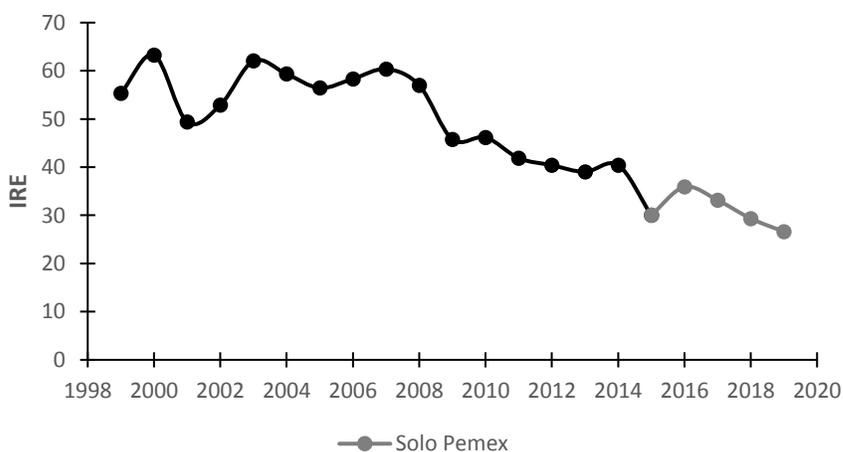


Figura IV-24 IRE para la extracción de petróleo y gas en México durante 1999-2019.

La tendencia a la baja en el IRE ha continuado a la baja pero ¿podría en el futuro revertirse esta situación? Aunque nadie puede conocer con certeza lo que espera en el

futuro, existe evidencia que sugiere que esta tendencia negativa es de una naturaleza terminal y que no podrá ser revertida. Lo anterior se debe a que los recursos que quedan por explotar en México se encuentran en las aguas profundas del Golfo de México, en los yacimientos no convencionales y en el petróleo que todavía se pueda extraer de los campos maduros a través de la aplicación de técnicas de recuperación mejorada. Por la naturaleza física de estos recursos su explotación es costosa tanto en términos económicos como en términos energéticos (estos aspectos representan dos caras de una misma moneda). En la Figura IV-25 se ha ilustrado esta situación al comparar el IRE promedio para la extracción de petróleo y gas en México a lo largo de las últimas siete décadas con el IRE que se ha estimado para recursos petroleros en aguas profundas o el asociado a proyectos en donde se aplican técnicas de recuperación térmica. Para el caso mexicano, antes de 1999 estos datos provienen del IRE calculado a través del modelo lineal de múltiples variables de la sección 3.5 y posterior a este año se basan en los datos presentados en la figura de arriba. La información restante se refiere a las estimaciones que se han hecho para el IRE de la extracción de petróleo y gas en el Golfo de México en el área de EUA (sección 2.2.2), la extracción de petróleo en las aguas profundas en la Región Presal de Brasil [164] y las estimaciones para la recuperación mejorada usando técnicas de recuperación térmicas que usualmente se emplean para campos viejos con petróleos pesados (sección 2.1), aquí no se han incluido las estimaciones del IRE para recursos como el shale gas debido a que, tal y como se comenta a lo largo del segundo capítulo del presente trabajo, todavía parece existir bastante incertidumbre con respecto a este tipo de recursos, esto último debido a situaciones como la falta de información oficial sobre el consumo de energía o a que los límites temporales bajo los cuales se han estudiado este tipo de sistemas no considera flujos anuales de energía sino que considera flujos de energía a lo largo de todo el ciclo de vida de un pozo de extracción, lo anterior previene poder hacer una comparación justa y estricta entre las estimaciones, es por ello que si bien los trabajos realizados apuntan a que este tipo de recursos constituyen un claro productor de energía neta, la experiencia indica que son recursos sumamente costosos de extraer, es posible futuras investigaciones puedan dar mejores mediciones sobre el costo energético de estos recursos. Por el momento, lo que sí se puede decir, siempre teniendo

en cuenta que estos valores solo sirven como una guía aproximada de la realidad, es que el IRE de los recursos en aguas profundas o el asociado a proyectos en donde se aplican procesos de recuperación térmica parecen ser mucho menores a los que históricamente han existido en nuestro país, esto quiere decir que, conforme la producción de petróleo y gas comience a provenir de este tipo de recursos petroleros el IRE de la producción nacional continuará siguiendo una tendencia general a la baja, dicho en otras palabras, que el costo energético de obtener petróleo y gas en México seguirá creciendo a lo largo de los próximos años y aunque el desarrollo tecnológico pueda aliviar en cierto grado esta situación parece poco probable que pueda revertirlo dado que hasta el momento la tendencia negativa en el IRE de la extracción de petróleo y gas tanto a nivel mundial como en otras regiones del mundo es evidencia de que, hasta ahora, los avances tecnológicos no han sido suficientes como para aliviar el incremento en el costo energético que surge como consecuencia del agotamiento del petróleo de “fácil” acceso.

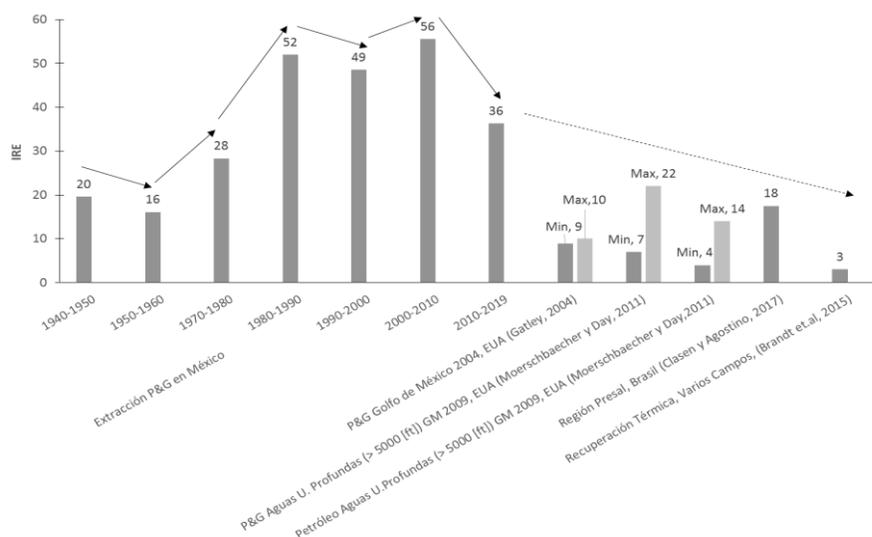


Figura IV-25 El IRE para la extracción de petróleo y gas en México y el IRE asociado a otro tipo de recursos petroleros. Elaborado con datos de la sección 3.5 y [122] [46] [164] [117].

La evidencia disponible parece apuntar a que en México la era del petróleo barato y abundante ha llegado a su fin, nuestro país entra en esta era de energía cara sin haber

podido disfrutar de la abundancia petrolera que prevaleció a lo largo de los últimos 40 años, este último punto encierra cierta paradoja pues como antes se ha señalado, si se quiere sostener la tesis de que la energía es un elemento crítico y vital para el correcto funcionamiento de las economías y su crecimiento, entonces, se deben encontrar explicaciones al por qué a lo largo de las cuatro décadas anteriores el desempeño económico del país ha sido tan pobre, en este sentido, ante los datos mostrados se hace imposible sostener que la disponibilidad de energía haya representado un límite al crecimiento económico nacional, en realidad, en lo que respecta a la energía, el problema es que aunque esta fuera abundante también era costosa como resultado de las políticas fiscales internas que comenzaron a aplicarse durante la segunda mitad de los años 70, aquí se debe aclarar que el problema no radica realmente en la aplicación de impuestos como tal, sino en la magnitud de estos. Como se ha visto, la evidencia empírica disponible, tanto para nuestro país como para otros, apunta a la existencia de límites máximos tolerables en cuestiones como el gasto en energía o el precio de la energía por encima de los cuales el crecimiento económico se ve afectado, los impuestos aplicados a los derivados del petróleo en México parecen haber sido de tal magnitud que llevaron a dichas variables a niveles cercanos a estos máximos y por momentos incluso por encima de los mismos. En pocas palabras, las políticas fiscales aplicadas en las últimas décadas consiguieron transformar la era de mayor abundancia energética para el país en una era de energía sumamente costosa (al menos en términos relativos), con ello, el binomio de energía barata y abundante, el cual se ha observado constituye un elemento necesario, aunque no suficiente, para que pueda darse el crecimiento económico no ha existido desde entonces.

En el contexto actual los recursos energéticos fósiles que quedan por ser aprovechados en México ya no requieren de la aplicación de impuestos para encarecer artificialmente la energía, las condiciones físicas, químicas, geológicas y técnicas que se necesitan para poder explotarles y procesarles hacen que por naturaleza estos recursos sean altamente costosos, y esto último lo es, tanto en términos energéticos, materiales, y por lo tanto lo es en términos económicos. No es solo la obtención de la energía lo que se hace más costoso, sino que usarla también lo es, el mundo en el cual vivimos es uno que

se encuentra en franco deterioro ambiental y ante ello seguir utilizando recursos energéticos como el petróleo y gas para alimentar a nuestras sociedades exige y obliga (o al menos debería) a que también se tomen medidas para mitigar sus impactos sobre el medio ambiente, esto quiere decir que no solo se tiene que dedicar más y más energía y materiales a explotar el petróleo y gas que aún quedan en el subsuelo sino que también se debe invertir en mitigar los impactos asociados a su uso, todo ello reduciendo la disponibilidad de recursos que podrían potencialmente aprovecharse en otras actividades. Ante el fin de la era del petróleo y gas baratos y abundantes debe ser claro que el desarrollo económico en México basado en el uso de estos recursos simplemente no puede seguir porque los elementos que hacen posible este modelo ya no existen más, por ejemplo, aunque revertir la declinación en la producción de petróleo y gas parece técnicamente posible esta labor se encuentra atada a la necesidad de sostener precios altos de la energía para poder llevarse a cabo lo cual resultaría perjudicial para la economía en el mediano y largo plazo. Aunque genuinamente creemos que el modelo desarrollo en México no puede seguirse sosteniendo en el uso de combustibles fósiles también somos conscientes de que superarlo supone un reto monumental y no constituye una labor que pueda conseguirse de la noche a la mañana, el reto por delante se encuentra en el cómo aprovechar el petróleo y gas que aún se tiene para poder construir el futuro.

Conclusiones

- México y el mundo se enfrentan a una situación paradójica en donde mantener una dinámica de crecimiento económico basado en el uso de combustibles fósiles requiere obtener energía de recursos que por su naturaleza física requieren de altos precios para ser explotados y este incremento en los precios puede terminar por disminuir o aniquilar el crecimiento buscado.
- La crisis climática actual hace necesaria una transición hacia las fuentes renovables. Sin embargo, dicha transición solo será posible mediante el uso de petróleo, gas y carbón. El hecho de que el IRE de estos recursos esté disminuyendo es un llamado urgente a hacer un uso mucho más racional de los mismos y diseñar políticas para la reducción global del consumo de energía.
- La caída en el IRE asociado a las actividades de extracción de petróleo y gas, junto con el declive en la producción de estos recursos, es un claro indicador de que en México la era del petróleo abundante y barato ha llegado a su fin.
- Sumado al declive en la producción de hidrocarburos, la disminución en el IRE de la extracción de petróleo y gas a nivel nacional compromete la existencia en el futuro de los dos factores que han sido clave para el desarrollo económico basado en el uso de combustibles fósiles, esto es, la disponibilidad de energía barata y abundante.
- Un modelo de desarrollo económico y social basado en el uso de petróleo y gas no parece sostenible en el largo plazo y apostar por este podría hacer de México un país dependiente de las exportaciones de otros, debido a que la disminución en el IRE reduce la capacidad de cualquier nueva producción para satisfacer la demanda interna.
- Aunque genuinamente parece que un modelo de desarrollo económico y social basado en el uso de combustibles fósiles no puede continuar, también se debe aceptar que superarlo es una tarea que no puede conseguirse de la noche a la

mañana. El petróleo y gas continuaran siendo por mucho tiempo nuestras principales fuentes de energía (además de conformar recursos esenciales para la obtención de petroquímicos los cuales son indispensables para la vida moderna) al entender que cada vez se tendrá que dedicar más y más energía y otros recursos en explotarlos entonces debe reconocerse la importancia de hacer un uso racional de estos recursos. El petróleo y gas que aún quedan deben alcanzar para mantener operando, al menos, los aspectos más básicos de las sociedades, como lo son, la alimentación, la salud y la educación, pero además, también constituyen la base sobre la cual se va a construir el futuro.

- En vista de lo anterior consideramos que el petróleo y el gas, y por extensión, la industria petrolera y todas aquellas profesiones dedicadas a esta área profesional, principalmente las y los ingenieros petroleros, tendrán un papel fundamental en la transición energética, pues serán los encargados de suministrar de energía para construirla, pero, para poder cumplir cabalmente con este llamado y afrontar los retos que se tienen por delante, se requiere que estos profesionistas cuenten con una visión tan amplia como sea posible y que no esté limitada a una lógica económica que busque maximizar ganancias. Las y los ingenieros petroleros requieren de una formación integral y holística, que les permita entender la importancia del ejercicio de su profesión para la sociedad, son ellas y ellos, los primeros que deben ser capaces de señalar los peligros que se corren al seguir apostando por el uso de estos recursos energéticos además de ser capaces de explicar el por qué hoy parece imposible seguir sosteniendo economías en ellos. Debido al estrecho desarrollo histórico que la economía nacional ha tenido con la industria petrolera no parece haber nadie mejor que aquellos formados en la ingeniería petrolera para entender el reto que supone para nuestro país el fin del petróleo barato.
- Como fue señalado en el tercer capítulo de este documento, la información referente al uso de materiales durante los procesos de extracción de hidrocarburos en nuestro país no se encuentra disponible y es por ello que la estimación del

verdadero consumo de energía que se realiza durante estas actividades solo es una aproximación. Futuros trabajos de investigación podrían incorporar esta información y de esta manera mejorar el nivel de certidumbre en el cálculo de IRE.

- No está claro qué tipo de beneficios se podrían obtener al calcular de forma regular el IRE de un proyecto petrolero y combinar esta información con datos económicos. Responder a esta cuestión requiere que se realicen investigaciones desde y para la ingeniería petrolera.

Referencias

- [1] L. A. White, «Energy and the Evolution of Culture,» *American Anthropologist*, vol. 45, nº 3, pp. 335-356, 1943.
- [2] F. Cottrell, *Energy & Society (Revised): The Relation Between Energy, Social Change, and Economic*, Author House, 2009.
- [3] H. T. Odum, «Energy, Ecology, and Economics,» *Ambio*, vol. 2, nº 6, pp. 220-227, 1973.
- [4] N. Georgescu Rogen, «Energy and Economic Myths,» *Southern Economic Journal*, vol. 41, nº 3, pp. 347-381, 1975.
- [5] V. Smil, *Energy Transitions: History, Requirements, Prospects*, Praeger, 2010.
- [6] C. A. Hall y K. Kent, *Energy and the Wealth of Nations: An Introduction to Biophysical Economics*, Springer, 2018.
- [7] C. A. Hall, «Migration and Metabolism in a Temperate Stream Ecosystem,» *Ecology*, vol. 53, nº 4, pp. 585-604, 1972.
- [8] C. A. Hall, *Energy Return on Investment: An Unifying Principle for Biology, Economics and Sustainability*, Springer, 2017.
- [9] C. A. Editors: Hall y D. Hansen, «Special Issue: New Studies in EROI (Energy Return on Invested),» 2011.
- [10] A. R. Brandt y M. Dale, «A General Mathematical Framework for Calculating Systems-Scale Efficiency of Energy Extraction and Conversion: Energy Return on Investment (EROI) and Other Energy Return Ratios,» *Energies*, nº 4, pp. 1211-1245, 2011.
- [11] C. W. King, «Matrix method for comparing system and individual energy return ratios when considering an energy transition,» *Energy*, nº 72, pp. 254-265, 2014.
- [12] C. King, J. P. Maxwell y A. Donovan, «Comparing World Economic and Net Energy Metrics, Part 1: Single Technology and Commodity Perspective,» *Energies*, nº 8, p. 12949–12974, 2015.
- [13] D. Pimentel y T. Patzek, «Ethanol Production Using Corn, Switchgrass and Wood; Biodiesel Production Using Soybean,» de *Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems*, Springer Science+Business Media B.V., 2008, pp. 373-394.

- [14] S. Kim y B. E. Dale, «Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: Bioethanol and biodiesel,» *Biomass and Bioenergy*, nº 29, pp. 426-439, 2005.
- [15] C. A. Hall, B. E. Dale y D. Pimentel, «Seeking to Understand the Reasons for Different Energy Return on Investment (EROI) Estimates for Biofuels,» *Sustainability*, nº 3, pp. 2413-2432, 2011.
- [16] F. Ferroni y R. J. Hopkirk, «Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation,» *Energy Policy*, nº 94, pp. 336-3344, 2016.
- [17] D. Weißbach, G. Ruprecht, A. Huke, K. Czerski, S. Gottlieb y A. Hussein, «Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants,» *Energy*, nº 52, pp. 210-221, 2013.
- [18] P. A. Prieto y C. A. Hall, *Spain's Photovoltaic Revolution: the energy return on investment*, New York: Springer Briefs in Energy, 2013.
- [19] M. Raugei, P. Fullana-i-Palmer y V. Fthenakis, «The energy return on energy investment (EROI) of photovoltaics: Methodology and comparisons with fossil fuel life cycles,» *Energy Policy*, nº 45, pp. 576-582, 2012.
- [20] Y. Zhang y L. M. Colosi, «Practical ambiguities during calculation of energy ratios and their impacts on life cycle assessment calculations,» *Energy Policy*, nº 57, pp. 630-633, 2013.
- [21] K. Mulder y N. J. Hagens, «Energy Return on Investment: Toward a Consistent Framework,» *Ambio*, vol. 37, nº 2, pp. 74-79, 2008.
- [22] A. R. Brandt, M. Dale y C. J. Barnhart, «Calculating systems-scale energy efficiency and net energy returns: A bottom-up matrix-based approach,» *Energy*, nº 62, pp. 235-247, 2013.
- [23] D. J. Murphy, C. A. Hall, M. Dale y C. Cleveland, «Order from Chaos: A Preliminary Protocol for Determining the EROI of Fuels,» *Sustainability*, vol. 3, nº 1888-1907, 2011.
- [24] C. A. Hall, S. Balogh y D. J. Murphy, «What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have?,» *Energies*, nº 2, pp. 25-47, 2009.
- [25] V. Court, *Energy, EROI, and Economic Growth in a Long-Term Perspective. Ph.D. Thesis in Economics, Université Paris Nanterre*, Paris, 2016.
- [26] C. J. Cleveland, «Net energy analysis,» 25 Agosto 2013. [En línea]. Available: https://editors.eol.org/eoearth/wiki/Net_energy_analysis. [Último acceso: 2019].
- [27] R. A. Hereden, «Net energy analysis: Concepts and methods,» de *Encyclopedia of Energy Vol.4*, Nueva York, Elsevier, 2004, pp. 283-289.

- [28] M. Raugei, «Net energy analysis must not compare apples and oranges,» *Nature Energy*, nº 4, pp. 86-88, 2019.
- [29] G. K. Zipf, *Human behavior and the principle of least effort: An introduction to human ecology*, Addison Wesley, 1949.
- [30] Y. Zhu, B. Zhang, Q. A. Wang, W. Li y X. Cai, «The principle of least effort and Zipf distribution,» *Journal of Physics: Conference Series*, nº 1113, 2018.
- [31] V. Court y F. Fizaine, «Long-Term Estimates of the Energy-Return-on-Investment (EROI) of Coal, Oil, and Gas Global Productions,» *Ecological Economics*, nº 138, pp. 145-159, 2017.
- [32] BP, «BP Statistical Review of World Energy 2018,» 2018.
- [33] M. Raugei, E. Leccisi, V. Fthenakis, R. Escobar y M. Yeliz, «Net energy analysis and life cycle energy assessment of electricity supply in Chile: Present status and future scenarios,» *Energy*, vol. 162, pp. 659-668, 2018.
- [34] M. Raugei y E. Leccisi, «A comprehensive assessment of the energy performance of the full range of electricity generation technologies deployed in the United Kingdom,» *Energy Policy*, vol. 90, pp. 46-59, 2016.
- [35] P. E. Brockway, A. Owen, L. I. Brand-Correa y L. Hardt, «Estimation of global final-stage energy-return-on-investment for fossil fuels with comparison to renewable energy sources,» *Nature Energy*, vol. 4, pp. 612-621, 2019.
- [36] J. Feng, L. Feng y J. Wang, «Analysis of Point-of-Use Energy Return on Investment and Net Energy Yields from China's Conventional Fossil Fuels,» *Energies*, nº 11, 2018.
- [37] A. R. Brandt, «Oil Depletion and the Energy Efficiency of Oil Production: The Case of California,» *Sustainability*, nº 3, pp. 1833-1854, 2011.
- [38] A. Fuentes, C. García, A. Hennecke y O. Masera, «Life cycle assessment of Jatropha curcas biodiesel production: a case study in Mexico,» *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 20, p. 1721-1733, 2018.
- [39] M. C. Guilford, C. A. Hall, P. O'Connor y C. J. Cleveland, «A New Long Term Assessment of Energy Return on Investment (EROI) for U.S. Oil and Gas Discovery and Production,» *Sustainability*, nº 3, pp. 1866-1887, 2011.
- [40] L. Grandell, C. A. Hall y M. Höök, «Energy Return on Investment for Norwegian Oil and Gas from 1991 to 2008,» *Sustainability*, nº 3, pp. 2050-2070, 2011.
- [41] Y. Hu, C. A. Hall, J. Wang, L. Feng y A. Poisson, «Energy Return on Investment (EROI) of China's conventional fossil fuels: Historical and future trends,» *Energy*, nº 54, pp. 352-364, 2013.

- [42] J. Freise, «The EROI of Conventional Canadian Natural Gas Production,» *Sustainability*, nº 3, pp. 2080-2104, 2011.
- [43] R. Nogovitsyn y A. Sokolov, «Preliminary Calculation of the EROI for the Production of Gas in Russia,» *Sustainability*, nº 6, pp. 6751-6765, 2014.
- [44] R. Parra, «Análisis del sistema de extracción de petróleo a partir del uso de la Tasa de Retorno Energética (TRE) para el caso del Ecuador,» de *Ecological Economics and Social-Ecological Movements. Science, policy and challenges to global processes in a troubled world*, Ciudad de México, UAM, 2019, pp. 123-137.
- [45] H. Yaritani y J. Matsushima, «Analysis of the Energy Balance of Shale Gas Development,» *Energies*, nº 7, pp. 2207-2227, 2014.
- [46] M. Moerschbaecher y J. W. Day Jr., «Ultra-Deepwater Gulf of Mexico Oil and Gas: Energy Return on Financial Investment and a Preliminary Assessment of Energy Return on Energy Investment,» *Sustainability*, nº 3, pp. 2009-2026, 2011.
- [47] A. R. Brandt, «Converting Oil Shale to Liquid Fuels: Energy Inputs and Greenhouse Gas Emissions of the Shell in Situ Conversion Process,» *Environmental Science & Technology*, nº 42, pp. 7489-7495, 2008.
- [48] A. R. Brandt, J. Englander y S. Bharadwaj, «The energy efficiency of oil sands extraction: Energy return ratios from 1970 to 2010,» *Energy*, Vols. %1 de %2693-702, nº 55, 2013.
- [49] A. R. Brandt, T. Yeskoo y K. Vafi, «Net energy analysis of Bakken crude oil production using a well-level engineering-based model,» *Energy*, nº 93, pp. 2191-2198, 2015.
- [50] N. Lior, «Exergy, energy, and gas flow analysis of hydro-fractured shale gas extraction,» *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 138, 2015.
- [51] M. L. Aucott y J. M. Melillo, «A Preliminary Energy return on investment analysis of natural gas from the Marcellus Shale,» *Journal of Industrial Ecology*, nº 17, p. 668-679, 2013.
- [52] J. Wang, M. Liub, B. C. McLellanc, X. Tanga y L. Fenga, «Environmental impacts of shale gas development in China: A hybrid life cycle analysis,» *Resources, Conservation and Recycling*, nº 120, pp. 38-45, 2017.
- [53] S. B. Ferrante y A. Giuliani, «Hidrocarburos no convencionales en Vaca Muerta (Neuquén): ¿Recursos estratégicos para el autoabastecimiento energético en la Argentina del siglo XXI?,» *Estado y Políticas Públicas*, nº 3, pp. 33-61, 2014.
- [54] B. Sell, D. Murphy y C. A. Hall, «Energy Return on Energy Invested for Tight Gas Wells in the Appalachian Basin, United States of America,» *Sustainability*, nº 3, pp. 1986-2008, 2011.

- [55] A. Freitas Oliveira, F. Gasi y S. R. Lourenço, «Energy Return on Investment (EROI) of Brazilian Coal Production,» *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, vol. 6, pp. 156-162, 2019.
- [56] A. R. Brandt, «Converting Oil Shale to Liquid Fuels with the Alberta Taciuk Processor: Energy Inputs and Greenhouse Gas Emissions,» *Energy & Fuels*, nº 23, pp. 6253-6258, 2009.
- [57] R. Atlason y R. Unnthorsson, «Hot water production improves the energy return on investment of geothermal power plants,» *Energy*, vol. 51, pp. 273-280, 2013.
- [58] M. W. Gilliland, «Energy Analysis and Public Policy,» *Science*, vol. 189, pp. 1051-1056, 1975.
- [59] J. G. Lambert, C. A. S. Hall y S. Balogh, *EROI of Global Energy Resources – Status, Trends and Social Implications*, 2013.
- [60] F. Fizaine y V. Court, «Energy expenditure, economic growth, and the minimum EROI of society,» *Energy Policy*, nº 95, pp. 172-186, 2016.
- [61] Banco Mundial, «Banco Mundial, Datos,» 2019. [En línea]. Available: <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.CD?locations=MX.-MX>. [Último acceso: 2019].
- [62] UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME, «Human Development Reports,» [En línea]. Available: <http://hdr.undp.org/en/content/human-development-index-hdi>. [Último acceso: 2019].
- [63] D. T. Morgan, «Perfect Storm: Energy, Finance and the end of Growth,» 2013.
- [64] B. Leiva, *Energy's Place in Economic Theory*, 2012.
- [65] M. Common y S. Sigrid, *Ecological Economics*, Cambridge University Press, 2005.
- [66] J. Gowdy, *Coevolutionary Economics: The Economy, Society and the Environment*, Springer, 1994.
- [67] A. Valero C. y A. Valero D, *Thanatia: The Destiny of the Earth's Mineral Resources*, World Scientific, 2015.
- [68] J. H. Brown, W. R. Burnside, A. D. Davidson, J. R. DeLong, W. C. Dunn, M. J. Hamilton, N. Mercado-Silva, J. C. Nekola, J. G. Okie, W. H. Woodruff y W. Zuo, «Energetic Limits to Economic Growth,» *BioScience*, vol. 61, nº 1, pp. 19-26, 2011.
- [69] N. Mosaddeq Ahmed, *Failing States, Collapsing Systems: Biophysical Triggers of Political Violence*, Springer, 2017.
- [70] C. W. King, «Energy intensity ratios as net energy measures of United States energy production and expenditures,» *Environmental Research Letters*, nº 5, 2010.

- [71] C. W. King y C. A. Hall, «Relating Financial and Energy Return on Investment,» *Sustainability*, nº 3, pp. 1810-1832, 2011.
- [72] M. K. Heun y M. de Wit, «Energy return on (energy) invested (EROI), oil prices, and energy transitions,» *Energy Policy*, nº 40, pp. 147-158, 2012.
- [73] C. W. King, «ON RELATING US AND UK ENERGY EXPENDITURES (NET ENERGY), DEBT, AND INTEREST RATES,» 2014. [En línea]. Available: http://careyking.com/wp-content/uploads/2014/12/King-2014-USAAE_NetEnergyDebt.pdf. [Último acceso: 2019].
- [74] C. W. King, J. P. Maxwell y A. Donovan, «Comparing World Economic and Net Energy Metrics, Part 2: Total Economy Expenditure Perspective,» *Energies*, nº 8, p. 12975–12996, 2015.
- [75] L. I. Brand-Correa, P. E. Brockway, C. L. Copeland, T. J. Foxon, A. Owen y P. G. Taylor, «Developing an Input-Output Based Method to Estimate a National-Level Energy Return on Investment (EROI),» *Energies*, nº 10, 2017.
- [76] P. Kalimeris, C. Richardson y K. Bithas, «A meta-analysis investigation of the direction of the energy-GDP causal relationship: implications for the growth-degrowth dialogue,» *Journal of Cleaner Production*, nº 67, pp. 1-13, 2014.
- [77] J. E. Payne, «Survey of the international evidence on the causal relationship between energy consumption and growth,» *Journal of Economic Studies*, vol. 37, nº 1, pp. 53-95, 2010.
- [78] K. Bithas y P. Kalimeris, *Revisiting the Energy-Development Link*, Springer, 2016.
- [79] L. Ferrari, «Energía Finita en un Planeta Finito,» *Revista Digital Universitaria*, vol. 14, nº 9, 2013.
- [80] M. K. Hubbert, «Nuclear Energy and the Fossil Fuels,» 1956.
- [81] A. R. Brant, «Testing Hubbert,» *Energy Policy*, nº 35, pp. 3074-3088, 2007.
- [82] J. L. Hallock, W. Wu, C. A. Hall y J. Michael, «Forecasting the limits to the availability and diversity of global conventional oil supply: Validation,» *Energy*, nº 64, pp. 130-153, 2014.
- [83] G. Maggio y G. Cacciola, «When will oil, natural gas, and coal peak?,» *Fuel*, nº 98, pp. 111-123, 2012.
- [84] S. Mohr, J. Wang, G. Ellem, J. Ward y D. Giurco, «Projection of world fossil fuels by country,» *Fuel*, nº 141, pp. 120-135, 2015.
- [85] G. Kallis y J. Sager, «Oil and the economy: A systematic review of the literature for ecological economists,» *Ecological Economics*, vol. 131, p. 561–571, 2017.
- [86] S. P. Brown y M. K. Yücel, «Energy prices and aggregate economic activity: an interpretative survey,» *The Quarterly Review of Economics and Finance*, vol. 42, nº 2, pp. 193-208, 2002.

- [87] L. Kilian, «The Economic Effects of Energy Price Shocks,» *Journal of Economic Literature*, vol. 46, nº 4, pp. 871-909, 2008.
- [88] J. D. Hamilton, «Oil and the Macroeconomy,» de *The New Palgrave Dictionary of Economics*, London, Palgrave Macmillan, 2018, pp. 9753-9759.
- [89] J. Rubin y P. Buchanan, «What's the Real Cause of the Global Recession?,» *StrategEcon, CIBC World Markets Inc.*, pp. 4-6, 2008.
- [90] J. D. Hamilton, «Historical Oil Shocks,» *NBER working paper*, nº 16790, 2011.
- [91] D. J. Murphy y C. A. Hall, «Energy return on investment, peak oil, and the end of economic growth,» *ANNALS OF THE NEW YORK ACADEMY OF SCIENCES*, pp. 52-72, 2011.
- [92] S. Alexander, «The Paradox of Oil: The Cheaper it is, the More it Costs,» de *Planning after petroleum: Preparing cities for the age beyond oil*, New York, Routledge, 2016, pp. 24-36.
- [93] H. Wachtmeister y M. Höök, «Investment and production dynamics of conventional oil and unconventional tight oil: Implications for oil markets and climate strategies,» *Energy and Climate Change*, vol. 1, 2020.
- [94] W. Mitchell, L. R. Wray y M. Watts, «A Brief Overview of Economic History and the Rise of Capitalism,» de *Macroeconomics*, Londres, Red Globe Press, 2019, pp. 38-50.
- [95] D. B. Reynolds, «The mineral economy: how prices and costs can falsely signal decreasing scarcity,» *Ecological Economics*, vol. 31, nº 1, pp. 155-166, 1999.
- [96] T. Morgan, «The Surplus Energy Economy,» 2020. [En línea]. Available: <https://surplusenergyeconomics.wordpress.com/resources/>. [Último acceso: 2020].
- [97] S. Michaux, «Rising Cost of Oil Production,» de *Oil from a Critical Raw Material Perspective*, Geological Survey of Finland, 2019, pp. 166-170.
- [98] Energy, Rystad, «Oil production costs reach new lows, making deepwater one of the cheapest sources of novel supply,» 21 Octubre 2020. [En línea]. Available: <https://www.rystadenergy.com/newsevents/news/press-releases/oil-production-costs-reach-new-lows-making-deepwater-one-of-the-cheapest-sources-of-novel-supply/>. [Último acceso: 2020].
- [99] C. W. King, «Comparing World Economic and Net Energy Metrics, Part 3: Macroeconomic Historical and Future Perspectives,» *Energies*, nº 8, p. 12997–13020, 2015.
- [100] I. Bashmakov, «Three laws of energy transitions,» *Energy Policy*, nº 35, p. 3583–3594, 2007.
- [101] M. Aucott y C. Hall, «Does a Change in Price of Fuel Affect GDP Growth? An Examination of the U.S. Data from 1950–2013,» *Energies*, nº 7, pp. 6558-6570, 2014.

- [102] G. E. Tverberg, «Oil supply limits and the continuing financial crisis,» *Energy*, vol. 37, pp. 27-34, 2012.
- [103] A. Poisson y C. A. S. Hall, «Time Series EROI for Canadian Oil and Gas,» *Energies*, nº 6, pp. 5940-5959, 2013.
- [104] Rystad Energy, «RYSTAD ENERGY RANKS THE CHEAPEST SOURCES OF SUPPLY IN THE OIL INDUSTRY,» 5 Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://www.rystadenergy.com/newsevents/news/press-releases/Rystad-Energy-ranks-the-cheapest-sources-of-supply-in-the-oil-industry/>. [Último acceso: 2019].
- [105] L. Ferrari y E. Ocampo Tellez, «Tendencias globales en energía y perspectiva de México,» de *Futuro de la Energía en México*, México, Juan Pablo Editor y Consejo Nacional de Universitarios, 2019, pp. 17-44.
- [106] M. Dale, S. Krumdieck y P. Bodger, «A Dynamic Function for Energy Return on Investment,» *Sustainability*, nº 3, pp. 1972-1985, 2011.
- [107] PEMEX, «Informe de Sustentabilidad,» Varios Años. [En línea]. Available: <http://www.pemex.com/etica-e-integridad/sustentable/informes/Paginas/informes.aspx>. [Último acceso: 2019].
- [108] PEMEX, «Anuario Estadístico,» Varios Años. [En línea]. Available: <http://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Paginas/AnuarioEstadistico.aspx>. [Último acceso: 2019].
- [109] International Energy Agency, «IEA - Energy Balances Flows,» [En línea]. Available: <https://www.iea.org/sankey/>. [Último acceso: 2019].
- [110] C. A. Hall, «Introduction to Special Issue on New Studies in EROI (Energy Return on Investment),» *Sustainability*, nº 3, pp. 1773-1777, 2011.
- [111] J. G. Lambert, C. A. Hall, S. Balogh, A. Gupta y M. Arnold, «Energy, EROI and quality of life,» *Energy Policy*, nº 64, pp. 153-167, 2014.
- [112] A. Maslow, «A theory of human motivation,» *Psychological Review*, nº 50, pp. 370-396, 1943.
- [113] J.-C. Debeir, J.-P. Deleage y D. Hemery, In the servitude of power: energy and civilisation through the ages, London: Zed Books, 1991.
- [114] V. Court, «An Estimation of Different Minimum Energy Return Ratios Required for Society,» *BioPhysical Economics and Resource Quality*, 2019.
- [115] W. Steffen, W. Broadgate, L. Deutsch, O. Gaffney y C. Ludwig, «The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration,» *The Anthropocene Review*, vol. 2, nº 1, pp. 81-98, 2010.

- [116] R. Constanza y C. Cleveland, *Ultimate Recoverable Hydrocarbons in Louisiana : A Net Energy Approach*, Louisiana State University, 1983.
- [117] A. R. Brandt, Y. Sun, S. L. D. Bharadwaj, E. Tan y D. Grodon, «Energy Return on Investment (EROI) for Forty Global Oilfields Using a Detailed Engineering-Based Model of Oil Production,» *PLoS ONE*, nº 10, 2015.
- [118] V. S. Tripathi y A. R. Brandt, «Estimating decades-long trends in petroleum field energy return on investment (EROI) with an engineering-based model,» *Plos ONE*, 2017.
- [119] N. Gagnon, C. A. Hall y L. Brinker, «A Preliminary Investigation of Energy Return on Energy Investment for Global Oil and Gas Production,» *Energies*, nº 2, pp. 490-503, 2009.
- [120] Stanford University, «Stanford University: OPGEE: The Oil Production Greenhouse gas Emissions Estimator,» [En línea]. Available: <https://eao.stanford.edu/research-areas/opgee>. [Último acceso: 2020].
- [121] J. Feng, L. Feng, J. Wang y C. W. King, «Modeling the point of use EROI and its implications for economic growth in China,» *Energy*, nº 144, pp. 232-242, 2018.
- [122] M. Gatley, «The EROI of U.S. offshore energy extraction: A net energy analysis of the Gulf of Mexico,» *Ecological Economics*, nº 63, pp. 355-364, 2007.
- [123] C. J. Cleveland y P. A. O'Connor, «Energy Return on Investment (EROI) of Oil Shale,» *Sustainability*, nº 3, pp. 2307-2322, 2011.
- [124] G. I. Atwater, J. Boak y J. P. Riva, «Encyclopædia Britannica: Oil Shale,» Encyclopædia Britannica, inc., 28 Enero 2020. [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/science/oil-shale>. [Último acceso: 31 Enero 2020].
- [125] J. R. Dyni, «Geology and Resources of Some World Oil-Shale Deposits: U.S. Geological Survey Scientific,» 2006.
- [126] Y. Hu, L. Feng, C. C. Hall y D. Tian, «Analysis of the Energy Return on Investment (EROI) of the Huge Daqing Oil Field in China,» *Sustainability*, nº 3, pp. 2323-2338, 2011.
- [127] Canada Petroleum Producers, «CAPP: Canada's Energy Mix,» [En línea]. Available: <https://www.capp.ca/energy/canadas-energy-mix/>. [Último acceso: 2020].
- [128] Canadian Petroleum Producers, «CAPP: What are the Oil Sands?,» [En línea]. Available: <https://www.capp.ca/oil/what-are-the-oil-sands/>. [Último acceso: 2020].
- [129] K. Wang, H. Vredenburg, J. Wang, Y. Xiong y L. Feng, «Energy Return on Investment of Canadian Oil Sands Extraction from 2009 to 2015,» *Energies*, vol. 10, nº 5, 2017.

- [130] C. Ramirez Pascualli y C. A. S. Hall, «The Relation of Oil to the Mexican economy: past, present and future,» de *Ecological Dimensions for Sustainable Socio Economic Development*, WIT Press, 2013, pp. 119-150.
- [131] L. Celi, C. Della Volpe, L. Pardi y S. Siboni, «A New Approach to Calculating the “Corporate” EROI,» *BioPhysical Economics and Resource Quality*, 2018.
- [132] Society of Petroleum Engineers, «Unit Conversion Factors,» [En línea]. Available: <https://www.spe.org/industry/unit-conversion-factors.php>. [Último acceso: 7 Mayo 2019].
- [133] Secretaría de Energía, *LISTA de combustibles que se considerarán para identificar a los usuarios con un patrón de alto consumo, así como sus factores para determinar las equivalencias en términos de barriles equivalentes de petróleo*, 2010.
- [134] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, «Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México,» 2014.
- [135] PEMEX, «Memoria de Labores,» Varios.
- [136] EIA, «Carbon Dioxide Emissions Coefficients,» 2016. [En línea]. Available: https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php. [Último acceso: 2019].
- [137] P.M.I Comercio Internacional, «Tipos de petróleo crudo,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.pmi.com.mx/Paginas/Tipoproducto.aspx?IdSec=14&IdPag=53>. [Último acceso: 2019].
- [138] W. D. McCain, *Properties of Petroleum Fluids*, PennWell, 1990.
- [139] C. N. Jardine, «Calculating the Environmental Impact of AviationEmissions,» 2009.
- [140] R. Kaufmann, «Imported Petroleum,» de *Energy and Resource Quality: The Ecology of the Economic Process*, New York, Wiley, 1986.
- [141] SENER, «Sistema de Información Energética,» [En línea]. Available: <http://sie.energia.gob.mx/>. [Último acceso: 2019].
- [142] A. Aparicio Cabrera, «Series estadísticas de la economía mexicana en el siglo XX,» *Economía Informa*, nº 369, pp. 63-85, 2011.
- [143] D. Castañeda, «Energising Mexico: Historical Energy Consumption, Transitions and Economic Growth 1880-2015,» *Economics, Finance and AID*, vol. 1, 2021.
- [144] J. Bolt y J. L. van Zanden, «The Maddison Project: Maddison style estimates of the evolution of the world economy. A new 2020 update,» *Maddison-Project Working Paper WP-15*, 2020.
- [145] A. C. Gonzalez-Martinez y H. Schandl, «The biophysical perspective of a middle income economy: Material flows in Mexico,» *Ecological Economics*, vol. 68, pp. 317-327, 2008.

- [146] A. C. González Martínez, «Material Flow Accounting of Mexico (1970-2003) Sources and Methods,» *UHE/UAB-10.01. Working paper*, 2007.
- [147] INEGI, «Banco de Información Económica,» [En línea]. Available: <https://www.inegi.org.mx/sistemas/bie/default.aspx>. [Último acceso: 2019].
- [148] INEGI, «Estadísticas Históricas de México 2014,» 2015.
- [149] INEGI, «La industria petrolera en México,» 1979.
- [150] J. D. Hamilton, «Economic Costs of America's Dependence on Oil,» 2012.
- [151] M. Aguirre Botello, «México Maxico - Comparación del precio de la gasolina México-USA 1938-2021,» 24 Septiembre 2021. [En línea]. Available: <http://mexicomaxico.org/Voto/GasolMexUSA.htm>. [Último acceso: 2021].
- [152] O. M. Guzmán, «Domestic Pricing Policy,» de *Energy policy in Mexico*, Westview, 1988, pp. 406-420.
- [153] F. Colmenares, «Petróleo y crecimiento económico en México 1938-2006,» *Economía UNAM*, vol. 5, nº 15, pp. 53-65, 2008.
- [154] I. Morales, C. Escalante y R. Vargas, *La Formación de la Política Petrolera en México 1970-1986*, Ciudad de México: Colegio de México, 1988.
- [155] J. A. Del Río Monges, M. Rosales Reyes, V. Ortega Olvera y S. O. Maya Hernández, «Análisis de la Reforma Energética,» 2017.
- [156] I. Alpizar–Castro y C. Rodríguez–Monroy, «Review of Mexico's energy reform in 2013: Background, analysis of the reform and reactions,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 725-736, 2016.
- [157] J. Cañas y M. D. Plante, «'Reforma Energética': Mexico Takes First Steps to Overhaul Oil Industry,» *Southwest Economy-Federal Reserve Bank of Dallas*, pp. 16-19, 2014.
- [158] CNH, «Sistema de Información de Hidrocarburos,» 2020. [En línea]. Available: <https://sih.hidrocarburos.gob.mx/>. [Último acceso: 2020].
- [159] B. Sovilla, E. Gómez-Ramírez y M. Sánchez-Pérez, «La reforma energética y el problema petrolero en México,» *Revista CEA*, vol. 7, nº 13, 2021.
- [160] M. Lepetit, «Is Monetary Policy (Carbon) Neutral?,» 26 Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/monetary-policy-carbon-neutral-michel-lepetit/>. [Último acceso: 2020].

- [161] D. Hernández Martínez , «La Producción Petrolera Mexicana: Análisis Histórico y Escenario a Futuro,» 2017.
- [162] SENER, «Prospectiva de petróleo crudo y petrolíferos 2015-2029,» Secretaria de Energía, México, 2015.
- [163] R. Roberts, J. Kaviti Musango, A. Colin Brent y M. Kuperus Heun, «The Correlation between Energy Cost Share, Human, and Economic Development: Using Time Series Data from Australasia, Europe, North America, and the BRICS Nations,» *Energies*, vol. 11, nº 9, 2018.
- [164] A. P. CLASEN y F. AGOSTINHO, «Avaliação da eficiência energética do petróleo do pré-sal,» *Petro & Química*, nº 376, pp. 22-29, 2018.
- [165] F. Robelius, «Giant Oil Fields - The Highway to Oil,» 2007.
- [166] L. Ferrari, «Energías fósiles: diagnóstico, perspectivas e implicaciones económicas,» *Revista Mexicana de Física*, nº 59, pp. 36-43, 2013.
- [167] I. Herrera y E. González, Recursos del subsuelo siglos XVI al XX, Oceano, 2004.
- [168] CNH, «El Futuro de la Producción de Aceite en México: Recuperación Avanzada y Mejorada IOR-EOR,» 2012. [En línea]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/149844/IOR_EOR_published.pdf.
- [169] Banco Mundial, «Banco Mundial Datos - Rentas del petróleo (% del PIB),» [En línea]. Available: <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.PETR.RT.ZS?locations=MX>. [Último acceso: 2019].