

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO
FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS Y ESTADÍSTICA
LICENCIATURA EN ECONOMÍA



SEMINARIO DE INTEGRACIÓN Y APLICACIÓN
TRABAJO FINAL

(SUSTENTABILIDAD DEL DESARROLLO. GÉNERO,
ECOLOGÍA Y DESIGUALDADES SOCIOECONÓMICAS)

*El Aporte Energético de Vaca Muerta a la Matriz Energética
Nacional: una mirada desde la Economía Ecológica*

MAMAI MAZZUCCO, ALEXIS

(Legajo: M-6141/7)

DOCENTE A CARGO DE LA COMISIÓN: Guillermo Peinado.

2° cuatrimestre de 2019

Los yacimientos de hidrocarburos más sencillos de explotar han ido agotándose a lo largo del tiempo por la voracidad de un sistema económico que se sostiene gracias a la disponibilidad de fuentes de energía no renovables, pero abundantes y relativamente baratas. En este marco, los hidrocarburos que antes parecían inalcanzables por las dificultades de su extracción, hoy se han vuelto atractivos, como el caso del petróleo en aguas profundas o los yacimientos de rocas de baja porosidad. En este contexto es que el yacimiento no convencional Vaca Muerta, ubicado en la Patagonia Argentina cobra importancia. En este trabajo se analizará el aporte de las actividades de extracción de hidrocarburos, principalmente los extraídos con métodos no convencionales, a la Matriz Energética Nacional Argentina, desde el punto de vista de la Economía Ecológica. Para ello, se utilizará como principal herramienta el indicador de la Tasa de Retorno Energético, y se analizará el caso particular de la generación de energía eléctrica en centrales térmicas a partir de gas natural extraído con métodos no convencionales, en la Argentina.

Índice

1. Introducción.....	3
2. Marco teórico.....	4
2.1 Economía Ecológica.....	4
2.2 La Tasa de Retorno Energético (TRE).....	6
3. Metodología.....	7
4. Análisis de la TRE para diferentes fuentes de energía útil.....	9
4.1 Evolución de la TRE del petróleo y gas a lo largo del tiempo.....	11
4.2 El caso de Canadá.....	13
5. La TRE de Vaca Muerta y la Matriz Energética Argentina.....	14
5.1 TRE de la generación de energía eléctrica a partir de gas no convencional en la Argentina.....	16
6. Consideraciones finales.....	18
Referencias bibliográficas.....	20
Anexo.....	22

1. Introducción

La situación actual de las reservas comprobadas de hidrocarburos a nivel mundial resulta alarmante. En 1956, Hubbert presentó un modelo con el cual predijo que el pico de producción de petróleo en EEUU se daría en 1970, y efectivamente sucedió en 1971. Dicha predicción ha sido revisada por Kenneth Deffeyes con datos actualizados, presentando el modelo de pico de petróleo de Hubbert-Deffeyes. Éste predice que la producción mundial de petróleo está a punto de alcanzar su punto máximo y que una vez que esto ocurra, la disminución de la producción y las presiones sobre los precios tendrán consecuencias profundas y graves en la economía mundial. Si bien la mayoría de los observadores creen que la producción debe eventualmente llegar a un pico, ya sea porque las reservas están físicamente agotadas o porque un sustituto los hace económicamente inviables, el modelo de pico de petróleo afirma que éste es tanto inminente como inevitable (Boyce, 2012).

En este sentido, los yacimientos de hidrocarburos más sencillos de explotar han ido agotándose progresivamente, haciendo atractivas reservas cuya extracción es más compleja y costosa. Ejemplo de ello son las perforaciones en aguas profundas en el Golfo de México y el Atlántico de Brasil, o las arenas bituminosas de Canadá y Venezuela. También lo son los yacimientos de hidrocarburos no convencionales, ya que su explotación se ha vuelto atractiva por el agotamiento de recursos más accesibles. A su vez, estos se extraen porque el precio internacional del crudo se ha mantenido alto en los últimos años (Zandvliet, 2011).

En la Argentina ha surgido en un gran interés por el descubrimiento de enormes reservas de petróleo y gas, extraíble con métodos no convencionales, ubicados en la Patagonia: el Yacimiento Hidrocarbúfero Vaca Muerta. Se trata de una formación rocosa de baja permeabilidad, cuyos hidrocarburos pueden ser extraídos con la técnica de la fracturación hidráulica.

Esta técnica, consiste en realizar una perforación hasta alcanzar la roca de esquisto donde se encuentra atrapado el petróleo o gas, y luego inyectar a alta presión grandes cantidades de agua con aditivos químicos y arena para fracturar la roca y generar fisuras por donde se libera el hidrocarburo. Cuando éste comienza a fluir hacia la superficie, lo hace con parte del fluido inyectado a alta presión. La diferencia con los yacimientos convencionales es que el petróleo o gas no ha migrado a un reservorio, y para extraerlo es necesario fracturar la roca donde se encuentra (Martins, Alejandra, 2013).

Según datos de la Administración de Información Energética de los Estados Unidos (EIA, por sus siglas en inglés) actualizados a septiembre de 2015, la Argentina posee en yacimientos no convencionales 801,5 billones de pies cúbicos de gas técnicamente recuperables. Sólo China posee mayores recursos de gas no convencional con 1.115,2 billones de pies cúbicos. Luego se encuentra Argelia con 706,9 Estados Unidos con 622,5 Canadá con 572,9 y México con 545,2 (Administración de Información Energética de los Estados Unidos, 2015).

Además, los datos allí presentados muestran que la Argentina cuenta con la cuarta reserva de petróleo no convencional, con 27 mil millones de barriles técnicamente recuperables, después de los Estados Unidos con 78,2 mil millones de barriles, Rusia con 74,5 y China con 32,2.

Estas reservas que posee la Argentina, se encuentran principalmente en el Yacimiento Hidrocarburífero Vaca muerta, con casi 308 billones de pies cúbicos de gas no convencional (el 38% del total del país) y 16,22 mil millones de barriles de petróleo no convencional (el 60%) (Riera, 2017).

Dada la magnitud de los yacimientos encontrados y la situación actual de las reservas mundiales de hidrocarburos, resulta de vital importancia analizar el impacto que la explotación del Yacimiento Vaca Muerta pueda tener sobre la Matriz Energética Nacional Argentina. Para ello, se propone una mirada desde la Economía Ecológica para poder ofrecer una visión más abarcativa del tema, haciendo hincapié en indicadores de rentabilidad y eficiencia en términos energéticos, en lugar de monetarios. En este sentido, se pondrá especial atención la Tasa de Retorno Energético como medida de eficiencia, que será la base del presente análisis.

En primer lugar, se procederá a realizar una comparación de los resultados de diferentes análisis realizados sobre la Tasa de Retorno Energético de los hidrocarburos convencionales, no convencionales y otras fuentes renovables, y su evolución a lo largo del tiempo. Previamente, será necesario definir dicha tasa de forma clara, sus límites y métodos de cálculo.

Luego, en una segunda instancia, se realizará un análisis de la Matriz Energética Argentina en relación a la Tasa de Retorno Energético, para determinar si resulta energéticamente conveniente la explotación de combustibles fósiles, particularmente los extraídos utilizando métodos no convencionales, en comparación con otras fuentes de energía, teniendo en cuenta la cadena de transformación de la misma hasta llegar al consumo final. Es preciso que se dé una transición en la Matriz Energética Argentina y global hacia fuentes renovables, cuidando las reservas de hidrocarburos y haciendo un uso eficiente de la energía disponible.

2. Marco Teórico:

2.1 Economía Ecológica.

Como se anunció en la introducción, el presente trabajo se abordará desde la óptica de la Economía Ecológica. En este apartado se brindará una definición de la misma, y de los conceptos más relevantes, para el presente análisis, de su herramienta teórica.

La Economía Ecológica no es una rama fértil, ni un apéndice más o menos independiente de la teoría económica, sino que es un campo de estudios transdisciplinar. Puede definirse como la ciencia de la gestión de la sostenibilidad, y como tal, estudia las interacciones entre la sociedad y la naturaleza, muy por encima de los limitados abordajes, tanto de la Economía como de la Ecología, ciencias con las que se relaciona, al igual que con otras que estudian con firmeza la problemática ambiental compleja: la Ecología Política, la Agroecología, la Sociología, la Ecología de Paisajes o la Ecología Urbana (Pengue, 2017, pág. 110).

El objeto de estudio de la Economía Ecológica es entonces el problema de la sostenibilidad. Pero su principal característica resulta ser que no se apoya sólo en la economía tradicional sino también en otras disciplinas, lo que la hace más completa y abarcativa. Por esta razón es que se ha optado por posicionarse desde su óptica para realizar y sustentar el presente análisis.

La Economía Ecológica estudia a las sociedades en su relación con su entorno natural, como si fueran organismos vivos, que tienen funciones como las de captación de la energía, utilización de los recursos y energía de la naturaleza y eliminación de sus residuos. En este análisis, se introduce el término “metabolismo social” para referirse a tal interacción entre la sociedad y la naturaleza. Ésta consiste básicamente en la apropiación, circulación, transformación, consumo y excreción, por parte de la sociedad, de materia y energía proveniente de su entorno natural (Fischer-Kowalski & Haberl, 2000).

Se distinguen dos tipos de metabolismo cualitativamente diferentes que puede presentar una sociedad. Por un lado ésta puede mostrar un metabolismo básico, donde sus miembros viven de las fuentes renovables que pueden extraer de su biosfera local. Se sustenta en la reproducción natural de los recursos, ya que cada uno tiene un mecanismo natural de reciclaje, que transforma los desechos del metabolismo social en recursos nuevamente utilizables. Por otro lado, las sociedades con un metabolismo ampliado, se sustentan principalmente en la movilización de recursos desde fuera de la biosfera, denominados recursos no renovables, que explotan más rápidamente que su ritmo de reposición natural. En este tipo de sociedades, el problema de la escasez se soluciona sólo parcialmente y poniendo los recursos al límite de la sobreexplotación (Fischer-Kowalski & Haberl, 2000).

Por otro lado, la Economía Ecológica adopta la teoría de sistemas para la comprensión de los fenómenos ecológicos y los integra a los estudios de los límites físicos y biológicos debidos al crecimiento económico (Pengue, 2017, pág. 172).

Desde esta perspectiva, se plantea que la economía es un subsistema abierto sustentado por el ecosistema finito, que tiene como máximo la biósfera, la cual recibe una determinada cantidad de energía solar. El subsistema económico toma continuamente una parte de esta energía, en forma de materias primas y energía útil (fósil, hidráulica, etc.), y a su vez devuelve al ecosistema residuos, en forma de calor disipado y residuos potencialmente reciclables (Quiroga, 2003).

De este modo, se genera un flujo unidireccional de energía, llamado transflujo, cuya fuente original es el sol, hasta una conversión final en energía no reutilizable o contaminación (Pengue, 2017). Como el subsistema económico se inserta dentro de un sistema finito, resulta que sus posibilidades de expansión también lo son.

Resulta interesante observar, a los fines del presente análisis, los aportes de Saar Van Hauwermeiren (1999) acerca de la relación entre las leyes de la termodinámica y el proceso económico. La primera ley de la termodinámica, la ley de la conservación de la energía, afirma que la materia y la energía no pueden destruirse ni crearse. La segunda ley, conocida como la ley de entropía, estipula que mientras no haya fuentes externas de energía, la entropía siempre se incrementa. Ésta puede entenderse como una medida de la no disponibilidad de materia o energía. Por ejemplo, cuando se quema un combustible (de baja entropía), la materia y la energía que contenía no desaparece (primera ley) sino que se

disipa en calor, humo y demás residuos (de alta entropía), por lo que pasa a ser inaccesible (segunda ley). En estos términos, el proceso productivo lo que hace es absorber materiales y energía de baja entropía, y entregar materiales y energía en las mismas cantidades, pero de alta entropía (reduciendo su accesibilidad) (Hauwermeiren, 1999, págs. 53 - 55).

Con el objeto de analizar la sostenibilidad de una sociedad, la Economía Ecológica propone, a diferencia de la Economía Ambiental, adoptar el concepto de sostenibilidad fuerte, en donde el capital natural no es equivalente ni sustituible por el capital humano. Al ofrecer una mirada interdisciplinaria, utiliza para su análisis indicadores biofísicos que exceden lo monetario, como como la Huella Ecológica, la Biocapacidad o el Espacio Ambiental, la Apropiación Humana de la Producción Primaria Neta (HANNP), la Tasa de Retorno Energético, el MIPS o Mochila Ecológica, etc. (Tobasura Acuña, 2008).

Por esta razón, es que la Tasa de Retorno Energético (TRE) será la herramienta principal del presente trabajo para analizar la eficiencia de las actividades de extracción, procesamiento y transformación de los recursos y fuentes de energía útil, de baja entropía, principalmente combustibles fósiles.

2.2 La Tasa de Retorno Energético (TRE)

De acuerdo a la primera ley de la termodinámica, para obtener energía útil (para realizar un trabajo) es necesario tomar algún recurso o fuente de energía, y realizar con él un proceso de transformación que dependerá de qué recurso se trate y de la tecnología empleada. En este proceso, parte de la energía se perderá en forma de calor, vibración, transformaciones químicas, electromagnéticas, etc. Además, para el proceso de transformación del recurso en energía útil no sólo se utilizará el recurso en sí mismo, sino que serán necesarios otros insumos, e invertir esta energía en crear y mantener cierta infraestructura.

Considerando que gran parte de la energía que utiliza nuestra sociedad proviene de fuentes agotables como son los combustibles fósiles, resulta necesario conocer la cantidad de energía útil que se obtiene de ellos y la que se invierte. El índice que compara estas dos magnitudes se llama Tasa de Retorno Energético (TRE) (Camargo & Schweickardt, 2014).

El concepto de indicadores e índices se refiere a los mismos como información que es parte de un proceso específico de gestión. De manera general los indicadores e índices se elaboran para cumplir con las funciones de: simplificación, cuantificación, análisis y comunicación, permitiendo entender fenómenos complejos, haciéndolos cuantificables y comprensibles, para que puedan ser analizados en un contexto dado y comunicarse a los diferentes niveles de la sociedad (Adriaanse, 1993).

En este trabajo se utilizarán como sinónimos los términos TRE, EROI (*Energy Return On Investment*) y EROEI (*Energy Return On Energy Invested*). Será necesario definir de manera adecuada dicho concepto, ya que será esencial a lo largo del análisis. Para ello, se tomará la definición de quien se reclama el inventor del concepto, el profesor Charles A. S. Hall (Prieto, 2006).

$$TRE = \frac{\text{Energía Entregada a la Sociedad}}{\text{Energía Depositada en la Actividad}}$$

Dicho de otro modo, la TRE es el cociente entre la cantidad de energía de libre disponibilidad que se obtiene al realizar cierta actividad, y la cantidad de energía utilizada en la misma.

El indicador resulta de suma importancia, ya que, como indica su creador, "(...) es un medio para medir la calidad de varios combustibles mediante el cálculo de la relación entre la energía entregada por un combustible particular a la sociedad y la energía invertida en la captura y entrega de esta energía" (Hall, Lambert, & Balongh, 2013).

El análisis se extiende más allá de los combustibles, sino a toda forma de generación de energía útil.

La importancia del análisis de la TRE radica en las características del mismo:

1. Proporciona un resultado numérico útil para realizar comparaciones con otros cálculos similares.
2. Es una medida útil de la calidad de los recursos. Una TRE alta para un recurso sería, *ceteris paribus*, mejor que uno bajo.
3. Proporciona información adicional a las medidas estándar de medición de los recursos.
4. Permite realizar un análisis intertemporal al estudiar la variación de la TRE de un determinado recurso a lo largo del tiempo (Murphy, Hall, Dale, & Cleveland, 2011).

Estas características serán ampliamente utilizadas a lo largo del trabajo, principalmente para llevar a cabo el análisis comparativo entre diferentes fuentes de energía útil y su evolución a lo largo del tiempo.

3 Metodología:

Para aprovechar las ventajas de éste indicador, el método de cálculo debe tener consistencia, pero a la vez tener cierta flexibilidad (Murphy, Hall, Dale, & Cleveland, 2011).

Para obtener índices comparables, será necesario establecer los límites del análisis. A tal fin, Hall, Balongh, & Murphy (2009) han propuesto los siguientes tipos de índices en función de hasta donde se quiera llegar con el estudio, y la disponibilidad de información. Los mismos, se han ordenado desde el menos abarcativo hasta el más completo:

- TRE Standard: en la boca del pozo.
- TRE pou: TRE en el punto de uso.

$$TRE_{pou} = \frac{\text{Energía devuelta a la sociedad}}{\text{Energía requerida para obtener y entregar esa energía}}$$

- TRE extendido: modifica la ecuación anterior para incluir la energía requerida para usar esa energía.

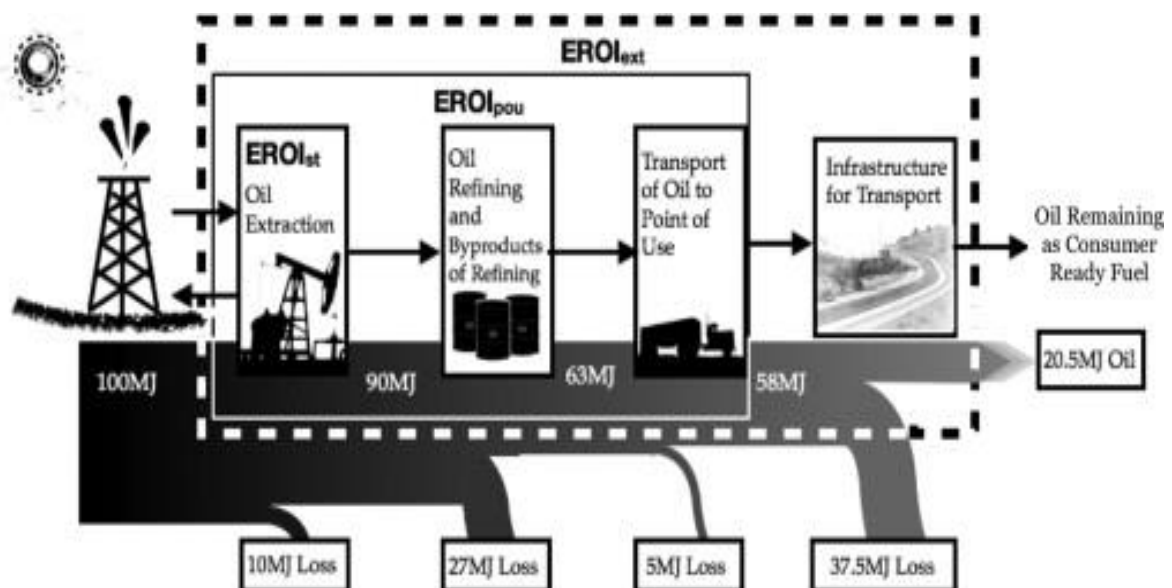
$$TRE_{ext} = \frac{\text{Energía devuelta a la sociedad}}{\text{Energía requerida para obtener, entregar y usar esa energía}}$$

- TRE soc: es la TRE más completa, y tiene en cuenta todos los combustibles obtenidos y todos los costos de energía que se utilizaron para obtener estos combustibles.

$$TRE_{soc} = \frac{\text{Resumen del contenido energético de todos los combustibles entregados}}{\text{Resumen de todos los costos de energía para obtener esos combustibles}}$$

A modo de ejemplo, se mostrarán en el siguiente gráfico los límites de varios tipos de análisis de la TRE y pérdida de energía, asociados con el procesamiento del petróleo a medida que se transforma de "petróleo en la boca del pozo" a combustibles listos para el consumidor.

Gráfico 1: Tipos de TRE según los límites del análisis, expresado en Mega Jouls.



Fuente: Hall, Lambert, & Balogh (2013)

Durante el presente análisis se procurará trabajar con los índices más completos que se encuentren disponibles, para lograr resultados más confiables y representativos. De ser necesario, se hará la aclaración correspondiente en cada caso.

Por otro lado, resulta lógico suponer una unidad extractora de combustible consumirá energía irregularmente a lo largo del tiempo. En un primer momento, será necesaria cierta cantidad de energía para poner en funcionamiento la unidad *Ec*. Durante la etapa operacional la energía necesaria para su funcionamiento puede suponerse constante *E_{op}*, mientras genera un flujo de energía positivo *E_g*. Y al final de su vida útil, será necesario utilizar energía para desmantelar la unidad *Ed*. Para salvar esta problemática, usualmente se calcula repartiendo los input y output de energía uniformemente a lo largo del tiempo, con un promedio simple (Murphy, Hall, Dale, & Cleveland, 2011).

4. Análisis de la TRE para diferentes fuentes de energía útil.

Se observará el comportamiento de la tasa de retorno energético de diferentes combustibles y fuentes de energía útiles. Para ello, se tomará como base la recopilación de datos realizada por Murphy y Hall (2010), cuyos resultados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Valores Publicados de la TRE de diferentes fuentes de energía, años y regiones.

Recurso	Año	País	TRE *	Fuente
Combustibles Fósiles (petróleo y gas)				
Producción de petróleo y gas	1999	Global	35	Gagnon, 2009
Producción de petróleo y gas	2006	Global	18	Gagnon, 2009
Petróleo y Gas propio	1970	EEUU	30	Cleveland et al. 1984, Hall et al. 1986
- Exploración	1970	EEUU	8	Cleveland et al. 1984, Hall et al. 1986
- Producción	1970	EEUU	20	Cleveland et al. 1984, Hall et al. 1986
Petróleo y gas (propio)	2007	EEUU	11	Guilford et al. 2011
Petróleo y gas (importado)	2007	EEUU	12	Guilford et al. 2011
Producción de petróleo y gas	1970	Canadá	65	Freise, 2011
Producción de petróleo y gas	2010	Canadá	15	Freise, 2011
Producción de petróleo, gas y arenas bituminosas	2010	Canadá	11	Poisson y Hall, en preparación
Producción de petróleo y gas	2008	Noruega	40	Grandell, 2011
Producción de petróleo	2008	Noruega	21	Grandell, 2011
Producción de petróleo y gas	2009	México	45	Ramirez, en preparación
Producción de petróleo y gas	2010	China	10	Hu et al, 2013
Combustibles Fósiles (otros)				
Gas Natural	2000	EEUU	80	Sell et al, 2011
Gas Natural	1993	Canadá	38	Freise, 2011
Gas Natural	2000	Canadá	26	Freise, 2011
Gas Natural	2009	Canadá	20	Freise, 2011
Carbón (en boca de mina)	1950	EEUU	80	Cleveland et al, 1984
Carbón (en boca de mina)	2000	EEUU	80	Hall y Day, 2009
Carbón (en boca de mina)	2007	EEUU	60	Balogh et al, sin publicar

	Carbón (en boca de mina)	1995	China	35	Hu et al, 2013
	Carbón (en boca de mina)	2010	China	27	Hu et al, 2013
Otros no renovables					
	Nuclear	n/a	EEUU	5 a 15	Hall y Day, 2009, Lenzen, 2008
Renovables **					
	Energía Hidroeléctrica	n/a	n/a	>100	Cleveland et al. 1984
	Energía Eólica	n/a	n/a	18	Kubiszewski et al, 2010
	Energía Geotérmica	n/a	n/a	n/a	Gupta and Hall, 2011
	Energía Marítima	n/a	n/a	n/a	Gupta and Hall, 2011
Colectores Solares					
	Placa Plana	n/a	n/a	1.9	Cleveland et al. 1984
	Colector de Concentración	n/a	n/a	1.6	Cleveland et al. 1984
	Fotovoltaica	n/a	n/a	6 a 12	Kubiszewski et al. 2009
	Pasivo	n/a	n/a	n/a	Cleveland et al. 1984
Biomasa					
	Etanol de Caña de Azúcar	n/a	n/a	0.8 a 10	Goldemberg, 2007
	Etanol de Maíz	n/a	EEUU	0.8 a 1.6	Patzek, 2004, Farrell et al. 2006
	Biodiesel	n/a	EEUU	1.3	Pimentel y Patzek, 2005

* TRE mayores a 5 se han redondeado a su número entero más cercano.

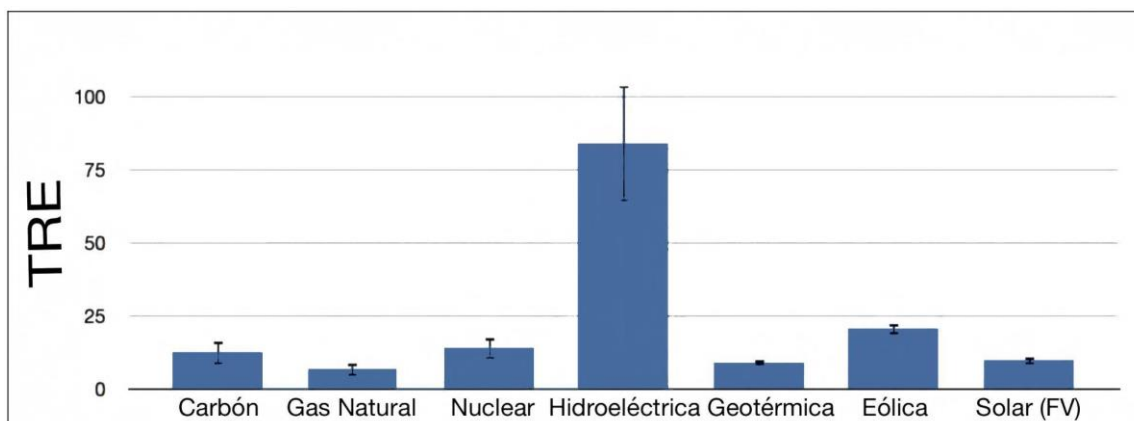
** TRE de las energías renovables puede variar según cuestiones climáticas y geográficas, no atribuibles a una región o país específico.

Fuente: Murphy & Hall (2010)

Los resultados de estos estudios indican que los combustibles con una TRE más altos refieren al carbón, y al petróleo y gas extraídos con métodos convencionales; los combustibles fósiles extraídos de arenas bituminosas (*tar sands*) y con el método de fractura hidráulica muestran resultados sensiblemente menores, al igual que el biodiesel y el etanol (Lambert, Hall, & Balogh, 2013).

¿Qué sucede cuando se utilizan combustibles para la generación de energía eléctrica? Los resultados cambian considerablemente debido a la pérdida de energía durante el proceso. En el siguiente gráfico se muestran una recopilación de datos de la TRE para la generación de energía eléctrica a partir de diferentes fuentes, con su desvío estándar.

Gráfico 2: TRE de la generación energía de diferentes fuentes, con su error estándar.



Fuente: Hall, Lambert, & Balongh (2013)

El gráfico muestra que la TRE del gas natural que se utiliza para la generación de energía eléctrica es menor que para el carbón (para el mismo fin), que la nuclear, la geotérmica, solar (fotovoltaica), eólica e hidroeléctrica, siendo ésta última la más eficiente energéticamente.¹

4.1 Evolución de la TRE del petróleo y gas a lo largo del tiempo.

Al analizar la evolución intertemporal de la Tasa de Retorno Energético de los hidrocarburos, los datos presentados en la Tabla 1 indican una clara tendencia a la baja en la TRE para todas las regiones observadas y los distintos tipos de combustibles fósiles, a excepción del Carbón en boca de mina en EEUU entre 1950 y 2000, cuya TRE se mantiene en 80, pero que luego desciende a 60 hacia el año 2007.

Para obtener una mirada más detallada sobre el tema, se estudiarán los resultados del análisis a largo plazo de la Tasa de Retorno Energético de la exploración y producción de petróleo y gas en EEUU entre 1919 y 2007 obtenidos por Guilford, Hall, O'Connor & Cleveland (2011). Los resultados del mismo se muestran en la tabla 2.

Se observa una clara tendencia a la baja en TRE a largo plazo para las actividades de exploración. Es decir que, según estos resultados, los combustibles fósiles requieren progresivamente una mayor inversión de energía para ser hallados en EEUU.

¹ De la Tabla 1 se puede llegar a la misma conclusión, donde la energía hidroeléctrica arroja una TRE mayor a 100, muy por encima de todo el resto de las fuentes de energía, incluso que los combustibles fósiles extraídos con métodos tradicionales.

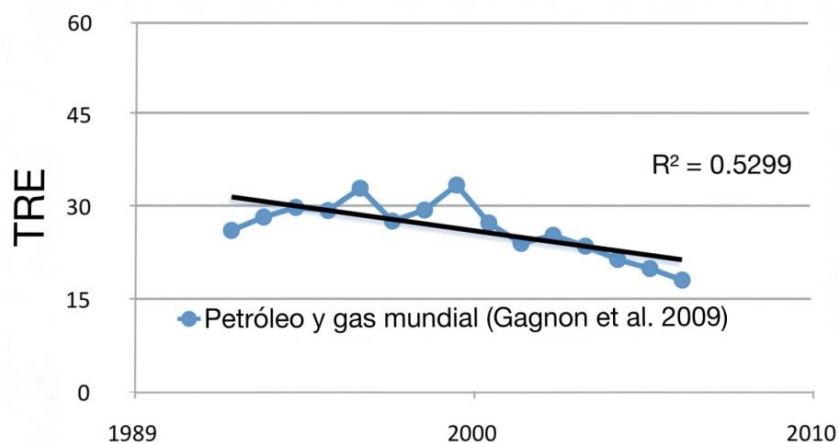
Tabla 2: Evolución Histórica de la TRE de la Exploración y Producción de petróleo en EEUU.

Año	TRE Exploración	TRE Producción
1919	1229,48	15,79
1939	295,36	19,93
1954	61,1	23,72
1958	31,34	17,68
1963	13,61	18,99
1972	11,61	19,85
1977	5,5	10,79
1982	3,42	7,73
1987	9,67	14,54
1992	4,74	16,24
1997	7,08	14,23
2002	8,86	15,23
2007	5,02	10,65

Fuente: Elaboración propia, en base a datos de Guilford, Hall, O'Connor & Cleveland (2011)

Para el análisis de la evolución de la TRE global para petróleo y gas en las últimas décadas, el principal problema parece ser la disponibilidad de datos confiables, como explican Lambert, Hall & Balogh (2013), ya que la mayoría de la extracción proviene de compañías petroleras nacionales, cuyos registros tienden a no ser públicos. En este sentido, Gagnon, Hall y Brinker (2009) lograron generar una TRE global aproximada para las compañías de petróleo y gas que cotizan en bolsa. Los resultados de dicha investigación se sintetizan en el Gráfico 3.

Gráfico 3: TRE Global del petróleo y gas: Valores y tendencia



Fuente: Lambert, Hall, & Balogh (2013)

La TRE para la producción mundial de petróleo y gas, medido por Mega Jules (MJ) de petróleo y gas producido dividido por el equivalente MJ de los dólares gastados en exploración, desarrollo y producción fue de aproximadamente 26 en 1992, aumentó a aproximadamente 35 en 1999, y desde entonces ha disminuido constantemente a 18 en 2006 (Gagnon, Hall, & Brinker, 2009).

Este patrón en forma de domo, parece ocurrir siempre que haya un conjunto de datos lo suficientemente largo, y puede ser originado por mejoras técnicas iniciales que luego se agotan en el tiempo (Lambert, Hall, & Balogh, 2013).

En base a estos argumentos, se podrá inferir que la tendencia a largo plazo de la TRE de la explotación de hidrocarburos es en general decreciente, y que no hay motivos para pensar que pueda modificarse.

4.2 El caso de Canadá:

Ya que hasta el momento no existen investigaciones de público conocimiento que hayan analizado la TRE de la extracción de hidrocarburos en la Argentina ni de la extracción de combustibles de yacimientos no convencionales, se procederá a analizar la situación particular de Canadá, por tratarse de un caso representativo en cuanto a la práctica de este tipo de métodos de extracción. Allí, la fractura hidráulica comenzó a utilizarse para la extracción de petróleo y gas en 1951, aunque no con el nivel de tecnología que se utiliza hoy en día (Wood, 2014).

Para el año 2017 se estimó que el 80% de los nuevos pozos para extraer petróleo y gas en Canadá se hacían con el método de la fractura hidráulica y que existían unos 200.000 pozos de estas características en funcionamiento (Minkow, 2017).

Por estas razones, en el próximo apartado de este trabajo se utilizarán los datos de éste país como aproximación a los valores de la TRE de la explotación de hidrocarburos no convencionales en la Argentina.

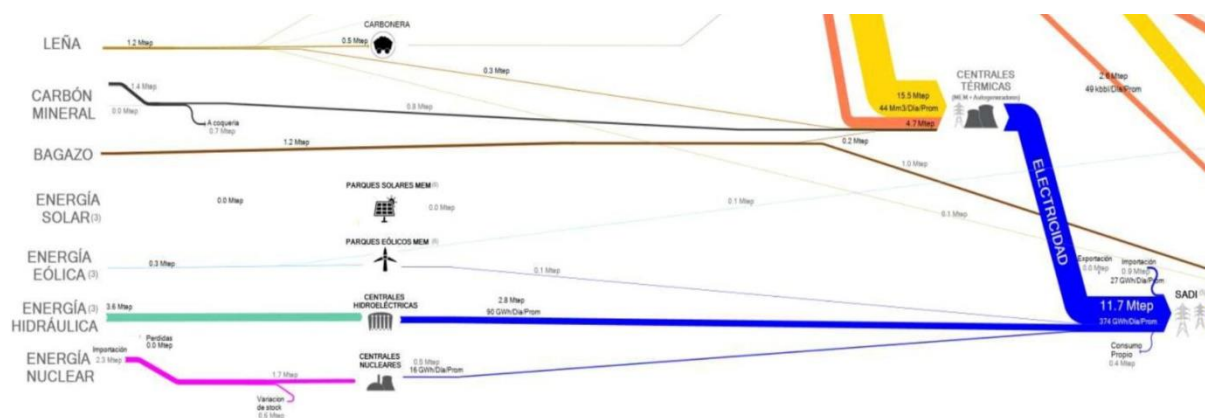
Para Canadá, los valores presentados en la Tabla 1 de la extracción de Petróleo y Gas arroja una TRE de 65 en 1970 para disminuir a 15 en el año 2000. Si se incluye la extracción de arenas bituminosas, el valor desciende a 11 para éste mismo año.

Asimismo, para la extracción de Gas, los valores arrojados en la Tabla 1 muestran una clara tendencia decreciente en el tiempo a pesar de las mejoras tecnológicas, arrojando un valor de 38 para el año 1993, 26 para el año 2000 y 20 para el 2009. Según estos datos, la TRE de la extracción de Gas en Canadá ha disminuido un 47% en los 16 años comprendidos entre el 1993 y 2009. A su vez, también arroja valores relativamente bajos en comparación con otras fuentes de energía y con los valores globales, donde la mayor parte de la extracción se realiza con métodos tradicionales.

5. La TRE de Vaca Muerta y la Matriz Energética Argentina

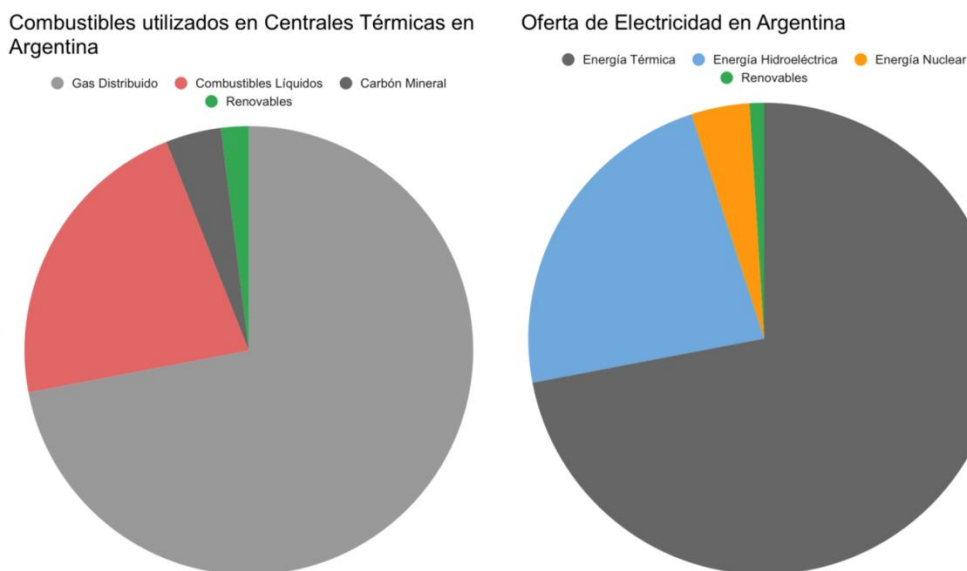
Se procederá a evaluar, desde el punto de vista de la rentabilidad energética, la conveniencia de la explotación de combustibles fósiles, particularmente los extraídos con métodos no convencionales, en comparación con otras fuentes de energía útil en la Argentina. Para ello, se tomará como principal base de datos la información presentada en el Flujograma del Balance Energético Nacional para el año 2014, elaborado por la Secretaría de Energía de la Nación, el cuál se encuentra en el Anexo 1. El Gráfico 4 representa un fragmento del mismo, con la información más relevante para el presente análisis.

Gráfico 4. Fragmento del Balance Energético Nacional para el año 2014.



Fuente: Secretaría de Energía de la Nación (2015).

Gráfico 5. Información anexa al Balance Energético Nacional para el año 2014.



Fuente: Elaboración propia en base a datos de Secretaría de Energía de la Nación (2015).

Se observa que durante el año 2014, el 72% de la oferta de electricidad provino de centrales térmicas, que a su vez se alimentaron en un 72% de gas distribuido por redes.

Esto significa que aproximadamente el 51% de la producción de energía eléctrica provino del consumo de gas.

Según las observaciones de Roberto Kozulj, investigador en el área de Economía energética y actual vicerrector de la UNRN sede Andina, en su análisis del sector energético argentino, en el año 2012 el 53% de la energía utilizada en la Argentina provenía del gas natural, y el 34% del petróleo. A su vez, explica que la generación de energía eléctrica depende en su mayor parte del gas natural, dependencia que se duplicó entre 1990 y 2000 para continuar incrementándose hasta el año 2015 (Kozulj, 2015).

Dada la importancia de la utilización de gas para la generación de energía eléctrica, cabe preguntarse qué tan eficiente, en términos energéticos, resulta dicha transformación y cuánta energía se pierde en el proceso.

Al no existir información disponible acerca de la eficiencia energética de las centrales térmicas instaladas en la Argentina, se procederá a deducirla en base a los datos antes presentados. En el Flujograma de la Matriz Energética Nacional se observa que a las centrales térmicas ingresan 21,5 Mtep. (Millones de toneladas equivalentes de petróleo). Por otro lado, al SADI (Sistema Argentino de Interconexión) llegan de estas centrales térmicas 7,4 Mtep. Podemos deducir entonces que la eficiencia promedio de las centrales térmicas instaladas en el país en el año 2014 fue de 0,344 o 34,4%. Esto significa que el 65,6% de la energía se pierde durante el proceso. Los cálculos realizados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Cálculos de la Estimación de la Eficiencia de las Centrales Térmicas en Argentinas.

Estimación de la Eficiencia de las Centrales Térmicas Argentinas			
Ingresan a centrales térmicas (en Mtep)		Llegan al Sistema Interconectado Nacional (en Mtep)	
Gas distribuido por redes	15,5	7,4	
Combustibles líquidos	4,7		
Leña	0,3	Eficiencia Promedio	en %
Carbón	0,8	0,3441860465	34,41860465 %
Bagazo	0,2	Pérdida Promedio	en%
Total	21,5	0,6558139535	65,58139535 %
		Mejor Tecnología disponible	en %
		0,6	60 %

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Balance Energético Nacional – año 2014.

Como parte del análisis, se considerará el caso extremo de la utilización de la más alta tecnologías de generación de energía eléctrica a partir de Gas Natural, los ciclos

combinados más modernos. Según el Instituto Catalán de Energía, éstos muestran una eficiencia energética que ronda el 60% (Instituto Catalán de Energía, 2019).

Se aclara que en ninguno de estos casos se está teniendo en cuenta los costos energéticos asociados a la fabricación, instalación y puesta en marcha de las centrales térmicas, ni su posterior desmantelamiento, sólo su eficiencia operativa. *Eg - Ep*.

5.1 TRE de la generación de energía eléctrica a partir de gas no convencional en la Argentina.

En base a la información previamente presentada, se procederá a realizar una estimación de distintas TRE de la generación de energía eléctrica en centrales térmicas a partir de gas en la Argentina. Los valores numéricos obtenidos, se desprenden directamente de los datos antes presentados y de los supuestos que se harán explícitos en cada caso. Los cálculos realizados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Estimaciones de la TRE de la generación de energía eléctrica a partir de gas en Argentina.

Estimaciones de la TRE de la generación de energía eléctrica a partir de gas en Argentina		
TRE a Considerar	ARG = Global 2006	Gas No Convencional = Canadá 2009
Valor de la TRE	18	20
TRE centrales térmicas instaladas	6,195348837	6,88372093
Mejor Tecnología Disponible	10,8	12

Fuente: Elaboración propia.

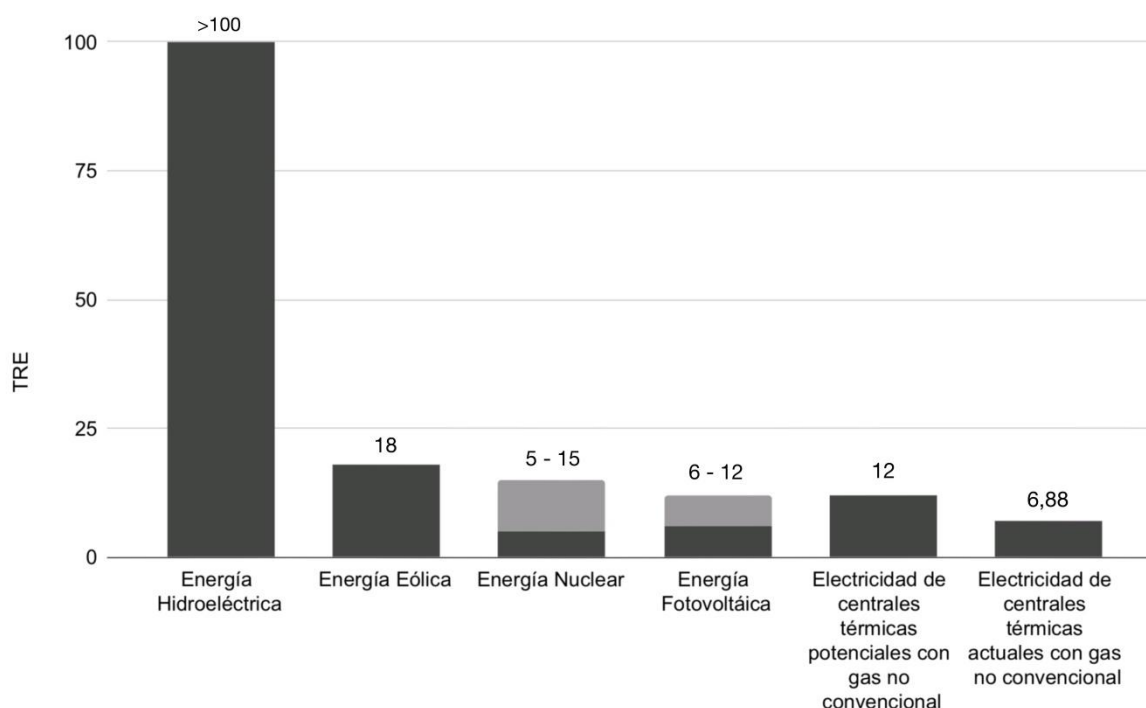
Si se supusiera una TRE para la producción de petróleo y gas para la Argentina, similar al global, de 18 para el año 2006 (Tabla 1), la TRE para la producción de energía eléctrica en las centrales térmicas instaladas en territorio nacional arrojaría un valor de 6,2, quedando por debajo no sólo de la energía hidroeléctrica sino también de la eólica y solar. Incluso si se utilizara la mejor tecnología disponible para la generación de electricidad a partir de gas, los ciclos combinados más modernos, estaría arrojando un TRE de 10,8, menor al de la energía eólica y la hidroeléctrica.

Para la explotación de los hidrocarburos no convencionales en Vaca Muerta, a falta de datos locales y por las razones expuestas en el apartado 4.2 del presente análisis, se supondrá una TRE para el gas no convencional similar a la de Canadá, cuyo último dato, el año 2009, arroja un valor de 20 (Tabla 1).

En este caso la TRE de la generación de energía eléctrica a partir de gas extraído con métodos no convencionales arrojaría un valor de 6,88 si se utilizaran las centrales térmicas instaladas, y un valor igual a 12 con los ciclos combinados más modernos. Aún si se utilizara el gas extraído de Vaca Muerta con el método de fractura hidráulica para generar energía eléctrica con la mejor tecnología disponible, la TRE seguiría estando por debajo de los valores arrojados por la energía eólica y la hidroeléctrica.

En el Gráfico 6 se presentan las TRE de la generación de energía eléctrica a partir de distintas fuentes, incluyendo las tasas teóricas previamente elaboradas. El objetivo es visualizar de un modo más claro, la conveniencia energética de volcarse hacia fuentes de energía distintas de los combustibles fósiles extraídos con métodos no convencionales, para la generación de energía eléctrica en Argentina.

Gráfico 6: Comparación TRE de distintas fuentes de energía eléctrica, incluyendo las tasas teóricas de generación de energía eléctrica con gas no convencional en Argentina.



Fuente: Elaboración propia, en base a datos propios y de Murphy & Hall (2010).

Resulta evidente que la Hidroeléctrica sigue siendo la fuente de energía más eficiente en términos energéticos. La Energía Eólica muestra una TRE elevada en comparación con otras fuentes, además de ser muy abundante en la Argentina y tener un gran potencial de crecimiento. Ésta depende en gran medida de cuestiones climáticas, muy favorables en algunas regiones de dicho país. La Energía Nuclear puede, dependiendo de la tecnología aplicada, presentar una TRE mayor a las tasas teóricas para la generación de energía eléctrica en centrales térmicas con gas no convencional en Argentina. Lo mismo ocurre con la TRE de la energía fotovoltaica, que depende no sólo de la tecnología empleada sino también de cuestiones climáticas.

En otras palabras, los datos antes presentados pueden explicarse del siguiente modo. Con una unidad de energía equivalente a 1 Mtep. (Millón de toneladas equivalente de petróleo) invertida en la generación de energía eléctrica a partir de gas no convencional en las centrales térmicas instaladas en la Argentina se obtendrían 6,88 Mtep. Si este mismo gas, extraído con el método de fractura hidráulica, se utilizara en las centrales térmicas más modernas, se obtendrían 12 Mtep. Alternativamente, si esta energía se utilizara en la instalación y mantenimiento de parques eólicos, se estarían obteniendo unos 18 Mtep. Y si se utilizase en la construcción y mantenimiento de centrales hidroeléctricas, se obtendrían

más de 100 Mtep. De este modo, el utilizar esta energía, que como se ha visto es finita y escasa, en la generación de energía eléctrica en centrales térmicas a gas no convencional, resulta ineficiente frente a alternativas como la energía eólica e hidroeléctrica.

6. Consideraciones Finales:

Dado el crítico nivel de agotamiento de las reservas de hidrocarburos a nivel mundial y las poco prometedoras perspectivas a futuro, resulta de vital importancia cuidar los recursos energéticos disponibles, en una transición hacia energías renovables. En este contexto, el indicador de la Tasa de Retorno Energético resulta ser una herramienta clave para canalizar la energía de forma eficiente, cuando se trata de invertirla en generar mayor cantidad de energía útil. Se lo puede observar como un indicador análogo a la rentabilidad monetaria, pero en términos de energía, ya que indica cuánta energía se obtendrá por cada unidad energética invertida en la actividad que se analice, sea cual sea la unidad de medida que se utilice. Así, según los datos analizados en el presente trabajo, una unidad de energía, por ejemplo Mtep, invertida en la generación hidroeléctrica generará alrededor de 100 Mtep, mientras que si se invierte en extraer petróleo y gas en Noruega generará 40 Mtep, y en China sólo 10. Resulta paradójico que, con retornos energéticos tan dispares, todas estas actividades sigan siendo monetariamente rentables.

En el análisis que se desarrolló en el presente trabajo, se arribó a una Tasa de Retorno Energético teórica para la generación de energía eléctrica en base a gas extraído con métodos no convencionales (fracturación hidráulica) en la Argentina. Ésta arrojó un valor de 6,88 si se utilizan las centrales térmicas instaladas en el territorio nacional, y de 12 si se utilizaran las centrales térmicas más modernas, con la mejor tecnología disponible. Para llegar a estos valores, se supuso una Tasa de Retorno Energético de la extracción de gas no convencional similar a la de Canadá en el año 2010, y se estimó la eficiencia energética de las centrales térmicas en Argentina a partir de los datos publicados en el Balance Energético Nacional para el año 2014.

Luego se procedió a comparar estos resultados con las TRE de otras actividades de generación de energía eléctrica. En esta comparación, se pudo concluir que para el caso de la Argentina, la actividad de generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles extraídos con métodos no convencionales resulta energéticamente ineficiente en comparación con otras fuentes de energía eléctrica como la energía hidroeléctrica, la energía eólica o la energía fotovoltaica. Además, las perspectivas a futuro indican que la tendencia parece profundizar esta situación, con el desarrollo de tecnologías de energías renovables cada vez más eficientes, pero principalmente por la tendencia a la baja de la TRE de los hidrocarburos en general, debido al agotamiento de las reservas de combustibles fósiles más fáciles de extraer. Este agotamiento, como se analizó en el apartado 4.1 generó una disminución constante en la TRE de petróleo y gas mundial de 35 en 1999 a 18 en 2006.

Todo esto, pone en discusión la idea de rentabilidad monetaria, demostrando que una actividad puede ser rentable en términos monetarios pero no energéticos. En el caso que se ha trabajado en este análisis, los precios parecen no estar reflejando correctamente la escases relativa de recursos, haciendo económicamente viable actividades de generación

de energía que son menos eficientes que otras, es decir, direccionando recursos, en este caso energía útil, hacia actividades cuya Tasa de Retorno Energético es menor que en otras opciones viables. Será motivo de otra investigación analizar las razones de esta asignación ineficiente de recursos.

En lo que respecta al presente trabajo, se concluye que la explotación del Yacimiento Hidrocarburífero Vaca Muerta no solucionaría los problemas de la Matriz Energética Nacional Argentina, al menos en lo que se refiere a la generación de energía eléctrica, ya que existen otras opciones viables que son energéticamente más eficientes.

De cara al futuro, resulta imprescindible generar un cambio hacia fuentes de energía renovables. No sólo por el inminente agotamiento de los recursos hidrocarburíferos sino también por las consecuencias climáticas y medioambientales de la utilización desmedida de combustibles fósiles. Es necesario generar conciencia acerca de la necesidad de cuidar los recursos energéticos disponibles, para anticiparse al agotamiento de hidrocarburos y lograr una rápida transición hacia energías renovables.

Referencias bibliográficas:

Administración de Información Energética de los Estados Unidos. (septiembre de 2015). *eia.gov*. Recuperado el 1 de febrero de 2019, de <https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/>

Adriaanse, A. (1993). *Environmental Policy Performance Indicators*. The Hague, The Netherlands: Ministry of Housing, Physical Planning and Environment.

Boyce, J. R. (Julio de 2012). Prediction and Inference in the Hubbert-Deffeyes Peak Oil Model. *Department of Economics, University of Calgary*.

Camargo, F. G., & Schweickardt, G. A. (2014). *Estimación de la tasa de retorno energético: Análisis comparativo de las metodologías disponibles en la actualidad*.

Fischer-Kowalski, M., & Haberl, H. (2000). El metabolismo socioeconómico. *Ecología Política*, 21 -34.

Gagnon, N., Hall, C. A., & Brinker, L. (2009). A preliminary Investigation of Energy return on Energy Investment for Global Oil and Gas Production. *Energies* 2, 490-503.

Guilford, M. C., Hall, C. A., O'Connor, P., & Cleveland, C. J. (Diciembre de 2011). A New Long Term Assessment of Energy return on Investment (EROI) for U.S. Oil and Gas Discovery and Production. *Sustainability*, 1866-1887.

Hall, C. A., Balogh, S. B., & Murphy, D. J. (2009). What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have? *Energies*, 25-47.

Hall, C. A., Lambert, J. G., & Balogh, S. B. (2013). *EROI of Different fuels and the implications for the society*.

Hauwermeiren, S. V. (1999). *Manual de Economía Ecológica*. Abya Yala.

Instituto Catalán de Energía. (2019). *Instituto Catalán de Energía*. Recuperado el febrero de 2020, de <http://icaen.gencat.cat/es/energia/formes/electricitat/tecnologies/combinat/>

Kozulj, R. (2015). *El Sector Energético Argentino. Un análisis integrado de sus problemas, impactos y desafíos macroeconómicos*. Viedma: Universidad Nacional de Río Negro.

Lambert, J. G., Hall, C. A., & Balogh, S. (2013). *EROI of Global Energy Resources. Status, Trends and Social Implications*. SUNY - Environmental Science & Forestry Next Generation Energy Initiative, Inc.

Martins, Alejandra. (29 de octubre de 2013). *Qué es el fracking y por qué genera tantas protestas*. (BBC, Editor) Obtenido de BBC news: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2013/10/131017_ciencia_especial_fracking_abc_am

Minkow, D. (6 de Abril de 2017). *What You Need to Know About Fracking in Canada*. Obtenido de The Narwhal: <https://thenarwhal.ca/what-is-fracking-in-canada/>

Murphy, D., & Hall, C. (2010). Year in review-EROI or energy return on (energy) invested.

Murphy, D., Hall, C., Dale, M., & Cleveland, C. (2011). Order from Chaos: A Preliminary Protocol for Determining the EROI of fuels. *Sustainability*, 1888-1907.

Pengue, W. A. (2017). *Fundamentos de Economía Ecológica. Bases teóricas e instrumentos para la resolución de los conflictos sociedad naturaleza*. Buenos Aires: Kaicron.

Pengue, W. A. (2017). *La Economía Ecológica y el desarrollo en América Latina*.

Prieto, P. (2006). La tasa de Retorno Energético (TRE): Un concepto tan importante como evasivo. *Crisis Energética*, 1-23.

Quiroga, R. (2003). Fundamentos de Economía Ecológica. *Temas a Fondo*, 10 a 14.

Riera, A. (11 de enero de 2017). *Chequeado*. Obtenido de <https://chequeado.com/ultimas-noticias/macri-vaca-muerta-representa-la-2o-reserva-mundial-de-gas-y-la-4o-de-petroleo-no-convencional/>

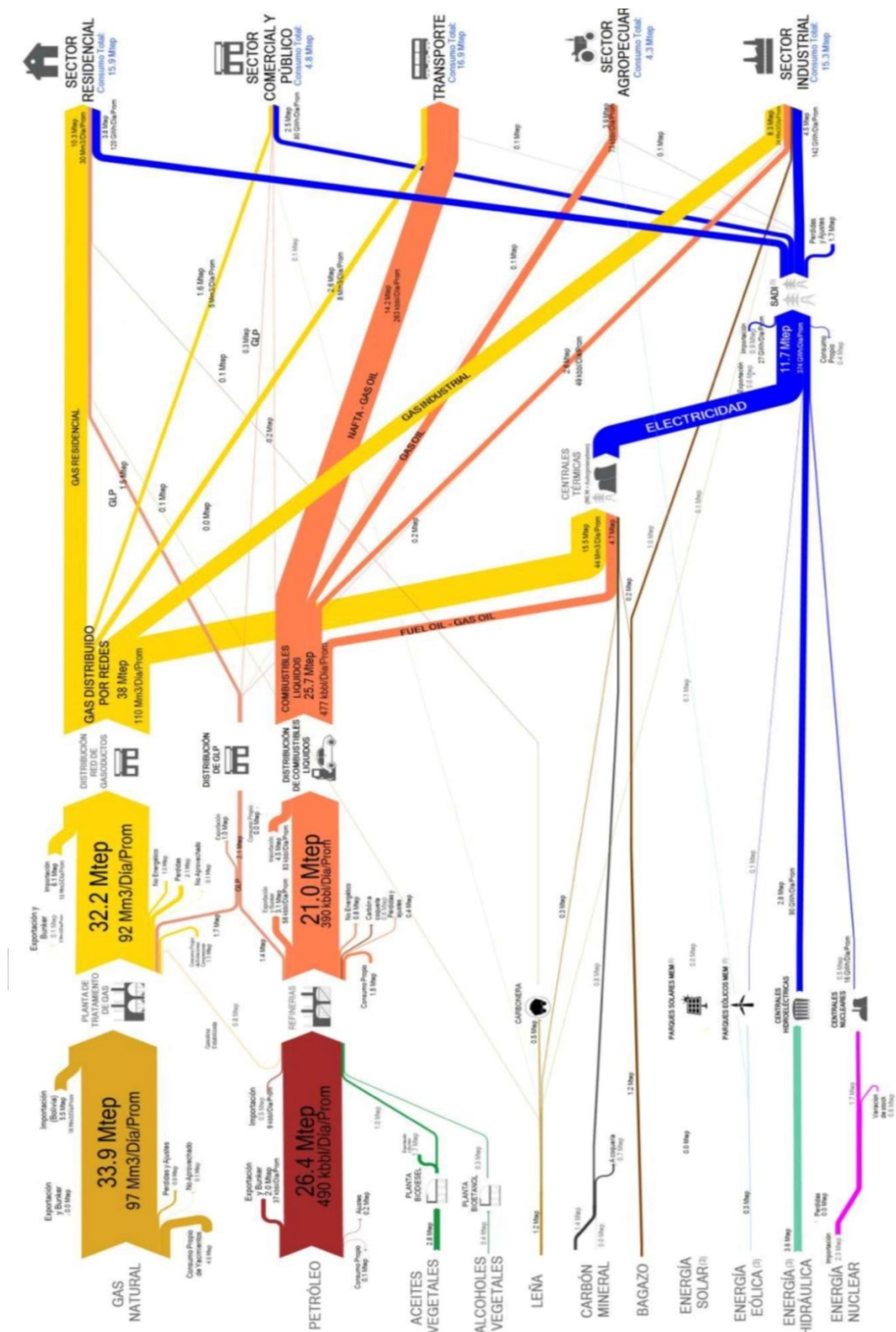
Secretaría de Energía de la Nación. (s.f.). *Secretaría de Energía de la Nación*. Obtenido de http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/informacion_del_mercado/publicaciones/energia_en_gral/balances_2015/flujograma_energetico_2014_rev_c.pdf

Tobasura Acuña, I. (2008). Huella Ecológica y Biocapacidad: Indicadores Biofísicos para la Gestión Ambiental. El caso de Manizales, Colombia. *Revista Luna Azul*, 119-136.

Wood, C. (Abril de 2014). *Fracking*. Obtenido de The Canadian Encyclopedia: <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/en/article/fracking>

Zandvliet, H. (2011). *El Pico de Petróleo y el Destino de la Humanidad: no existen soluciones técnicas rápidas y las consecuencias pueden ser graves*. New York.

Anexo: Flujograma del Balance Energético Nacional Argentino – año 2014.



Fuente: Secretaría de Energía de la Nación (2015).