



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

LOS LÍMITES DE LA ENERGÍA
LOS RECURSOS ENERGÉTICOS DE LOS QUE DISPONE EL HOMBRE

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
LILIANA MARÍA LUISA GÓMEZ OLVERA

TUTOR PRINCIPAL
DR. VÍCTOR RODRÍGUEZ PADILLA, FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DRA. MANUELA AZUCENA ESCOBEDO IZQUIERDO

Secretario: DR. JUAN CARLOS SOLÍS ÁVILA

Vocal: DR. VÍCTOR RODRÍGUEZ PADILLA

1er. Suplente: DR. PABLO ÁLVAREZ WATKINS

2º. Suplente: DR. FLUVIO CÉSAR RUÍZ ALARCÓN

Lugar donde se realizó la tesis: CIUDAD DE MÉXICO

TUTOR DE TESIS:

DR. VÍCTOR RODRÍGUEZ PADILLA

FIRMA

A mi familia

En especial a mi padre, por inspirarme con su pasión por el conocimiento y a mi madre, que me demostró que siempre es buena edad para alcanzar nuevas metas. A Silvestre, mi mejor amigo, sin cuyo apoyo este sueño simplemente no hubiera sido posible y a mis hijos, mis grandes maestros de vida, quienes me motivan a ser una mejor persona y a hacer de este, un mejor mundo.

A mis amigos

En especial a Gabriela por las porras que resultaron cruciales. A Ana Karen, Ingrid y Daynier, que hicieron de mi regreso a la universidad una etapa memorable. A Gisela y a Nayeli, por siempre estar ahí.

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Por darme la oportunidad de pertenecer a su alumnado y poner en mi camino un excelente grupo de profesores de los cuales estoy profundamente agradecida.

Índice

Introducción

Capítulo 1. Pasado. La historia del hombre y su dependencia de combustible.

- 1.1 La primera era de la energía, el fuego y la primera transición energética.
- 1.2 La segunda transición energética, energías hídrica y eólica.
- 1.3 La tercera transición energética, el carbón.
- 1.4 La cuarta transición energética, la era del petróleo.
- 1.5 El impacto ambiental
- 1.6 La electricidad
 - 1.6.1 La energía nuclear
 - 1.6.2 La energía solar
 - 1.6.3 La energía eólica
 - 1.6.4 Hidroeléctrica
 - 1.6.5 Gas natural
- 1.7 Lecciones aprendidas

Capítulo 2. Presente. Los límites actuales de las energías disponibles.

- 2.1 Límites de fuentes fósiles.
 - 2.1.1 Petróleo
 - 2.1.2 Carbón
 - 2.1.3 Gas natural
 - 2.1.4 Todos los combustibles fósiles
- 2.2 Nuclear
- 2.3 Límites de fuentes renovables
 - 2.3.1 Hidroeléctrica
 - 2.3.2 Eólica
 - 2.3.3 Solar
 - 2.3.4 Bioenergía
 - 2.3.5 Geotérmica
 - 2.3.6 Marina
- 2.4 Visión en conjunto
- 2.5 Conclusiones
 - Anexo 1
 - Bibliografía

Capítulo 3. Futuro.

3.1 Los posibles escenarios.

3.1.1 El bueno

3.1.2 El malo

3.1.3 El feo

3.2 Barreras y puentes para la transición energética hacia energías limpias.

3.3 Los principales actores en la transición energética.

3.4 El caso de México.

3.5 Conclusiones

Conclusiones finales

Introducción

Sin energía no pasa nada, si acaso el tiempo. No habría cambios, y sin cambios la vida no sería posible. La fuente más grande de energía del planeta es, sin lugar a duda, el Sol, nuestro radiante astro que ininterrumpidamente libera su energía hacia nuestro pequeño mundo que la recibe en el aire, en el agua, en la tierra, en las hojas de las plantas y algas listas para capturarla y almacenarla para que posteriormente otros seres vivos puedan igualmente beneficiarse con ella.

Uno podría creer que la Tierra y cada ser vivo sobre ella han sido planeados quirúrgicamente uno para soportar la vida y los otros para desarrollarse en ella. No parecía haber desperdicio alguno, cada proceso tenía un lugar importante en el equilibrio del ecosistema, la muerte de un organismo significaba la vida de otro, sin embargo, una especie fue capaz de romper el equilibrio, alterando los ciclos, quitando de más, poniendo de más. El hombre tuvo la habilidad de producir energía proveniente de una fuente externa a su propio cuerpo, y más importante aún, pudo usarla para su beneficio. La energía ha jugado un papel crucial en el desarrollo del ser humano, desde propiciar su evolución como especie a raíz de la cocción de alimentos, hasta la afectación climática de su entorno. A la fecha, el acceso a la energía ha dictaminado el progreso de muchas civilizaciones y lo hará para las generaciones futuras; a ella vienen ligados el acceso al agua y saneamiento, servicios de salud y el abastecimiento de alimentos, el desarrollo económico, el poder industrial y el militar.

El hombre, al hacerse sedentario, se establece junto a ríos para obtener un mayor beneficio con un menor gasto de energía, conforme empieza a dominar la naturaleza y crear su propio clima empieza a vivir en lugares que hubieran sido inhóspitos para albergar la vida humana, pero esto implica que más energía sea requerida. Junto con los avances tecnológicos, el uso de energía simplificó las tareas del hombre, tanto las vitales como las secundarias. La simplificación otorgó confort y conveniencia que más tarde se convirtieron en la norma, transformando al consumo de energía en un agente esencial aún para las actividades más simples, no extraña entonces que, a mayor desarrollo tecnológico en una nación, existe asociado un mayor consumo de energía por habitante.

Los primeros lugares en consumo de energía a nivel mundial, corresponde a países de primer mundo o a aquellos con altos niveles de producción como el caso de China, por el contrario, los niveles más bajos de consumo de energía han sido de países pobres, muchos de ellos en África.

La fuente de energía principal de una población difiere ampliamente de un lugar a otro, en países desarrollados existe un difundido uso de los combustibles fósiles aun cuando no se cuente con el recurso localmente. Poblaciones de escasos recursos siguen dependiendo de la biomasa que puedan recolectar. Las fuentes de energía utilizadas solían depender de los recursos disponibles localmente, sin embargo, los combustibles fósiles han ido desplazando otras fuentes demostrado a lo largo de los años ser de las opciones más atractivas para la obtención de energía; poseen una muy buena densidad energética, existen en vastas cantidades y su extracción era relativamente sencilla, lo que los convertía en una opción bastante económica, de ahí que naciones, aun cuando carecen del recurso, dependen altamente de él.

En zonas rurales o países poco desarrollados el consumo de energía continúa estando limitado a actividades básicas como cocción de alimentos, calor e iluminación por lo que la utilización de biomasa sigue siendo una buena opción aun cuando también implica riesgos para la salud, nuestra primera fuente de energía, una que muy probablemente seguirá utilizándose en años futuros. Para países con mayores necesidades energéticas, se requieren energéticos capaces de proporcionar altas cantidades de energía de manera continua, los fósiles han demostrado en este aspecto cumplir satisfactoriamente.

El control de la energía nos ha dado “superpoderes”, para convertir la noche en día, modificar la temperatura, ser más rápidos, más fuertes, para ir a lugares que de otra manera hubieran estado fuera de nuestro alcance. En nuestro afán por simplificar nuestra existencia se han alcanzado avances que nos han permitido hacer cada vez más con menos esfuerzo, hemos mejorado nuestra calidad de vida lo cual también nos ha permitido tener vidas más longevas al mismo tiempo que se mejora la expectativa de vida de la niñez. Si bien es cierto que esto resulta bueno para la raza humana, pareciera no serlo tanto para el planeta cuando el crecimiento poblacional empieza a comprometer la capacidad de restitución de la naturaleza. Conforme las civilizaciones se van

desarrollando, aumenta el número de productos que se fabrican, cada vez se hace más en menor tiempo lo cual además de requerir más insumos, aumenta también la necesidad de energía.

Invariablemente las curvas como las de crecimiento poblacional, demanda de recursos, consumo de energía, han mostrado una tendencia a la alta a lo largo de la historia, salvo contadas excepciones.

Si bien los combustibles fósiles han permitido grandes saltos en el desarrollo de la humanidad, no sólo hablando del bienestar del individuo sino también como sociedad, también es cierto que son fuente de una fuerte derrama económica convirtiéndose así en un sensible tema geopolítico. Los hidrocarburos constituyen una de las industrias más redituables en el mundo, su control y distribución ha dado pie a conflictos internacionales que se han mantenido por generaciones y que continúan hasta nuestros días. Asegurar el abastecimiento de energéticos se convirtió en una misión para muchas naciones cuya economía, desarrollo y poder están estrechamente ligados a los combustibles fósiles. Numerosas alianzas y guerras han tenido lugar en nombre de la religión y de la democracia, cuyo trasfondo deja ver las luces de la codicia por los hidrocarburos. La frase “la energía mueve al mundo” tiene entonces una doble implicación.

A pesar de que no toda persona en la Tierra depende de hidrocarburos para realizar sus actividades día con día, basta con que una fracción los utilice intensamente para que los requerimientos de este recurso sean elevados. Somos muchos quienes hemos crecido en un mundo donde casi todo lo que nos rodea está ahí debido al uso de fuentes fósiles, prescindir de hidrocarburos pareciera una realidad poco viable. Existen ciudades enteras donde desplazarse de un lugar a otro resulta prácticamente imposible a menos de que se realice en un vehículo automotor.

Dado que los combustibles fósiles provienen de energía solar almacenada por seres vivos y “encapsulada” por cientos de millones de años bajo la superficie terrestre, no es un recurso que podamos ver restituirse, su volumen es finito, tan es así que en países donde en algún momento el recurso fue abundante ahora es importado, la extracción se vuelve cada vez más compleja y por lo tanto costosa lo cual nos lleva a una de las primeras preguntas de esta tesis: ¿cuáles son los límites del petróleo? ¿cuánto petróleo más hay disponible para su explotación? De acuerdo con Hubbert,

la producción de petróleo se comporta como una campana de Gauss ¿en qué lugar de esa campana nos encontramos en estos momentos? ¿hemos rebasado el pico de producción? ¿continuaremos con el uso de combustibles fósiles hasta que hayamos acabado con las reservas del planeta? ¿es siquiera eso posible?

El uso de combustibles fósiles ha demostrado ser una forma de energía fácil de distribuir, económica, se puede almacenar, sin embargo, quemar combustibles implica liberar emisiones contaminantes a la atmósfera. Aun cuando los motores de combustión interna son cada vez más eficientes, la quema no es perfecta, mucha energía se pierde en forma de calor y se generan emisiones nocivas para los seres vivos. Hasta ahora no existe una alternativa que ofrezca beneficios equiparables a los que ofrecen las fuentes fósiles, sin embargo, el efecto de las emisiones contaminantes generadas empieza a ser cada vez más evidente. La demanda de hidrocarburos se ve acrecentada no sólo con el incremento poblacional, también entra en juego la tendencia a la modernización de poblaciones que empiezan a adoptar el estilo de vida de países desarrollados. De momento hay suficientes hidrocarburos para todos, muy probablemente los habrá por varias décadas más pero invariablemente llegaremos a un punto en el que nuestro estilo de vida como lo conocemos hasta ahora tendrá que cambiar, nuestro mundo es finito y por ende sus recursos naturales también lo son y a pesar de que muchos se renuevan, a la velocidad en que los consumimos nos está mostrando sus limitantes.

La utilización de energías limpias no es un tema nuevo, han sido empleadas por antiguas civilizaciones, sin embargo, habían sido relegadas a segundo término por no poseer tantas cualidades como el uso de los combustibles fósiles, máxime cuando el daño ecológico difícilmente pasaba por la mente de los pobladores testigos de las extensas zonas boscosas, los transparentes cielos y las cristalinas aguas. Ahora las zonas boscosas tienen que ser protegidas para evitar su desaparición, los cielos ya no muestran las estrellas por la noche y las aguas se han tornado turbias si no inexistentes en muchos lugares. Quienes lo han notado y saben el valor de nuestros recursos naturales saben que se necesita un cambio y que el tiempo es apremiante. La energía nuclear, aunque eficiente es temida, las imágenes de los desastres que ha provocado a lo largo de la historia se han quedado grabados en la mente de muchos y aun cuando los nuevos sistemas de seguridad son sofisticados, la implementación de nuevas plantas siempre encuentra oposición social. Y

aunque la oposición social también está presente en el uso de energías renovables, existe una contraparte social que trata de fomentar cada vez más su utilización, la implementación frecuentemente se ha visto obstaculizada por sus elevados costos, cosa que afortunadamente ha empezado a cambiar.

Dado que toda fuente de energía tiene impactos y restricciones, existen condicionantes para su uso. A lo largo de la historia de la humanidad se han dado transiciones energéticas, debido a las limitantes que conllevan el uso de un recurso en particular, ya sea por la escasez, su precio o por no contar con los beneficios con los que cuentan otros tipos de recursos.

Esta tesis pretende encontrar de qué manera se ven limitados los diferentes recursos energéticos de los que dispone el hombre, que impide en un momento dado que el hombre pudiera obtener una mayor cantidad de energía de cada uno de ellos, bajo la premisa de que conocer los límites permitirá tener elementos para pronosticar el consumo energético en el futuro y en el mejor de los casos modelarlo.

Se buscará responder a preguntas tales como: ¿Cuáles son los orígenes de los límites? ¿Cómo estos límites han generado las transiciones energéticas en el pasado y cómo pueden darse estas transiciones en el futuro? ¿Dejaremos algún día de usar recursos fósiles? ¿Seremos capaces de sustituirlos con energías limpias? ¿Podremos cubrir las necesidades energéticas de una población mundial en constante crecimiento? ¿Hasta dónde podemos llegar con energías renovables? ¿Existe una energía renovable capaz de proveer toda la energía que la humanidad requiere? ¿Somos capaces de obtener toda la energía que necesitamos de fuentes limpias?

En la literatura podemos encontrar cómo el hombre ha optado por una fuente de energía sobre otra, las transiciones energéticas le han permitido grandes progresos tecnológicos. Vaclav Smil es uno de los científicos más prolíficos sobre el tema, ha escrito varios artículos y libros al respecto. Instituciones como el Consejo Mundial de la Energía han publicado también literatura sobre el potencial de las diferentes fuentes energéticas. Varios científicos alrededor del mundo han estudiado el potencial energético en fuentes específicas de energía, que nos han dejado una

importante visión de lo que se puede lograr con las diferentes opciones energéticas de las que dispone la humanidad. Ha habido personas capaces de hacer notar que los recursos son finitos y que su utilización puede verse restringida, tal es el caso de M. King Hubbert quien se hizo de fama cuando hizo notar que las reservas de petróleo no sólo eran finitas, sino que además su límite estaba más cerca de lo que muchos pensaban; a pesar de que hubo varias personas que desestimaron sus estudios, más de medio siglo después hay quienes siguen investigando sobre el momento en que finalmente hayamos terminado con las reservas petroleras en la Tierra. Las especulaciones son muchas, lo que es un hecho es que habrá un momento en que nuestro consumo de energía tendrá que cambiar o haremos de nuestro mundo uno inhabitable. Junto con preguntas como: ¿Cuándo se acabará el petróleo?, deberían venir otras como ¿qué tanta energía podemos obtener de los rayos que inciden del Sol? ¿Cuánto aire podemos convertir en energía eléctrica? ¿Qué tanto podemos aprovechar de la fuerza del mar? Y otras más relacionadas con todos los recursos disponibles.

En esta tesis se busca recopilar esa información para poder lograr un comparativo del potencial de cada fuente, de cómo pudiera verse restringida y qué podría esperarse en el futuro; llevándonos por última instancia a lograr contestar la pregunta central:

¿Cuáles son los límites de la energía disponible para el hombre? ¿Qué impide que se obtenga más energía de los recursos que tiene disponibles?

Salvo en el primer capítulo que hablare de los efectos de la cocción de alimentos en el hombre, la energía metabólica no será caso de estudio. Cuando hablamos de límites, hablamos del momento en que no se puede obtener más energía del recurso que se ha seleccionado, en algunos casos se describirá como potencial de la fuente el máximo punto alcanzable con ésta. La respuesta a la pregunta de investigación se cree que diferirá para cada fuente. Para los recursos fósiles se piensa que se acabará su uso antes de que se acabe el recurso, motivado por la contaminación ambiental y el subsecuente cambio climático. Las fuentes renovables de energía habían visto limitado su uso debido al costo, pero este escenario empieza a cambiar. La energía nuclear a pesar de ser considerada entre las energías limpias sigue generando residuos radioactivos, además de ser temida por muchos debido a antecedentes como los accidentes de Chernobyl y Fukushima.

Para poder dar respuesta a la pregunta de investigación, la siguiente tesis ha sido dividida en tres capítulos:

1. Pasado. La historia del hombre y su dependencia de combustible.
2. Presente. Los límites actuales de las energías disponibles.
3. Futuro. Los posibles escenarios.

Se estudian las transiciones energéticas en el pasado buscando encontrar bajo qué circunstancias se dieron. Es importante señalar que cuando hablamos de transiciones energéticas no estamos considerando que se deja a un lado un recurso para usar otro, prácticamente en todos los casos se siguen manteniendo las primeras fuentes además de que no todos los países e incluso en un mismo país no todos los habitantes hacen la transición al mismo tiempo. Las primeras transiciones, en su mayoría, se han dado en países desarrollados capaces de financiar investigación y desarrollo para subsecuentemente implementar nuevas tecnologías. Existe aún un porcentaje nada despreciable de la población mundial que aún utiliza la biomasa como su principal energético.

En el capítulo sobre el presente se analiza con la tecnología de hoy en día el potencial energético al que podríamos aspirar con cada una de las fuentes de energía, incluyendo fósiles, renovables y la energía nuclear. Se busca encontrar en dónde presentan sus limitantes de generación.

Para el último capítulo, se plantean posibles escenarios a partir de lo que se sabe de las limitantes históricas, así como de las que se tienen hoy en día y de las que podrían ocurrir con el paso de los años.

La información ha sido obtenida de libros, artículos de investigación, documentos gubernamentales, reportes de organismos no gubernamentales, organismos autónomos y otras tesis, principalmente.

Capítulo 1. Pasado. La historia del hombre y su dependencia de combustible.

No les compartiré ni una chispa. Si los hombres tienen fuego pueden hacerse fuertes y sabios como nosotros, y terminarían por sacarnos de nuestro reino. Además, el fuego es una herramienta peligrosa y ellos son muy pobres e ignorantes como para confiárselos.

Zeus a Prometeo

En éste primer capítulo se explica el origen de la energía contenida en la Tierra y cómo el hombre a lo largo de su historia la va aprovechando, así como las consecuencias que el uso de las diferentes fuentes de energía ha tenido en su desarrollo.

De los orígenes de toda actividad se ven los flujos de energía y lo que el hombre consume finalmente. Se verán las diferentes eras de la energía y las transiciones energéticas que el hombre va experimentando a través de su historia y los eventos que las originan.

La primera era de la energía abarca el uso del fuego y cómo la cocción de los alimentos provocó cambios en el cuerpo del *homo erectus* que lo llevaron a evolucionar a *homo sapiens*. Se da la primera transición energética con el uso de animales y la fundición de metales mediante el uso del fuego. La segunda transición energética vendría cuando empieza a aprovechar la fuerza de las corrientes de agua y el viento. La tercera transición energética se da cuando se empieza a difundir el uso de carbón. La cuarta y última gran transición fue hacia el uso del petróleo.

Con la transición hacia el petróleo surgen grandes compañías petroleras, las Siete Hermanas, capaces de definir el destino de naciones, muchas de las cuales terminan por nacionalizar su industria petrolera con el fin de proteger sus recursos hecho que logra mermar las ganancias de las grandes petroleras.

A lo largo de las diferentes transiciones se van suscitando crisis energéticas que promueven el cambio hacia nuevas fuentes. Los científicos alertan hacia finales del siglo XX sobre los efectos ambientales que se han dado a raíz del uso de fuentes fósiles, las energías limpias comienzan a tomar mayor fuerza.

La energía juega un papel primordial en quiénes somos, cómo somos y la situación en la que vivimos. Sin energía jamás hubiera existido la vida. Cuando el hombre empieza a tener control sobre la energía empiezan a suscitarse una serie de cambios cruciales en su vida, en su desarrollo y en la vida del resto de los habitantes del planeta.

Toda actividad sobre la Tierra tiene cuatro orígenes fundamentales que son tan viejos como el sistema solar mismo: la fusión de átomos en el Sol, la fisión de átomos en la Tierra, la energía térmica en el interior de la Tierra y la energía potencial gravitacional y cinética relativa de los cuerpos celestes. De aquí proviene toda la energía que podemos obtener en la Tierra, teniendo unos una naturaleza finita al encontrarse limitados en la Tierra y otros son considerados renovables de acuerdo con el tiempo en el que pueden ser reabastecidos. Ver tabla 1.

Origen	Recurso	Tiempo de reabastecimiento
Nuclear solar	Radiación solar	Milisegundos
	Viento y oleaje	Horas
	Precipitación	Días
	Biomasa	Años
	Gradiente térmico oceánico	Cientos de años
	Combustibles fósiles	Millones de años
Cuerpos celestes	Mareas	Horas
Térmica terrestre	Geotérmica	Días - años
Nuclear terrestre	Materiales nucleares	No se reabastecen

Tabla 1. Clasificación de recursos y tiempo de reabastecimiento (Herman, 2006)

En la figura 1.1 se pueden apreciar los flujos de energía de la Tierra, el mayor flujo de energía corresponde a la radiación solar, el cual se convierte en energía eólica, solar, de oleaje, térmica oceánica, hidroeléctrica y a través de la fotosíntesis llega a transformarse en biomasa y en combustibles fósiles. De la energía gravitacional podrá obtenerse la energía mareomotriz y junto con la energía térmica de la corteza se puede obtener energía geotérmica. De los elementos radioactivos que se encuentran en la Tierra puede obtenerse energía nuclear.

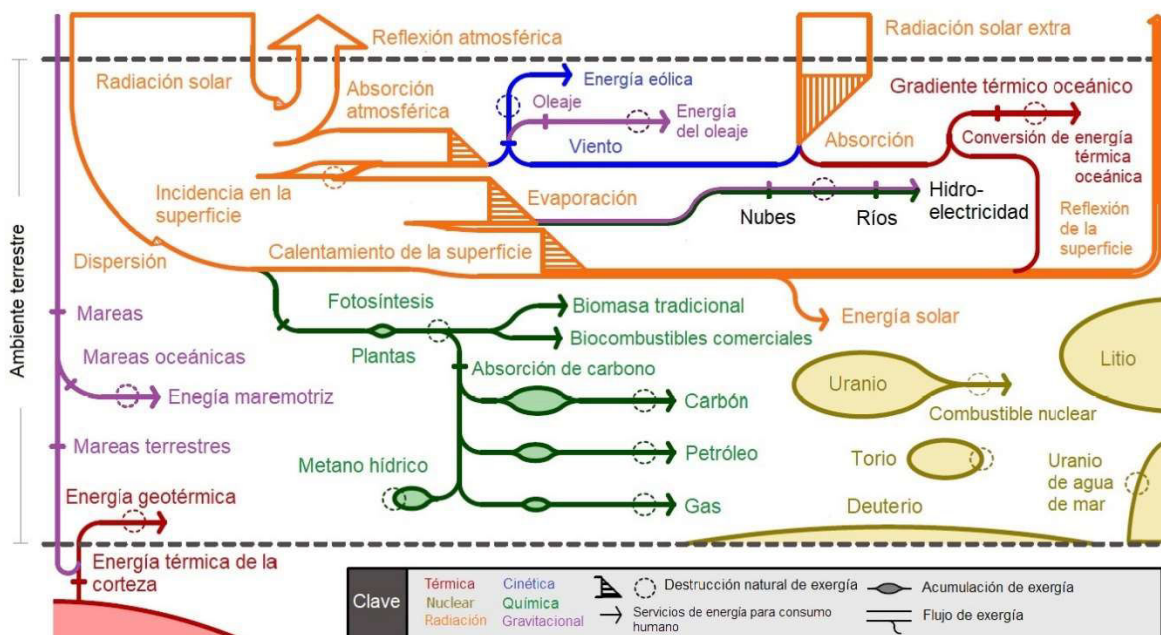


Figura 1.1 Flujos de energía en la Tierra (Herman, 2006)

El hombre a lo largo de su historia ha sido capaz de aprovechar las diferentes fuentes de energía de las que dispone, en un principio, al igual que el resto de los seres vivos se limitaba a obtener su energía de sus alimentos, ya fueran plantas o animales que a su vez se alimentaban de otras plantas o animales. Aún en nuestros días, la fotosíntesis sigue siendo la conversión de energía más importante en el planeta, salvo algunos organismos de las profundidades del mar, la fotosíntesis provee la energía de los seres vivos (Smil, 2015).

1.1 La primera era de la energía, el fuego y la primera transición energética.

En el momento en que el hombre domina el fuego, una de las fuentes de energía más primitivas, accesibles y efectivas que tenemos y sin duda la mayormente utilizada, la brecha que existía entre él y el resto de los animales se hace más grande, su poder aumentó. De acuerdo con el Dr. Richard Wrangham, primatólogo de la Universidad de Harvard, usar el fuego para la cocción de alimentos fue lo que determinó que nos convirtiéramos en humanos “Cocinar incrementó el valor de nuestros alimentos. Cambió nuestros cuerpos, nuestros cerebros, nuestro uso del tiempo y nuestra vida social. Nos hizo consumidores de energía externa y por lo tanto creó un organismo con una nueva relación con la naturaleza, dependiente de combustible” (Wrangham, 2009)

Según los estudios de Wrangham, la cocción de los alimentos propició la evolución del Homo Sapiens. Las enormes quijadas trituradoras de plantas ya no fueron necesarias y nuestros dientes y por ende la boca se hicieron más pequeños, todo el aparato digestivo se redujo: estómago, intestinos. El primate con el tamaño de apertura de boca más parecido a la nuestra es el mono ardilla, un adulto de esta especie mide alrededor de 30 centímetros. El proceso de digestión se vio favorecido y toda esa energía que se requería para soportarlo pudo ser utilizada de otra manera: un cerebro más grande. Los cerebros son excepcionalmente codiciosos de glucosa, es decir, de energía. Aún y cuando el cerebro representa tan sólo 2.5% de nuestro peso corporal, entre una cuarta y una quinta parte de los alimentos que consumimos se utilizan para mantenerlo activo. El uso de fuego nos permitió cocinar, lo cual incrementa sustancialmente la cantidad de energía que obtenemos de los alimentos.

Sin embargo, el tamaño no lo es todo, compartimos este planeta con animales cuyo cerebro es considerablemente más grande que el nuestro, como las ballenas, los elefantes o incluso las vacas. La Dra. Suzana Herculano-Houzel, neurocientífica brasileña, en su libro “La ventaja humana: un nuevo entendimiento de cómo nuestros cerebros se hicieron sobresalientes”, explica que la diferencia entre nuestro cerebro y el de otros animales de igual o mayor tamaño radica en que el nuestro es un cerebro de primate, el cual tiene la peculiaridad de contener una gran cantidad de neuronas en la corteza cerebral, más que las de otros mamíferos. La corteza cerebral es la parte del cerebro responsable de encontrar patrones, razonar, desarrollar tecnología y compartirla a través de la cultura.

La expansión del tamaño del cerebro comenzó dos millones de años posteriores al Australopithecus, durante la etapa de Homo erectus. Figura 1.

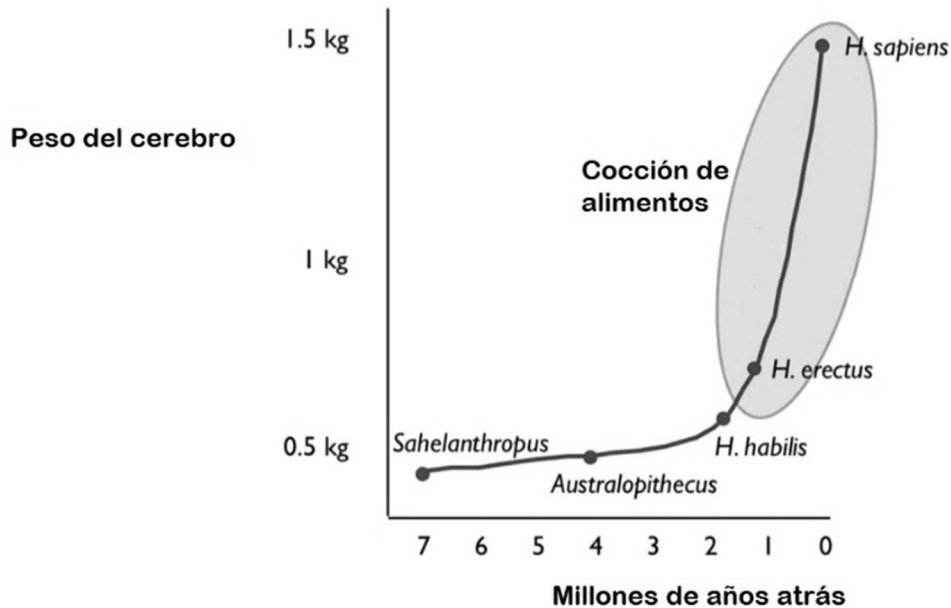


Figura 1. Crecimiento del cerebro, cocción de alimentos y evolución humana. (Herculano-Houzel, 2016)

Y con el fuego no sólo se modifica la dieta, Wrangham propone también que, al utilizar sus fogatas como medio de protección, ya no le es necesario subir a los árboles para resguardarse durante la noche, cambiando así mismo su anatomía para estos propósitos. Se desconoce cuál fue la esperanza de vida de los primeros humanos, pero se cree que mucho tuvo que ver con su incremento el uso de fuego, al ser capaces de protegerse mejor de sus depredadores. Es altamente probable que el *Homo erectus* haya perdido su pelo corporal porque tenía un sistema alternativo para mantener el calor de su cuerpo durante la noche, sin pelo los primeros humanos fueron también capaces de recorrer largas distancias durante épocas de calor cuando la mayoría de los animales están inactivos.

Los animales con los cerebros más grandes tienden a vivir en sociedades más complejas. Si una especie tiene limitado su potencial cerebral sus opciones sociales se ven limitadas también.

El hombre encontraría lugares que le resultarían atractivos para habitar por mayores periodos de tiempo, o incluso asentarse, aquellos de clima cálidos, cerca del agua donde la vegetación abundaba; ya no tendrían que ir a buscar animales para cazar, éstos llegarían solos buscando saciar su sed. Descubrirían los procesos de las plantas y aprenderían a cultivarlas ellos mismos. Habría animales que atraídos por los desperdicios que les servían como alimento se quedarían y acabarían por ser domesticados lo que daría al hombre la idea de domesticar otro tipo de animales que pudieran resultarle útiles, del transporte de cargas en general se pasó a la tracción y posteriormente a ser un medio de transporte personal.

La obtención de cosechas regulares provocó los primeros excedentes y con ello los primeros especialistas y su necesidad de mejores utensilios agrícolas. El fuego empezó a usarse para fundir metales, producido inicialmente con madera y posteriormente con carbón vegetal, el cuál contaba con mayor densidad energética, 50 por ciento más (29 MJ/kg contra no más de 20 MJ/kg de la madera). La variedad de metales susceptibles a fundición aumentó.

“La domesticación de animales de tracción y el aprovechamiento del fuego para producir metales y otros materiales durables constituyó la primer gran transición de la energía” (Smil, 2004, p. 550)

Con el asentamiento, las estructuras sociales se hicieron más complejas y los requerimientos de energía se hicieron cada vez mayores. “La solución más fácil, más inmediata, venía dada por el aprovechamiento máximo de la energía muscular del hombre” (Zorzoli, 1978, p. 17). Comienzan las sociedades esclavistas que, si bien sirvieron para satisfacer las necesidades más urgentes, también fungieron como freno para el desarrollo de la sociedad. La mano de obra resultaba tan atractiva económicamente hablando que no existía la necesidad de estudiar medios de producción que pudieran prescindir de ella, una analogía con el uso de combustibles fósiles en la actualidad.

La caída del Imperio Romano provocaría lo que para Zorzoli sería la primera crisis energética de la historia, al disminuir la principal fuente de esclavos, los prisioneros de guerra de las campañas militares victoriosas, para el caso de esta tesis, encontraremos la primera crisis más adelante.

1.2 La segunda transición energética, energías hídrica y eólica.

Además del fuego, el hombre encontraría también en las corrientes de agua y el viento un gran aliado, utilizaría la fuerza hidráulica para desplazarse sobre el agua y para moler granos al igual que con la eólica. Los molinos de agua y de viento podían sustituir buena parte de la energía animal y humana requerida, fue una nueva forma de obtener energía que, si bien no fue global como el uso de la biomasa, constituiría la segunda transición energética.

Para finales de la Edad Media la energía del viento pudo ser aprovechada de una manera más efectiva en la navegación marítima, los barcos se hicieron de mayor tamaño al ser capaces de aprovechar mejor el viento a través de velas más grandes, resistentes y más ajustables, los viajes pudieron llegar a tierras cada vez más lejanas. La inexorable tendencia a la globalización comenzaba. Los mapas serían actualizados constantemente, nuevas tierras serían añadidas, nuevas tierras serían conquistadas.

La madera era utilizada para la construcción, para el calentamiento en hogares e industria, para hacer carbón y enormes embarcaciones. Vannoccio Biringuccio, un metalúrgico italiano nacido en 1480, escribió un manual de metalurgia (el primero del que se tiene conocimiento de la práctica), donde decía: “A pesar de que hay muchas otras cosas con las que se puede producir fuego y lo harían, no conozco ninguna que esté mejor adaptada para este propósito, o que puede ser tan fácilmente obtenida en vastas cantidades que la madera y el carbón. Ya que como puedes ver, se pueden encontrar enormes bosques que lo hacen a uno pensar que el hombre a través del tiempo no las agotaría, especialmente dado que la Naturaleza, tan generosa, produce nuevos cada día.” (Biringuccio, 1540, p. 135). Pasaría casi un siglo para probar que Biringuccio estaba equivocado. Inglaterra fue el primer país en sufrir los efectos de la escasez de madera, la población de Inglaterra y Gales se había casi duplicado entre los años de 1550 y 1700, la demanda de madera se intensificó por cambios en la distribución de la población, en este mismo periodo la población de Londres se había hecho ocho veces mayor. El crecimiento de las ciudades implicaba una mayor demanda de madera de los bosques aledaños, existía una alta migración de personas de zonas rurales en busca de empleo y donde lo encontraban necesitaban de algún refugio, provocando que el requerimiento de madera fuese aún mayor. Los precios de la madera comenzaron a elevarse, así como las protestas por los niveles de deforestación. Se hicieron imperativos los esfuerzos del gobierno

inglés para detener la deforestación causada por el uso excesivo de madera. La actividad antropogénica por primera vez habría rebasado la resiliencia de la naturaleza, por desgracia no sería la última vez. La crisis de la madera se debió a los requerimientos de una agricultura en expansión, de la industria y del comercio, todos estimulados por una población creciente y cambiante. “La primera crisis de energía, que mucho tiene que ver con la que enfrentamos actualmente, fue una crisis de deforestación” (Nef, 1977, p. 140)

1.3 La tercera transición energética, el carbón.

La transición de cortar madera a extraer carbón mineral como la principal fuente de calor fue parte del inicio de una revolución económica británica, la primera economía basada en carbón de la que se tiene noticia. La adopción del carbón mineral cambió la historia económica de Inglaterra y posteriormente de Europa, para terminar siendo global. Ésta sería la tercera gran transición de la energía: la sustitución de los impulsores animados por motores y de la biomasa por combustibles fósiles; una transición más que no se daría a nivel mundial. Muchos son los países de escasos recursos cuya fuente principal de energía sigue proviniendo de biomasa y de animales o de la misma población. Figura 2. El carbón no fue sólo una fuente de energía sino también un estímulo para el desarrollo de tecnología. La adopción del carbón dio lugar a la Revolución Industrial.

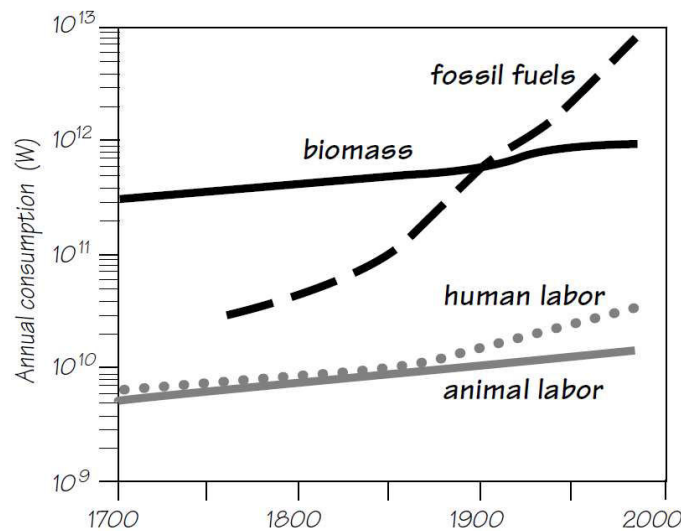


Figura 2. La transición energética de biomasa a combustibles fósiles (Smil, 2006, p. 134)

El carbón fue introducido tan exitosamente en la tecnología y la economía inglesa que durante las últimas cuatro décadas del siglo XVII el precio de la madera dejó de crecer. Se producía cuatro veces más calefacción con carbón que con madera, sería la primera vez que una potencia dependiera de recursos del subsuelo como su principal fuente de combustible. En 1865 William Stanley Jevons, un economista inglés, publicaría su libro “La cuestión del carbón” donde expondría que los depósitos de carbón también eran finitos y la Paradoja de Jevons, que sostenía que “los incrementos en la eficiencia de la tecnología, específicamente el aprovechar mejor el carbón usado en motores que hacían trabajo mecánico, en realidad incrementaba el consumo total de carbón, hierro y otros recursos, más que ahorrarlos, como muchos decían. La teoría del crecimiento económico del siglo XX también ve el cambio tecnológico como la mayor causa del incremento de producción y consumo” (Alcott, 2005, p. 9). Para Jevons lo importante no era la cantidad de carbón disponible, sino el crecimiento del ritmo de consumo y las leyes naturales que lo gobernaban. Encontró que existían tres factores a considerar: crecimiento poblacional, nuevas aplicaciones (encontradas o inventadas) y el deseo de consumir.

A raíz de la Revolución Industrial, fue posible por primera vez producir en grandes cantidades. La máquina de Watt, construida originalmente como motor para las bombas en la minería se empleó rápidamente en otras aplicaciones liberando a varias industrias de la dependencia de la rueda hidráulica, o de la energía eólica. La independencia resultante de fuentes de energía fijas dio la posibilidad a la máquina de Watt de usarse en el transporte, surge entonces la primera locomotora a vapor, el primer transporte terrestre libre de potencia animada. El nuevo medio de comunicación experimentaría un desarrollo impresionante, lo que repercute en la demanda de carbón, no sólo por ser el combustible empleado para su desplazamiento, sino también porque era el combustible necesario para construir miles de kilómetros de vías férreas. De forma similar los transportes marítimos serían actualizados con las nuevas tecnologías repercutiendo así mismo en la demanda de carbón. Un transporte más efectivo da la posibilidad de una mejor comercialización de bienes, empieza una batalla comercial y una lucha por el control de las materias primas entre las principales potencias que resultaría en un enriquecimiento del arsenal bélico, inicia una carrera armamentista que consume aún más acero y más carbón.

1.4 La cuarta transición energética. La era del petróleo.

Hacia miles de años que se conocían los hidrocarburos, pero en la antigüedad su uso se remitía básicamente a la construcción y como recubrimientos protectores. Los chinos fueron los únicos de quienes se tiene noticia, que hayan quemado gas natural para evaporar salmuera. Tendrían que pasar dos mil años para que empezara la época de los hidrocarburos.

Las largas jornadas en las fábricas, consecuencia de la Revolución Industrial, requirieron de más luz artificial, los destilados de keroseno empezaron a reemplazar al aceite de ballena utilizado para lámparas gracias a su competitivo precio, la industria petrolera empezó a verse estimulada. “La gasolina en aquel entonces era un subproducto casi inservible que en ocasiones podía venderse (en Estados Unidos) a lo mucho en dos centavos el galón, y cuando no lo podían vender en lo absoluto, lo echaban al río en la noche” (Yergin, 1990, p. 14)

El mercado primario para el petróleo comenzaba a desaparecer cuando Thomas Edison inventó el foco y creó la industria de generación eléctrica que ofrecía luz de mejor calidad, que no necesitaba ser cuidada por el usuario; sin embargo, la invención y rápida aceptación de los motores de combustión interna abrieron aún más el mercado.

El petróleo, con el paso del tiempo, “proveería movilidad y poder a la población mundial, jugaría un papel central en el surgimiento y la caída de naciones e imperios, y se transformaría en un elemento crucial para la transformación de la sociedad humana” (Yergin, 1990, p. 29)

En los Estados Unidos, la industria del petróleo vería un fuerte crecimiento. Inicialmente la producción serviría para la demanda local, pero con el descubrimiento de enormes yacimientos se vio la posibilidad de usar el petróleo como fuente de energía a nivel global.

John D. Rockefeller establecería Standard Oil en 1870, la mayor refinería del mundo en aquel tiempo, así como una de las primeras y más grandes corporaciones multinacionales que existirían. Inicialmente, Standard Oil dominaría el mercado a través de una integración horizontal en el sector de refinación, posteriormente pasaría a un esquema de integración vertical, que simplificaría su producción y logística, reduciría sus costos y mejoraría sus precios de venta, para 1879 habría prácticamente eliminado a la competencia y se consolidaría como un monopolio, controlando entre el 90 y 95 por ciento de todo el petróleo producido en los Estados Unidos.

Para 1880 las exportaciones rusas de queroseno comenzaron a mermar el control que tenía Standard Oil sobre los mercados europeos, los hombres de Rockefeller intentaron contraatacar usando la misma estrategia que los llevó a conquistar el mercado estadounidense, reducciones de precios. La estrategia no sólo no funcionó, llevó a los Rothschilds, una familia de origen francés cuyo capital había servido para financiar los trenes que abrirían el mercado ruso al resto del mundo, a expandir su dominio a territorio asiático, el cual también era mayormente controlado por Standard Oil. Para este efecto el hombre clave fue un inglés de nombre Marcus Samuel, un comerciante con experiencia en el transporte de bienes, quien propuso que el petróleo fuera transportado en un solo contenedor de gran tamaño en vez de muchos barriles que ocupaban mucho espacio, en naves que cumplieran con las estrictas normas de seguridad requeridas para poder atravesar por el Canal de Suez, lo cual reducía el tamaño de los trayectos y los costos. Samuel idearía también la construcción de terminales y puntos de almacenamiento en puertos clave de Asia, lo que les permitía recibir mayores cantidades de queroseno. Marcus Samuel se convirtió en un grande de la industria petrolera y establecería en 1897 su propia compañía, Shell Transport and Trading Company, inspirado en los orígenes de su negocio, el comercio de conchas de mar.

El mercado asiático se vería sobrepoblado con la entrada de un tercer competidor, Royal Dutch Company. Shell había invertido fuertemente en refinerías, navíos petroleros, tanques de almacenamiento y tuberías que empezaron a ser subutilizadas cuando empezó a mermar el petróleo que extraían. Royal Dutch Company y Shell se unirían en 1907 lo que las llevaría a ser competitivas globalmente.

En 1901, en una pequeña colina cerca de la ciudad de Beaumont, Texas, fue hallado el mayor yacimiento en la historia de los Estados Unidos, Spindletop. “El petróleo fluía con tal intensidad que formaba una inmensa fuente desbordada, capaz de proveer 75,000 barriles diarios” (Maugeri, 2006, p. 15). Desgraciadamente los *wildcatters* o exploradores de la fiebre del petróleo, perforaron demasiados hoyos demasiado rápido, la presión interna del yacimiento fue disminuyendo y para el siguiente año Spindletop ya no produciría más petróleo. Tres años más tarde se encontraría otro gran yacimiento en Oklahoma, nuevas compañías emergerían entre ellas Texas Oil Company (Texaco).

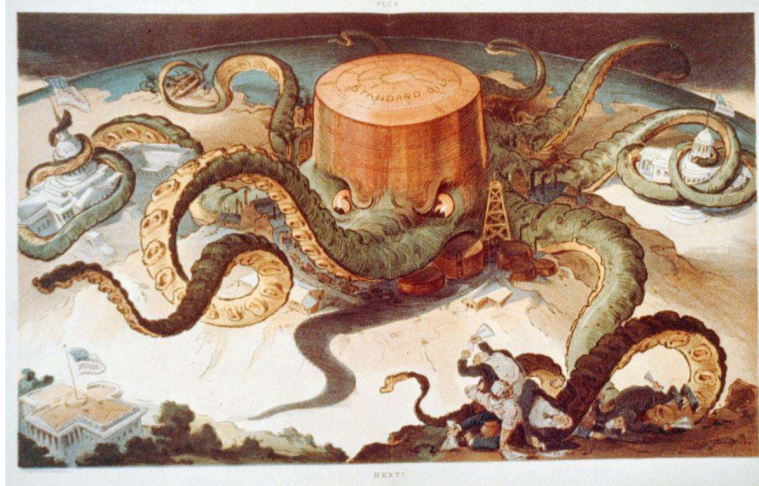


Figura 3. Standard Oil, el pulpo. (Stanford History Education Group, n.d.)

Para principios del siglo XX, Standard Oil ya no estaba solo en el mercado mundial, eran ya varios los competidores y a pesar de eso su mayor ataque no vino del extranjero. En Estados Unidos la producción y distribución de productos de petróleo a gran escala progresó, pero muchos críticos consideraban que la concentración del poder no sólo económico se había vuelto excesiva. El negocio de Rockefeller era descrito como un pulpo, un monstruo codicioso. En septiembre de 1904, Udo J. Keppler publicaría una caricatura mostrando un tanque de almacenamiento de Standard Oil con tentáculos sujetando la industria acerera, la del cobre, las industrias del transporte, la Cámara de Representantes, el Capitolio y la Casa Blanca. (Figura 3) En 1906, el gobierno de los Estados Unidos demandaría a Standard Oil bajo la Ley Sherman Antimonopolios. Para 1909 Estados Unidos producía medio millón de barriles de petróleo diarios, más que el resto de los países juntos. En 1911 el imperio de Standard Oil se vería disuelto dando lugar a varias entidades: Standard Oil of New Jersey, con casi la mitad del valor total y que eventualmente se convertiría en Exxon, Standard Oil of New York (Mobil), Standard Oil California (Chevron), Standard Oil of Ohio que se transformaría en Sohio y finalmente sería la parte americana de BP, Standard Oil of Indiana (Amoco), Continental Oil (Conoco) y Atlantic que sería parte de ARCO y eventualmente de Sun.

La industria automotriz comenzaría a ver su auge también a comienzos del siglo XX, la venta de gasolina sobrepasaría la de querosenos y de otros aceites para iluminación en lo Estados Unidos. La inminente transformación energética hacia el petróleo había iniciado, los patrones de consumo

del crudo se habrían modificado para siempre, además, este nuevo energético jugaría un papel estratégico en los poderes políticos.

Los productos refinados del petróleo eran más fáciles de manejar que el carbón, era más económico transportarlos y almacenarlos, además su densidad energética era 50 por ciento mayor a la del carbón; todas estas ventajas hicieron de los hidrocarburos líquidos un excelente combustible para el transporte. Después de que los primeros automóviles fueran construidos, los sucederían pequeños aviones. En pocos decenios se desarrollarían soluciones técnicas capaces de absorber todos los derivados del petróleo.

Por primera vez las fuentes energéticas y los grandes consumidores de energía podían encontrarse a miles de kilómetros de distancia, como el caso de Europa y Oriente Medio.

Winston Churchill se dio cuenta de las ventajas que representaba reemplazar el carbón por destilados de petróleo en las flotas navieras, la mayor eficiencia térmica permitía un mayor y más rápido desplazamiento, gracias a la densidad energética se requería la mitad en peso de nafta para sustituir al carbón. Sin embargo, los ingleses contaban con carbón, pero no con petróleo por lo que se vieron en la necesidad de asegurar sus suministros lo cual lograron adquiriendo en 1914, el 51 por ciento de las acciones de Anglo Persian Oil Company, unas semanas más tarde se desataría la Primera Guerra Mundial.

A principios de la Primera Guerra Mundial, Gran Bretaña contaba con alrededor de 800 vehículos motorizados, muchos de ellos confiscados a ciudadanos. Para el final de la guerra, ya eran 56,000 camiones y 36,000 automóviles. El desarrollo de aviones y tanques de guerra dieron movilidad y un poder sin precedentes en la historia de la guerra. El petróleo comenzó a dar una ventaja crítica, tanto para la economía moderna como para la estrategia militar, se convirtió en un mineral clave cuyas fuentes requerían ser aseguradas.

Entre 1914 y 1918 el consumo mundial de petróleo se elevó un 50 por ciento, al mismo tiempo que los suministros rusos se veían mermados por los daños provocados por la guerra, así como por la Revolución Bolchevique. Rusia terminaría por nacionalizar su industria petrolera. El precio del crudo se incrementaría de menos de 2 dólares el barril, a 3 dólares. Las potencias mundiales buscaron asegurar su suministro. La Triple Entente (Gran Bretaña, Francia y Rusia) se dividirían territorios clave que serían obtenidos después de la derrota del imperio Otomano adquiridos a base

de falsas promesas al pueblo árabe, la Gran Nación Árabe. En la Conferencia de San Remo de 1920 Gran Bretaña establecería que toda compañía petrolera a asentarse en la región de Mesopotamia debía estar bajo su control permanente, a Francia le fue otorgada parte de la Turkish Petroleum Co. Los árabes no cederían tan fácilmente, después de varias revueltas y muchas muertes Gran Bretaña accedería a un gobierno local, escogido por supuesto por los ingleses. Los estadounidenses también querrían su parte en la empresa y propondrían que hubiera un libre acceso a todos los países del mundo a cualquier empresa petrolera independientemente de la nacionalidad. La idea no sería bien recibida inicialmente, pero para 1928 llegarían a un arreglo, BP, Shell, Total y los precursores de Exxon-Mobil se harían socios por partidas iguales, 23.75 por ciento, de Turkish Petroleum Co. (más tarde renombrada Iraq Petroleum Company), el 5 por ciento restante sería para Calouste Gulbenkian, empresario inglés de origen armenio, desarrollador de compañías petroleras de las que siempre mantenía un 5 por ciento, al igual que había hecho en la fusión de Royal Dutch Shell. Siete grandes compañías obtendrían para principios de la década de 1930 el control del petróleo en Oriente Medio, las “Siete Hermanas”. Para entonces ya también se aseguraba el control del petróleo en Latinoamérica. En México, Porfirio Díaz habría contratado a Weetman Pearson, ingeniero inglés que concibió el Canal de Panamá para que llevara a cabo obras hidráulicas, portuarias y ferroviarias en México, y quien acabaría estableciendo la compañía petrolera El Águila, la tercera a nivel mundial en cuanto a tamaño de aquel tiempo, apenas atrás de Estados Unidos y Rusia. La compañía sería vendida a Shell debido a que Porfirio Díaz se retiraba y las consecuencias le inquietaban a Pearsons. El nacionalismo petrolero comenzaría en Latinoamérica. La opción sería Venezuela cuya producción de petróleo se incrementaría drásticamente bajo las manos de tres compañías: Exxon, Shell y Gulf. La bonanza llegó con un precio, se perdió participación en sectores como el agrícola y pequeños productores que los llevó a una espiral inflacionaria que empobreció a todo aquel no relacionado con la industria petrolera, el fenómeno recibiría el nombre de “enfermedad holandesa” ya que en Holanda se presentaría un fenómeno similar al descubrirse enormes yacimientos de gas natural mermando el poder adquisitivo de todo aquel que estuviese fuera de la industria del gas natural. El mismo destino sufriría el Oriente Medio más tarde.

Siguiendo el ejemplo de la Gran Bretaña, Francia decidió invertir en Mesopotamia a través de su Compagnie Française de Pétroles, Italia establecería su empresa estatal Azienda Generale Italiana Petroli, seguirían también Polonia, Rumania, Holanda, Noruega, Suecia y Dinamarca. Alemania

buscaría alternativas a través del carbón mediante el cual producirían combustibles sintéticos, su alto costo los haría poco viables.

La producción petrolera se incrementaría de 1.5 millones de barriles en 1919 a cerca de 4 millones una década más tarde, cifra que excedía el consumo. Las compañías petroleras en su búsqueda por una mejor competitividad buscaron una integración vertical, tratando de asegurar desde el suministro hasta su consumidor final.

El consumo de gasolina se elevó de tal manera que su venta era ya demasiado para los almacenes generales y se instalaron los primeros expendios de gasolina en Estados Unidos del tipo “drive-through” donde los consumidores recibían el servicio hasta su vehículo, el modelo sería más tarde adaptado para la comida.

Hasta 1940, Estados Unidos fue el máximo productor petrolero, producía el 65 por ciento del consumo mundial, tiempo después, enormes yacimientos serían descubiertos en Oriente Medio, el mundo entero empezaría a depender de ese petróleo, incluyendo Estados Unidos.

Para la víspera de la Segunda Guerra Mundial, aun cuando el petróleo se consolidaba como un bien crítico, era el carbón el que proveía el 80 por ciento de las necesidades energéticas primarias en el mundo. La progresiva marginación del carbón sería consecuencia también del poder político y económico de las compañías petroleras.

Las Siete Hermanas habrían logrado consolidarse como un cartel, estaban bien organizadas e integradas verticalmente lo cual les daba poder sobre sus competidores, fórmula que había probado ser fructífera para Standard Oil, además tenían la capacidad de ejercer influencia política, atributos que las llevaría a tener control sobre el petróleo de países del tercer mundo.

Durante la Segunda Guerra mundial, el acceso a energéticos probó una vez más ser un factor fundamental para el éxito. Una vez que estalló la guerra, en Estados Unidos se dejaron de manufacturar automóviles, bicicletas, máquinas de escribir, refrigeradores u otros productos metálicos, el metal era destinado a la manufactura de aviones y armas. Se llevaron a cabo campañas para minimizar el uso de los preciados energéticos. Figura 4.



Figura 4. Poster de campaña de ahorro de combustibles. U.S. Government Printing Office (1943)

Los aliados usaron durante la Segunda Guerra Mundial un total de siete mil millones de barriles de petróleo. Los ataques tanto de Japón como de Alemania tenían como propósito ganar acceso a energéticos, pero su falta de ellos los llevó al fracaso.

Para 1948, EU sea había convertido en importador neto de petróleo por primera vez en su historia, el petróleo en otros países era más abundante y más económico de extraer que en su propio territorio, sin embargo, el nacionalismo empezaba a inundar a varios países petroleros. Inspirados por la expropiación petrolera mexicana, los venezolanos propusieron el plan 50-50 en donde la mitad de lo extraído les fuese remunerado. Exxon, Shell y Gulf buscaron apoyo en su gobierno, pero la administración de Truman se los negó bajo el argumento de que los valores estadounidenses incluían la justicia, la igualdad y el anticolonialismo. El pacto 50-50 tuvo que ser aceptado lo cual más tarde provocaría que el rey de Arabia saudita ibn-Saud pidiera el mismo trato, la propuesta fue aceptada para evitar cualquier conflicto con los territorios que les resultaban tan importantes. Una de las mayores consecuencias de compartir las ganancias de la renta petrolera fue el poder fijar el precio de venta. Irán exigiría el mismo trato de Anglo-Iranian Oil Company (BP) el cual se negaría e Irán buscaría nacionalizar su petróleo, Inglaterra le impondría un embargo que casi lo arruinaría económicamente. EU "ayudaría" con la intención de evitar que Rusia pudiera aprovecharse de la situación. Manipuló la opinión pública, sembró grupos de oposición y finalmente dejó un gobierno dictatorial encabezado por Mohammed Reza Pahlavi en agosto de 1953. El control sobre el petróleo quedó a cargo de un consorcio internacional, 40 por ciento fue

dividido en partes iguales entre Exxon, Mobil, Texaco, Gulf y Chevron, Shell recibió un 14%, Total-CFP 6% y la Anglo-Persian Oil Company recibió el 40% restante y se vió obligada a cambiar su nombre a British Petroleum.

Lo que pareciera un triunfo para EU en realidad comenzó a generar sospechas sobre éstas siete compañías. La Comisión Federal de Tratados investigó y concluyó que las gigantes petroleras se habían dividido los mercados de crudo más importantes a nivel mundial para evitar tener más competidores. El 80% de la producción mundial estaba en manos de 7 compañías: Exxon, Texaco, Chevron, Mobil, Gulf Oil, Royal Dutch Shell y BP.

El consumo de petróleo entre 1948 y 1973 creció de 9.3 a 56 millones de barriles de petróleo diarios. El éxito del petróleo para impulsar el desarrollo de la economía moderna provocó la más rápida sustitución de una fuente primaria de energía, dejando atrás al carbón. "El efecto más impactante del triunfo del petróleo, y su principal fuente de consumo, fue la motorización masiva" (Maugeri, 2006, p. 79) De 1950 a 1973 los vehículos de pasajeros aumentaron de 53 a 259 millones, para 1980 ya eran más de 440 millones de los cuales 148 millones estaban en EU.

La Unión Soviética lograría recuperarse de los conflictos tanto mundiales como internos. Fueron capaces de ofrecer en mercados europeos su petróleo a precios hasta 30% por debajo de los de las Siete Hermanas. Enormes ductos fueron construidos.

En 1956, M. King Hubbert, un geologista y geofísico estadounidense, propondría su teoría del pico de producción petrolera basada en sus observaciones de que la cantidad de petróleo en el subsuelo de cualquier región es finita y la curva de producción crece rápidamente en un principio, alcanza un máximo y posteriormente cae. Basado en su teoría pudo predecir con precisión cuando el pico de producción de los Estados Unidos sería alcanzado: entre 1965 y 1970, el pico alcanzado en 1970 efectivamente no ha sido rebasado con la extracción de fuentes convencionales de petróleo. La introducción de nuevas tecnologías hizo que la teoría no se pudiera aplicar a nuevos pozos. Sus predicciones sobre cuándo se acabaría el petróleo en la tierra no fueron correctas. En el mismo año de la introducción de la teoría del pico de Hubbert, por primera vez en su historia, la industria petrolera norteamericana invirtió más en sus mercados extranjeros que en los domésticos ya que le generaban mayores utilidades. En 1959, el presidente estadounidense Eisenhower, tratando de

proteger el mercado interno topó el monto de petróleo importado a 13%. Estados Unidos consumía el 40% del petróleo producido a nivel mundial. Las siete hermanas optaron por reducir precios menguando así la renta de los países productores: Venezuela, Arabia Saudita, Iraq, Irán y Kuwait. La inconformidad acabaría por materializarse en 1960 en la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) un instrumento que les daba la posibilidad de negociar en conjunto además de permitirles hacer un frente de autodefensa. La tendencia inflacionaria del mercado petrolero se vería aún más agravada con la entrada al campo de juego de África con una nada despreciable intervención que alcanzaría en 1972 los 5 millones de barriles diarios de petróleo.

Para finales de los 60s principios de los 70s los países árabes habrían nacionalizado buena parte de su producción petrolera. Estados Unidos sufría por las restricciones implementadas por Eisenhower. "Las malas regulaciones siempre buscan arreglar el daño causado imponiendo nuevas reglas, en la mayoría de los casos esto sólo empeora la situación. Asimismo, la militancia regulatoria de la administración de Nixon hizo tanto daño a Estados Unidos como al resto del mundo, más vulnerable al eventual choque de petróleo. Para algunos expertos, como Edward Morse, incluso "convirtió al petróleo en una útil arma árabe"." (Maugeri, 2006, p. 108)

La alianza entre EU e Israel acarrearía sentimientos de inconformidad en el Medio Oriente, los gobiernos árabes apoyaban a la Organización de Liberación Palestina. "Y en realidad fue esta colisión entre el problema árabe-israelí y el del petróleo lo que detonó finalmente la crisis energética que muchos había temido" (Maugeri, 2006, p. 109). Para principios de los 70's el precio de crudo se dispararía. "Es difícil encontrar en la historia una revolución comparable en el precio de un recurso estratégico" (Maugeri, 2006, p. 114). El hecho golpeó tanto a países productores como no productores. El Club de Roma en su reporte "Los límites de crecimiento" habrían proyectado en 1972 una era de escasez, basados en un limitado número de reservas que estaba muy por debajo de la realidad, pero si bien su aseveración no era correcta, impulsó a que en el mundo occidental pusiera mayor atención a su alto consumo de energéticos y el efecto que esto tenía en el medio ambiente.

Egipto y Siria atacarían Israel en 1973, Estados Unidos le proveería armas, lo que provocaría que países de Oriente Medio le impusieran un embargo. Estados Unidos trató de limitar su dependencia energética, el presidente Ford propuso regresar al uso de carbón e incrementar el número de plantas

nucleares entre otros. Para cuando el embargo fue levantado muchas de las propuestas quedaron en el olvido.

En 1974, en respuesta al primer choque de petróleo y buscando formar una respuesta ante la OPEP, se establece la Agencia Internacional de Energía.

Los países productores comenzarían a retirar sus concesiones a empresas extranjeras, comenzando por Kuwait, más tarde Venezuela y finalizando con Arabia Saudita quien al nacionalizar su industria petrolera desplazaba a Exxon, Chevron, Texaco y Mobil de su 40% de Aramco. Arabia Saudita contaba en aquel momento con más de una cuarta parte de las reservas probadas de petróleo a nivel mundial. La era de las siete hermanas llegaba a su fin.

En 1980 la guerra Irán Iraq privaría al mundo de la producción de ambos países, alrededor de 3 millones de barriles. Los precios nuevamente se dispararían. Se pronosticaría que la relación entre la oferta y la demanda del petróleo sería precaria y que el crudo continuaría aumentando de valor. Muchos esfuerzos nuevamente se vieron volcados en políticas de conservación de energía, entre ellas se buscó hacer más eficientes a los vehículos de pasajeros y fuentes alternativas de energía, la nuclear entre ellas. El desarrollo fue rápido a nivel mundial. Se habrían construido 162 plantas en los 70s y 176 más en los 80s a pesar de incidentes como Three Mile Island. Se logró una capacidad mundial de 325,000 MW para 1990. En 1986 el accidente de Chernóbil cambiaría el panorama.

El alto costo del petróleo hizo que la inversión se enfocara en áreas otrora consideradas de alto costo por las dificultades técnicas: Alaska, el mar del norte y México.

Tras la caída de Sadam Hussein en 2003 la situación no mejoró. Los ataques terroristas en territorio iraquí eran comunes y muchos se hacían a la infraestructura del petróleo. La capacidad de producción se redujo afectando mundialmente. Osama bin Laden mandaría el siguiente mensaje al gobierno de los Estados Unidos: “Ustedes roban nuestra riqueza y petróleo a precios miserables por su influencia internacional y sus amenazas militares. Este robo es el mayor robo presenciado por la humanidad en la historia del mundo”.

En la actualidad los máximos productores de petróleo son Arabia Saudita, Estados Unidos y Rusia; los tres países con mayores reservas recuperables son Venezuela, Arabia Saudita y Canadá.

1.5 El impacto ambiental

Para mediados del siglo XX además de los conflictos con el Medio Oriente, la proliferación de nuevos productores y los precios, la industria de los combustibles fósiles encontraría un problema para su desarrollo. Varios científicos advertirían que tanto los avances tecnológicos como el progreso económico habían perturbado el ciclo del carbón a nivel global, uno de tantos procesos de los que depende la vida en la tierra. Roger Revelle, oceanógrafo estadounidense advertiría en 1957, “los humanos están llevando a cabo un experimento geofísico único a gran escala... en unos pocos siglos estamos regresando a la atmósfera y los océanos, el carbón orgánico concentrado en rocas sedimentarias a lo largo de cientos de millones de años” (Black, Brian C., 2013). En 1988 el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) es conformado para registrar y evaluar evidencia sobre el cambio climático. Un año más tarde, la Primer Ministro del Reino Unido, quien además poseía una licenciatura en química, propondría un tratado mundial en cambio climático argumentando en un discurso ante las Naciones Unidas “Estamos viendo un enorme crecimiento en la cantidad de dióxido de carbono liberado en la atmósfera... El resultado es que probablemente el cambio en el futuro sea más grave y más generalizado que cualquier cosa que conozcamos hasta ahora” (Thatcher, 1989). En 1990 la IPCC produciría su Primer Reporte de Evaluación donde se establecería que la huella antropogénica de los gases de efecto invernadero se vería reflejada en un calentamiento global. En 1992 más de 40 países acordaron al adherirse a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, “la estabilización de la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel tal que prevenga la interferencia antropogénica peligrosa con el sistema climático”. Margaret Thatcher sería la primera líder de una potencia económica en comprometerse en la Cumbre para la Tierra de Río. En 1997, se acuerda en el Protocolo de Kioto un compromiso para la reducción de emisiones, cuatro años más tarde George W. Bush retiraría a Estados Unidos del acuerdo, en aquel entonces era el mayor emisor de gases de efecto invernadero a la atmósfera, para 2009 sería sobrepasado por China. En 2013 el Observatorio Mauna Loa de Hawai reporta que el promedio de la concentración diaria de

dióxido de carbono en la atmósfera ha rebasado las 400 partes por millón (ppm) por primera vez desde que se comenzó a medir en 1958. En 2015 se adopta el Acuerdo de París, 195 naciones acuerdan combatir el cambio climático e invertir hacia un futuro de bajo carbón y sostenible. En 2017, el Jefe de Estado de uno de los mayores consumidores de energía y emisores de gases de efecto invernadero, Estados Unidos, decide retirarse del acuerdo de París.

1.6 La electricidad

Paralela a la evolución del petróleo se daba la de otro energético que, si bien aún no es capaz de mover enormes y pesados vehículos como los utilizados en tiempos de guerra, llegó a ser un parteaguas para la vida de los habitantes de este planeta. El uso del petróleo comienza con la necesidad de keroseno para las lámparas hasta que Thomas Alva Edison creara la industria de la generación eléctrica. El 4 de septiembre de 1882, Edison encendería el primer sistema de distribución de energía eléctrica en el mundo, éste proporcionaba 110 voltios de corriente directa a cincuenta y nueve clientes, así fue como la primera estación comercial de energía comenzó a funcionar, proporcionando luz y electricidad a una milla a la redonda. La era eléctrica había comenzado. La estación contaba con los cuatro elementos necesarios para el funcionamiento de un sistema moderno de utilidad eléctrica: distribución eficaz, precio competitivo, generación central confiable y utilización final exitosa.

A finales del siglo XIX, Nikola Tesla empezó a trabajar con la generación, uso y transmisión de electricidad de corriente alterna. Con la ayuda de Westinghouse, introdujo la iluminación interior a hogares y a la industria, haciendo uso de un generador podía alcanzar distancias mayores que la transmisión en corriente directa valiéndose de la factibilidad de subir y bajar el voltaje, transmitiendo a altos voltajes y así reduciendo pérdidas. En 1886, Westinghouse y William Stanley instalaron el primer sistema de energía de corriente alterna de voltaje múltiple, para 1888 sería desarrollado el medidor de energía.

Uno de los grandes retos ha sido lograr una buena eficiencia en la generación de energía, en el año 1900 en Estados Unidos la relación entre los combustibles fósiles utilizados y la electricidad generada era de apenas 2%, 50 años después del 10%, para el año 2000 se había alcanzado el 34%.

Hoy en día existen ciclos combinados que alcanzan el 45%. Se buscaron alternativas para esta generación, encontrando una en el uso de hidroenergía, las obras civiles disponían de concreto reforzado con acero lo que permitió grandes obras financiadas por el estado tanto en Rusia como en Estados Unidos. Más tarde prácticamente todos los países construirían sus presas, salvo aquellos subtrópicos áridos o pequeñas islas.

En 1896 se pondría en marcha el generador hidroeléctrico de las Cataratas del Niágara, fue el primer gran sistema que proporcionó electricidad desde un circuito para fines múltiples como los sistemas de ferrocarril, iluminación y energía. Más tarde se desataría una “Guerra de corrientes” para probar cuál era la mejor si la directa o la alterna, ésta última sería la ganadora.

Las lámparas irían evolucionando a filamentos de tungsteno, lámparas al vacío, uso de argón (1913), sodio a baja presión, vapores de mercurio, luces fluorescentes, diodos emisores de luz (LEDs). Las eficiencias fueron en aumento, mientras el precio de la electricidad disminuía, hoy en día un lumen de electricidad cuesta una milésima parte de lo que costaba hace un siglo, esto ha permitido que llegue a un mayor número de personas. Entre los años 1910 y 1930 el número de hogares cableados para recibir electricidad en los Estados Unidos pasó de un 10 a un 70%. La electricidad dejó de usarse sólo para iluminación, a la carga se incluyeron aspiradoras, planchas, lavadoras, tostadores y en 1912 los primeros refrigeradores. Los aparatos eléctricos representaban la liberación de la carga de trabajo que tenían las mujeres. Se calcula que una mujer que tenía que cargar su estufa de carbón perdía 30 minutos más al día que quien contaba con una estufa eléctrica. Con la electricidad no sólo se tiene acceso a una mejor iluminación, se cuenta con un método para calentar, cocinar, mover (o moverse) y comunicarse. Es esencial para proveer de agua limpia, para bombear agua a cultivos, para refrigerar alimentos y medicamentos, para saneamiento y servicios médicos. Ayuda a eliminar la tarea de pasar horas caminando largas distancias para conseguir leña.

Para la industria, la introducción de motores que operaban eléctricamente representó el liberarse de las complejas bandas y flechas utilizadas en fábricas para transferir movimiento a otras máquinas. No sólo se ocupaba mucho espacio, hacían ruido y las pérdidas por fricción eran de gran consideración. Los nuevos espacios liberados pudieron ocuparse para mejorar la ventilación e iluminación, mejorando las condiciones laborales y reduciendo los accidentes. Los motores eléctricos no sólo podían controlarse de manera más precisa, su eficiencia ahora oscilaba entre el 70% y 90%. Hoy en día una muy buena parte de lo que comemos, vestimos o usamos ha sido

fabricado con la ayuda de un motor eléctrico: molienda, hilado, serruchado, moldeado de plásticos y un largo etcétera. No es de sorprenderse que en Estados Unidos los motores eléctricos consuman un tercio de la electricidad que se produce.

Aún con todos los cambios que se daban en la industria, la era de las máquinas de vapor no habría acabado aún, serían utilizadas para la producción de electricidad en centrales eléctricas cada vez más grandes.

Hay también muchas conversiones indispensables en la industria donde los motores no son necesarios pero la electricidad juega un papel importante, como la fundición de aluminio y la producción de acero en hornos de arco eléctrico, y todos los controles electrónicos relacionados, como los termostatos, medidores de nivel, de presión, etc.

1.6.1 La energía nuclear

El descubrimiento de la fisión nuclear introdujo una forma completamente nueva de conversión de energía. La secuencia de desarrollos críticos para su adaptación fue extraordinariamente rápida. La primera prueba de fisión fue publicada en 1939, la primera reacción en cadena sucedió en la Universidad de Chicago en 1942, el primer submarino impulsado por energía nuclear apareció en 1955. Para 1956 la primera estación nuclear a gran escala, British Calder Hall, se conectaría a la red. Entre los años 1965 y 1975 en Europa y la antigua Unión Soviética se construyeron la mayor cantidad de estaciones nucleares, en 1970 se pensaba que para finales del siglo sería la energía nuclear la que predominara en el mundo. Al parecer, en los cálculos del costo de generación no se tomaban en cuenta los enormes subsidios del gobierno o los aún desconocidos costos de deshabilitar una planta y almacenar de manera segura los desechos altamente radioactivos. Enrico Fermi, físico italiano creador del primer reactor nuclear, advirtió que sería difícil convencer al público de aceptar una fuente de energía que genera fuertes cantidades de desechos altamente radioactivos, así como materiales “fisiles” que pudieran caer en manos de terroristas. Para 1980 fueron otros factores inesperados los que frenarían la proliferación de esta fuente de energía: los altos costos de la construcción de las estaciones, los cambios en las regulaciones de seguridad y aún más determinante, la percepción de inseguridad que se hizo pública posterior al accidente de

Chernobyl en 1986 y más recientemente el de Fukushima en 2011. En la actualidad los mayores productores de energía por fuentes nucleares son Estados Unidos, Francia y Japón.

1.6.2 La energía solar

La electricidad proveniente de celdas fotovoltaicas es otro invento notable del siglo XIX. En 1860 un francés de nombre Augustine Mouchot preocupado por el agotamiento de combustibles fósiles, desarrollo un sistema de generación de vapor para mover maquinaria industrial, activado por luz solar. Mouchon consideraba que era posible que el calor de la quema de carbón fuera sustituido por el del sol y que se podía obtener suficiente como para proveer energía a la industria europea. Muy probablemente haya sido el costo del carbón contra el de sus captadores de calor, lo que lo haya hecho desistir de su idea. En 1958 se logró energizar al primer satélite, Vanguard-I. Por mucho tiempo el costo de esta tecnología le había impedido ser una alternativa viable, sin embargo, esta situación ha ido cambiando considerablemente con el paso del tiempo. Figura 5. Hoy los países que más electricidad producen mediante este tipo de fuente de energía son China, Alemania, Japón y Estados Unidos.

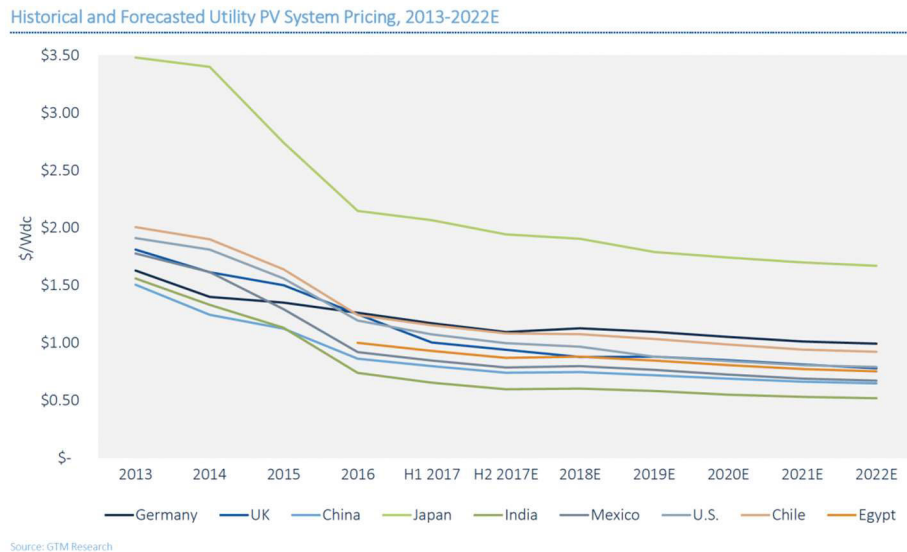


Figura 5. Precio de energía fotovoltaica en diferentes países, pasado y futuro (Ward, 2017)

1.6.3 La energía eólica

Se tienen pruebas de que en el siglo X existían en Persia molinos de viento, su uso se extendió a la India, el mundo musulmán y China. Los holandeses refinaron los molinos para usarlos en el delta del Río Rin para remover agua de lagos y esteros. Para mediados del siglo XIX su uso se popularizaría en los Estados Unidos para proveer de agua a locomotoras. En la Segunda Guerra Mundial, se utilizó una turbina que producía 1.25 MW en lo alto de una colina de Vermont y proveía de electricidad a la red local. Dinamarca poseía también turbinas de viento a mediados del siglo XX sin embargo cayeron en desuso debido a los bajos precios del petróleo y lo económico que resultaba obtener energía de este, muchos fueron los países que se vieron desalentados por esta razón, aun así, existen quienes apostaron a este tipo de energía, China y Estados Unidos son los mayores productores de energía eólica.

1.6.4 Hidroeléctrica

El flujo del agua se ha utilizado desde la antigüedad para obtener energía, pero sería hasta 1878 que se ocupara esta fuerza para la generación de electricidad. La primera planta hidroeléctrica comenzó a producir en Wisconsin, 12.5KW, para 1889 el número de plantas hidroeléctricas había llegado a 200 sólo en Estados Unidos. Para principios del siglo XX la energía hidráulica se convertiría en la fuente que más electricidad producía a nivel mundial. La hidroeléctrica aporta el 16 por ciento de la electricidad que se produce a nivel mundial. China posee la hidroeléctrica más grande del mundo, la Presa Tres Gargantas, con capacidad de 196.79 GW

1.6.5 Gas natural

Inglaterra fue el primer país en comercializar el gas natural, en 1785, le llamaban “gas de pueblo” y era producido a partir de carbón. Su uso se limitaba a la iluminación tanto residencial como de calles, sería empleado en Estados Unidos en 1816 y reemplazado con la llegada de la iluminación eléctrica. En esos tiempos no se tenían los conocimientos suficientes para transportar este tipo de recurso por lo que el gas de yacimientos de carbón o petróleo terminaba por ser liberado a la

atmósfera. Los primeros intentos por entubar el gas no fueron muy fructíferos y presentaban frecuentemente fugas, sería hasta después de la Segunda Guerra Mundial que se tuvieron los suficientes conocimientos sobre soldadura, metalurgia y rolado de tuberías, para poder hacer ductos que transportaran efectivamente el recurso y fue hasta entonces que se pudo comercializar a mayor escala. Al disponer de recursos se encontraron nuevas aplicaciones como calentadores, hornos, estufas, en la industria manufacturera y de procesos, e inclusive para el calentamiento de calderas para la producción de electricidad. Con los nuevos lineamientos de reducción de emisiones a nivel mundial, una de las opciones es el gas natural, de los combustibles fósiles es el que genera menos emisiones al ser quemado. Aunado a lo anterior, nuevas tecnologías han permitido extraer gas de donde anteriormente resultaba muy complicado tal es el caso de los Estados Unidos, el actual líder en producción de gas natural gracias a la adición de desarrollos de gas de esquisto (shale gas), el cual ocupa ya el 10 por ciento del total del gas generado. De acuerdo con la EIA (U.S. Energy Information Administration) la producción de gas natural seco creció un 35 por ciento de 2005 a 2013, mientras que en el mismo periodo el consumo se incrementó de un 23 a un 28 por ciento. En abril de 2015, la generación de electricidad a partir de gas natural superaría la del carbón en los Estados Unidos. China, siendo el mayor consumidor mundial de energía está buscando incrementar el uso de gas en su territorio mediante la reducción de precios, la medida ha sido adoptada tanto a nivel residencial como industrial en varias ocasiones. En 2013, se introdujo en Beijing un nuevo esquema de precios que dejaba el precio del gas muy cercano al costo de importación buscando incentivar el consumo, reducir las emisiones y combatir la contaminación (Reuters, 2015).

A pesar de ser ampliamente promovidas y financiadas por empresas públicas y privadas, la contribución de las energías provenientes de fuentes no fósiles, desde la geotérmica, solar, etanoles, biogás, aportan muy poco, 6% a nivel mundial, la mayor fuente de energía para la generación eléctrica sigue proviniendo de los combustibles fósiles, siendo el carbón el mayormente utilizado con un 38% de la producción. Figura 5. (OECD 2016)

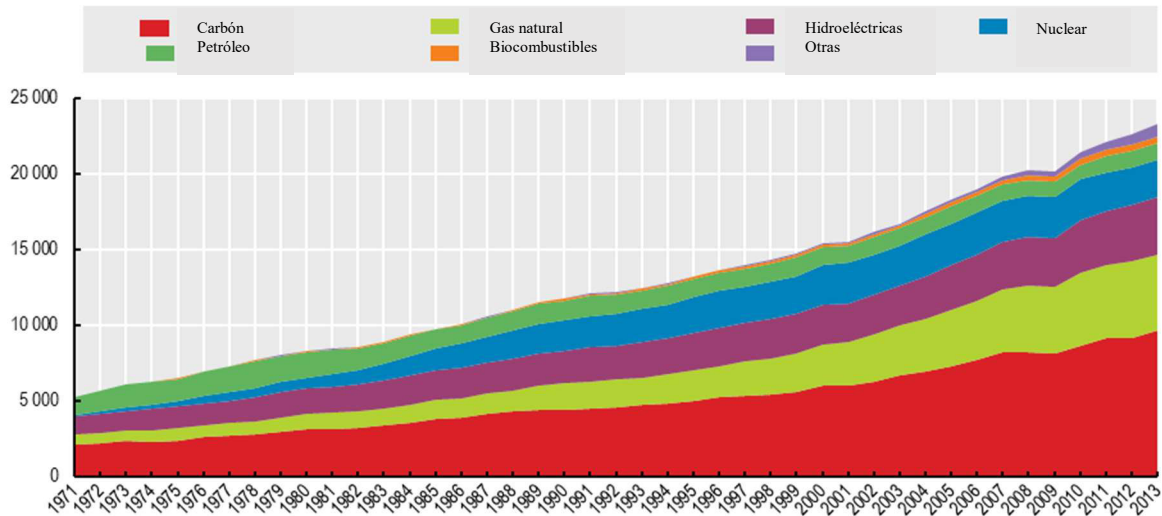


Figura 5. Generación de electricidad mundial por fuente de energía (TWh) OECD 2016

1.7 Lecciones aprendidas

Aquellos que no recuerdan el pasado están condenados a repetirlo.

George Santayana

Aprendimos que la energía nos libera de carga de trabajo y que su control nos da poder. Que la naturaleza tiene un punto de resiliencia límite que una vez superado no tiene vuelta atrás, se contaminan entornos y se extinguen especies. Que el tener abundancia de un tipo de fuente de energía no sólo nos lleva a tener un mayor gasto e incluso desperdicio, sino que también nos impide desarrollar otras fuentes y es precisamente hasta que notamos que está a punto de alcanzarse el límite de resiliencia que empezamos a volcar esfuerzos hacia las alternativas, bajo el riesgo de que sea muy tarde. Que cuando los esfuerzos se ven concentrados en un solo recurso, todo lo que queda fuera de esa economía se ve empobrecido.

Aprendimos que el petróleo es una empresa tan lucrativa que puede controlar naciones, que buena parte de su éxito radicó en su facilidad de transportación y distribución. Que el combustible que utilizamos no es necesariamente el mejor, pero que el poder de penetración o incluso los bloqueos de mejores opciones nos dejan sin alternativa. Que la seguridad energética de una nación no es una situación fija, cambia a raíz de nuevos mercados, nuevas tecnologías e incluso cambios de política.

Aprendimos que nuestra percepción sobre los recursos puede verse afectada por los límites de nuestro conocimiento, como todas las veces que se pensó que estábamos a punto de acabar con las reservas de petróleo mundiales provocando crisis económicas. También se ve afectada nuestra percepción cada vez que fallamos en darle el valor adecuado a los recursos.

Vimos que independientemente al tipo de energético que utilizemos, existe un límite. El fuego desde el homo erectus hasta nuestros días sólo seguirá vivo si (obviando al comburente) se mantiene la fuente de combustible. Biringuccio pensaba que el hombre no sería capaz de terminar con la inmensa cantidad de recursos que la naturaleza tenía para ofrecerle, desgraciadamente se equivocaría, la velocidad con la que el hombre los consume no da oportunidad a la naturaleza para que reponga el faltante. Para el caso de fuentes animadas de energía, éstas sólo serían capaces de proveer dentro de un cierto rango de edad, si la fuente, ya fuese animal o incluso una persona, era muy joven o muy vieja, deja de ser útil para este fin. Durante la segunda transición energética, con el uso de energía eólica e hídrica la situación resultaba similar en cuanto a que también existe un rango óptimo de aprovechamiento ya que cuando las corrientes tanto de agua como de aire eran muy bajas no habría energía, pero muy altas podrían provocar desde descomposturas hasta accidentes más serios. Para cuando la humanidad llega a la etapa del carbón Jevons advertiría que también el carbón tiene un límite, hablaría sobre el crecimiento poblacional y los hábitos de consumo. Tal vez el carbón no llegó a agotarse porque fue en gran medida reemplazado por el petróleo, y esto se debió a la mayor densidad energética de este último que facilitaba su transportación y el manejo. Una vez entrada la era del petróleo, para Rockefeller y su Estándar Oil, controlar en gran medida la transportación del recurso le dio una ventaja nada despreciable sobre sus competidores y lo llevó a contar con el monopolio de la industria. A partir de ese momento las limitantes que encontraría el petróleo, al igual que otros energéticos, poco tendrían que ver con las fuerzas de la naturaleza o las características del propio recurso, las limitantes estarían más relacionadas con leyes de mercado, percepciones, política y legislaciones.

No hay manera de regresar al pasado, sólo podemos seguir adelante, pero esta vez podemos guiar mejor nuestros siguientes pasos, de ahí la importancia de prestar atención y aprender de cada lección experimentada. Uno de los grandes problemas de Donald Trump es precisamente el querer “hacer a América grandiosa otra vez” regresando a un pasado que ya no existe, usando fórmulas para otras realidades. El mundo, su economía, su gente, la tecnología cambiaron, las fórmulas tendrían que cambiar también.

Pudimos haber aprendido tanto de la historia de la energía, pudimos haber predicho de antemano lo finito de las fuentes fósiles, pudimos haber pensado que podemos afectar a la naturaleza a tal grado que no fuese capaz de reponerse y seguir suministrando los recursos que de ella agotamos, pudimos haber dedicado un mayor esfuerzo a desarrollar paralelamente fuentes de energía más limpias, pero pareciera que no hubiera habido memoria.

La energía nos hizo inteligentes y nos llevó a acabar con nuestro planeta. El nuestro se convirtió en un mundo enfocado en la energía que hace naciones poderosas y no en la energía que mejora la calidad de vida de los habitantes del planeta.

Bibliografía

Alcott, B., 2005. Jevon's Paradox. *Ecological Economics*, 54(1), pp. 9-21.

Biringuccio, V., 1540. *Pirotecnia, Libro III, Capítulo X*. Venecia: s.n.

Black, Brian C., 2013. *Climate Change. An Encyclopedia of Science and History. Volume I*. Santa Barbara: ABC-Clio.

Encyclopaedia Britannica, 2017. *Encyclopaedia Britannica*. [En línea] Disponible en: <https://www.britannica.com/topic/Standard-Oil-Company-and-Trust> [Accesado el día 15 de junio de 2017].

Herculano-Houzel, S., 2016. *The Human Advantage: A new understanding of how our brain became remarkable*. Cambridge: The MIT Press.

Hermann, W., (2006) "Quantifying global exergy resources" en *Energy*. Volúmen 31, revista 12, septiembre 2006, pp.1685-1702. Elsevier.

Maugeri, L., 2006. *The Age of Oil*. Westport: Praeger.

Nef, J. U., 1977. An Early energy crisis and its consequences. *Scientific American*, 237(5).

Reuters, 2015. *Reuters*. [En línea] Disponible en: <http://www.reuters.com/article/china-gas-prices/corrected-update-2-china-slashes-wholesale-gas-prices-as-it-seeks-to-spur-demand-for-cleaner-fuel-idUSL3N0ZM3CC20151123> [Accesado el 10. de octubre de 2017].

Smil, V., 1994. *Energy in World History*. Boulder: Westview Press.

Smil, V., 2004. World History and Energy. In: *Encyclopedia of Energy, Volume 6*. Winnipeg: Elsevier Inc., p. 550.

Smil, V., (2006) *Energy. A beginner's guide*. Oxford: Oneworld Publications.

Smil, V., (2015) *Power density, a key to understanding energy sources and uses*. Cambridge, MIT Press.

Stanford History Education Group, n.d. *Beyond the bubble. A new generation of history assessments*. [En línea] Disponible en: <https://beyondthebubble.stanford.edu/assessments/standard-oil-company> [Accesado el 15 marzo de 2017].

Thatcher, M., 1989. *Margaret Thatcher Foundation*. [En línea] Disponible en: <http://www.margaretthatcher.org/document/107817> [Accesado el 12 de febrero de 2017].

Ward, T., 2017. *Futurism*. [En línea] Disponible en: <https://futurism.com/the-cost-of-solar-will-drop-another-25-by-2022/> [Accesado el 12 febrero de 2017].

Wrangham, R., 2009. *Catching fire: How cooking made us human*. Nueva York: Basic Books.

Yergin, D., 1990. The First Boom. In: *The Prize, the epic quest of oil, power and money*. New York: Simon & Schuster, p. 877.

Zorzoli, G., 1978. *El dilema energético ¿medievo tecnocrático o humanismo socialista?*. Madrid: H. Blume Ediciones.

Capítulo 2

Presente. Los límites actuales de las energías disponibles.

El mundo tiene suficiente para las necesidades de todos, pero no suficiente para la codicia de todos.

Mahatma Gandhi

El presente capítulo tiene como finalidad encontrar las restricciones o limitantes actuales de la generación de energía en diferentes fuentes. Se comienza por las fuentes no renovables: petróleo, carbón y gas, se continua con nuclear y después se analizan cada una de las renovables: hidroeléctrica, eólica, solar, bioenergía, geotérmica y marina.

Se tiende a pensar que las energías renovables representan una fuente inagotable de recursos, en este capítulo se pretende analizar hasta qué grado es esta aseveración cierta.

Se busca además contar con un panoramal mundial, general, que permita apreciar a todas las fuentes de energía y encontrar qué está a favor y qué en contra del desarrollo de cada una de ellas.

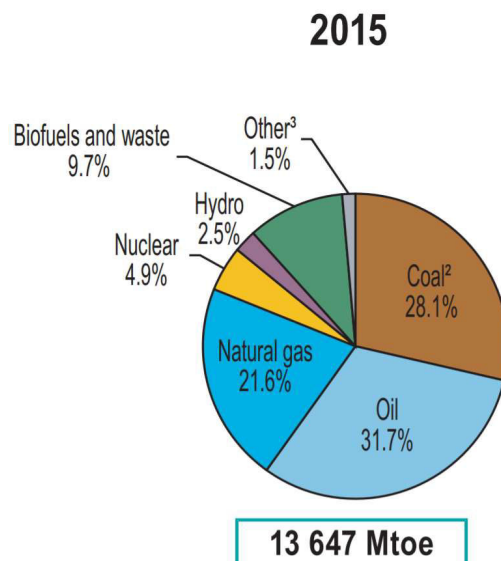


Figura 2.1 Producción total mundial de energía primaria por fuente (IEA 2017)¹

Para el 2015, el 81.4% de la producción total mundial de energía (13,647 Mtoe equivalentes a 158,700TWh) provenía de fuentes fósiles. Las energías renovables alcanzaban tan sólo 13.7 puntos porcentuales. Ver figura 2.1 Los requerimientos totales por región y tipo de energía se muestran en la tabla 2.1 Regiones como Norteamérica, Latinoamérica, Europa Occidental, Medio Oriente y Sur de Asia, Sureste de Asia y Pacífico muestran una marcada predilección por el uso de petróleo.

Región	Carbón	Petróleo	Gas natural	Biocombustibles	Hidro	Nuclear	Renovables	Total
Norteamérica	16.76	36.61	30.56	4.54	2.26	9.75	1.40	101.88
Latinoamérica	1.86	15.40	8.79	5.28	2.44	0.34	0.69	34.80
Europa occidental	8.76	21.03	15.01	5.84	2.01	8.20	2.39	63.24
Europa del Este	12.42	12.73	23.24	1.85	1.11	3.85	0.07	55.27
África	5.20	6.81	4.26	13.36	0.44	0.12	0.13	30.32
Medio Oriente y Sur del Asia	20.16	25.38	21.20	11.11	0.75	0.46	0.29	79.35
Sureste de Asia y Pacífico	5.11	10.02	6.21	4.73	0.30		1.16	27.53
Lejano Oriente	93.72	37.75	13.83	13.07	4.72	3.90	2.94	169.93
Total Global	163.99	179.54	123.10	59.78	14.03	26.62	9.07	576.13

Tabla 2.1 Requerimientos totales de energía (EJ) por región y por fuente energética. (IAEA, 2016)^{N2}

2.1 Límites de fuentes fósiles.

Entre los más recientes escenarios desarrollados se encuentran los de la Agencia Internacional de la Energía (IEA), de British Petroleum (BP) y las Trayectorias de concentración representativas (RCP) utilizadas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) que pronostican que la demanda de combustibles fósiles seguirá creciendo, en éstos escenario se toman en cuenta factores tales como demanda, desarrollo tecnológico, se asume que se llevarán a cabo políticas de

mitigación de gases de efecto invernadero y que habrá cambios en la capacidad de producción en diferentes regiones.

En 2010, Steve Mohr ² realizó una proyección mundial de combustibles fósiles en la cual propone que para lograr predecir dicha producción es de suma importancia tomar en cuenta cuatro factores:

1. La exactitud en la cantidad de recursos recuperables (URR) Ver Anexo A. Deben ser económica y tecnológicamente recuperables, es decir que no se encuentren en la zona azul “no recuperable” de la figura 2.2 Los errores encontrados en las cifras de URR podrían deberse a que los estimados no hayan sido actualizados, que se trate de estimados de tipo político (existe un factor de conveniencia en el número reportado) o incluso a que los criterios de clasificación difieren. Dada la incertidumbre sobre la exactitud del URR, se toman en cuenta 3 escenarios: bajo, alto y la mejor aproximación (MA).

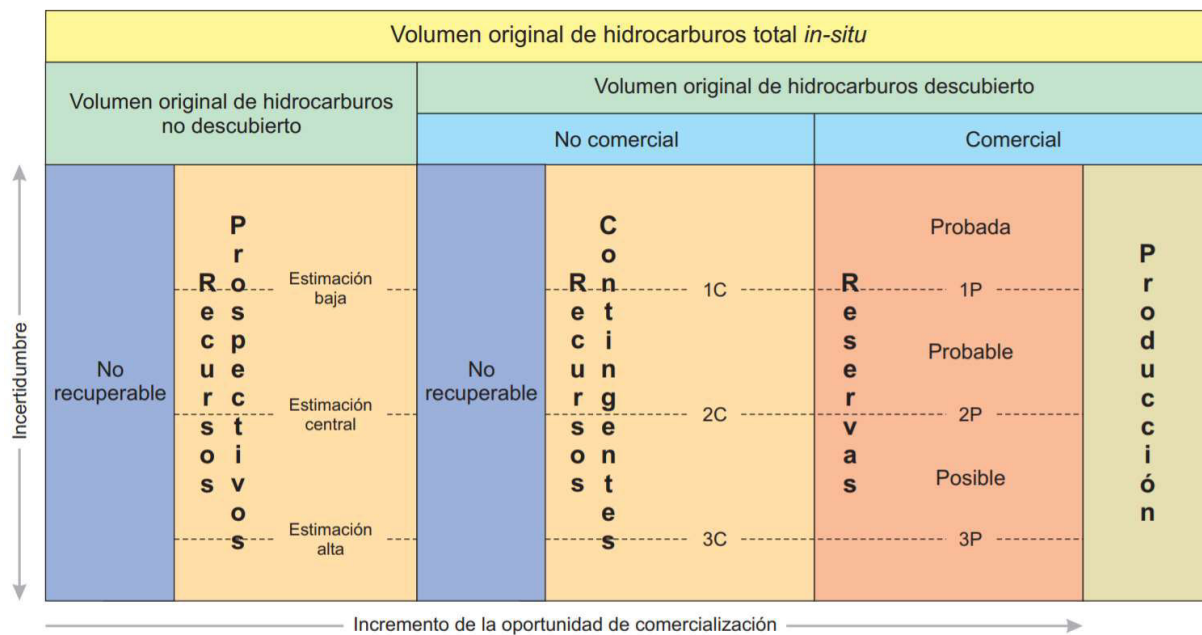


Figura 2.2 Clasificación de los recursos y reservas de hidrocarburos. (PEMEX, 2017)³

2. La inclusión de recursos no convencionales. Sólo algunos estudios incluyen los combustibles fósiles provenientes de lutitas.

3. El desarrollo de estimaciones más precisas en el rango de cambio de producción resultante por la interacción oferta-demanda.
4. La sensibilidad a eventos futuros imprevistos. Tanto la producción como la demanda se ven afectados por eventos políticos, económicos o físicos como las guerras, recesiones o desastres naturales.

Para los puntos 3 y 4 Mohr utiliza un algoritmo que permite interactuar a la oferta y demanda además de modelar eventos estocásticos, llamado Modelo de oferta-demanda de recursos geológicos (GeRS-DeMo). Este modelo asume que no hay una acción global para contrarrestar la emisión de gases de efecto invernadero y que no existen grandes avances en el desarrollo de tecnologías alternativas de energía como las renovables; por lo que se considera que es un escenario del tipo “business as usual” con respecto a las fuentes fósiles. Se asume también que todos los recursos recuperables entran en producción.

2.1.1 Petróleo

Sobre el estudio de las reservas totales de petróleo en la tierra se han escrito decenas o hasta cientos de libros y artículos. Como vimos en el capítulo anterior, varias fueron las ocasiones en que se pensó que las reservas estaban llegando a su fin. Cuando en 1956 M. King Hubbert propuso su teoría del pico de producción de petróleo fue ampliamente criticado, sin embargo, se acercó notablemente a la realidad de la producción en los Estados Unidos y se hizo de varios seguidores que perdurarían hasta la fecha. Hubbert intentó así mismo predecir el pico de producción mundial. Ver figura 2.3 donde “Billions of BBLs/YR” corresponde a miles de millones de barriles al año, la parte sombreada con las reservas probadas. “Cumulative production” corresponde a producción acumulada y “Future discoveries” son los descubrimientos futuros. Para Hubbert la producción máxima mundial se alcanzaría en el año 2000.

producción, incluyendo decisiones de producción de la OPEP, paros de producción no planeados y el impacto de decisiones de inversión de la industria petrolera. El pico de demanda puede ocurrir debido a una combinación de precios altos y políticas energéticas encaminadas hacia una mayor eficiencia en el uso final y la diversificación de fuentes de energía, antes de que el recurso base esté siquiera cerca de ser consumido en su totalidad.”⁵

En la figura 2.4 se pueden apreciar la magnitud de producción de los países en el mundo en 2017 según datos de Enerdata¹³ y en la figura 2.5 el costo que implica producir un barril de petróleo en diferentes países, llegando a diferencias de más del 600%.¹⁴

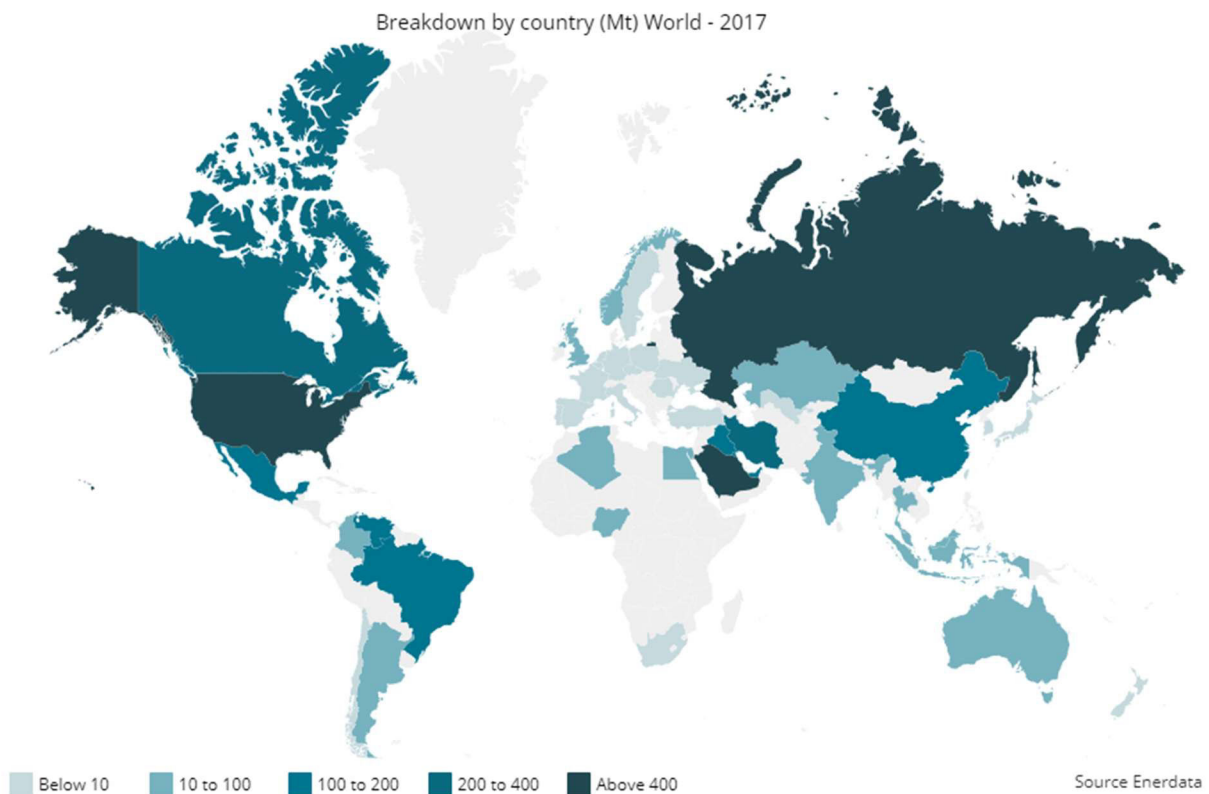


Figura 2.4 Producción de petróleo de 2017 por país, en megatoneladas. (Enerdata, 2018)¹⁰

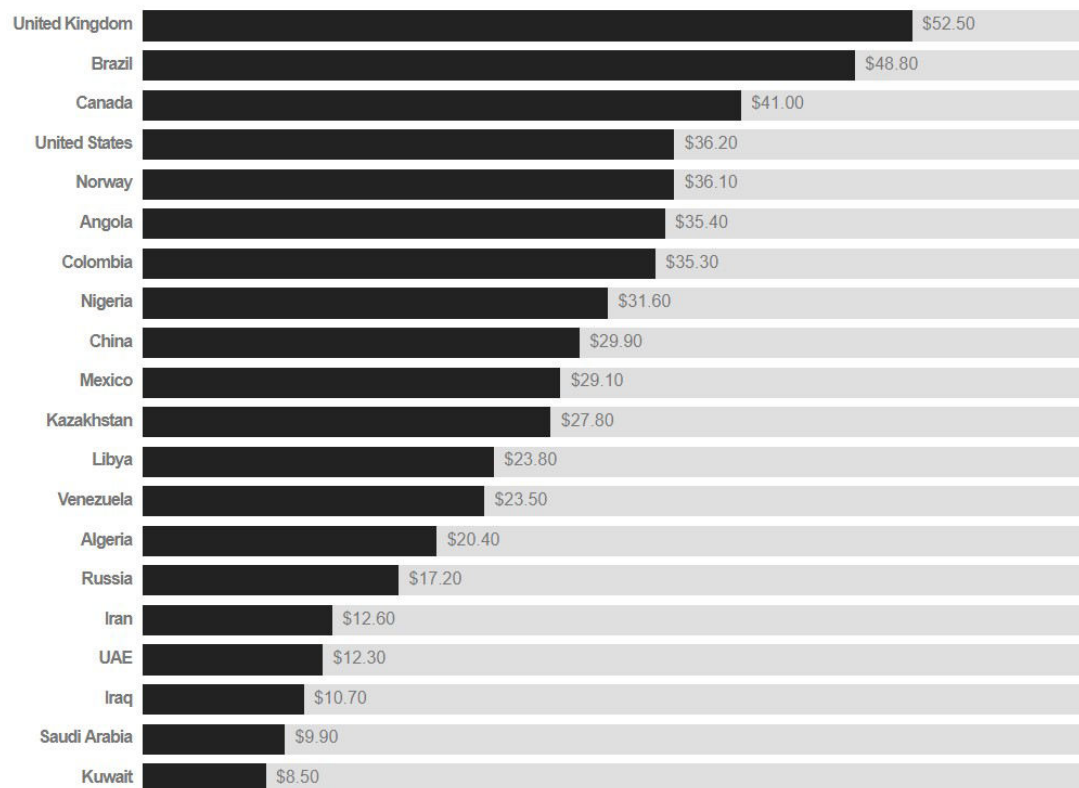


Figura 2.5 Costo de producción de un barril de petróleo en diferentes países.
(Petroff, 2015) ¹³

De acuerdo con los estudios de BP, “las reservas probadas de petróleo en 2016 aumentaron 15,000 millones de barriles (0.9 puntos porcentuales) para alcanzar los 1,707 billones de barriles, suficiente para cubrir la producción global de 50.6 años a niveles del 2016.”⁸ El equivalente en energía a 10,077 EJ. El Consejo Internacional de la Energía (WEC) calcula que existen 2,019 billones de barriles recuperables, el equivalente a 2,779,570 TWh.

Los estudios de Mohr, parten de los siguientes datos de URR: Tabla 2.2, para el estimado de la producción futura de petróleo.

Petróleo	(EJ)		
	Bajo	MA	Alto
África	1,623	2,044	3,022
Asia	1,458	2,094	6,048
Europa	599	666	1,525
Antigua Unión Soviética	3,557	4,047	4,599
Medio Oriente	5,159	4,606	8,033
North América	4,468	7,547	12,238
South América	3,149	4,456	7,723
Total	20,013	25,460	43,188

Tabla 2.2 Cantidad de petróleo recuperable. (Mohr, 2015)⁹

A través del GeRS-DeMo se llevaron a cabo los 3 tipos de proyecciones obteniéndose las gráficas de la figura 2.6, los puntos negros representan la producción real.

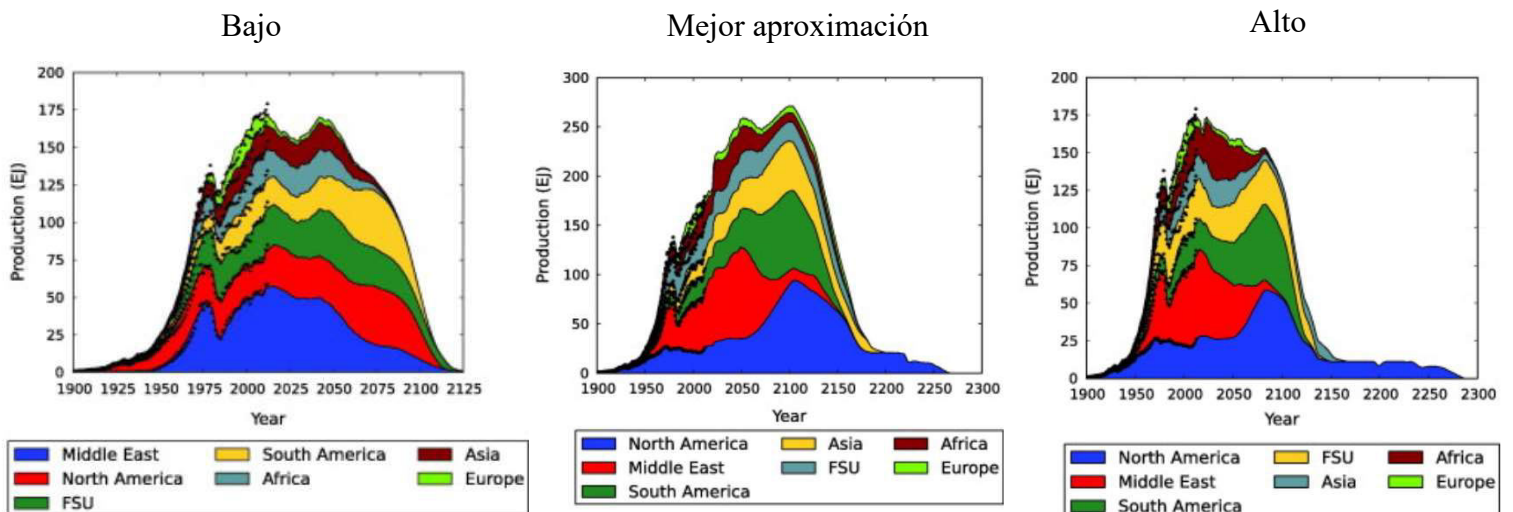


Figura 2.6 Escenarios estimados de producción de petróleo. Los puntos negros representan mediciones reales. (Mohr, 2015)⁹

Se considera que Arabia Saudita dictará el pico de producción de petróleo convencional debido a que se trata del principal productor mundial. Aun cuando contribuyen también a este pico el bitumen canadiense, el petróleo extra pesado venezolano y el kerógeno estadounidense, se piensa que el crecimiento del petróleo no convencional no será capaz de contrarrestar la caída del convencional, pero ayudará a que ésta sea más suave y se pronostica que puede ser mantenida hasta 2100, para entonces se piensa que la producción de petróleo convencional habrá concluido y que Norteamérica, Venezuela y la antigua Unión Soviética dominarán la producción de los no convencionales. Posterior a 2100, se esperan fuertes caídas de producción de los no convencionales debido a que los recursos se estarán agotado.⁹

Para Hubbert, el fin de la era de petróleo no terminaría cuando se agotasen las reservas: “Mientras el petróleo sea usado como fuente de energía, cuando el costo energético de recuperar un barril de petróleo sea mayor que la energía contenida en el petróleo, la producción terminará sin importar cuál sea el precio monetario”⁶. Lo mismo establecería Adelman: “Ningún mineral, incluyendo el petróleo, será jamás agotado. Si el costo de encontrarlo y extraerlo sobrepasara aquel que los consumidores están dispuestos a pagar, la industria comenzará a desaparecer”⁷

2.1.2 Carbón

De acuerdo con datos de BP, las reservas de carbón incluyendo antracita, carbón sub bituminoso y lignito, son de 1,139,331 millones de toneladas, un equivalente a 33,391 EJ o 9,269,090 TWh. La producción en 2016 fue de 42,523 TWh.¹⁶

Aun cuando todas las predicciones sobre la explotación de recursos finitos muestran un comportamiento similar al descrito por Hubbert con respecto al crecimiento de producción, alcance de un pico y la consecuente caída de producción debido a que las reservas se hacen cada vez más difíciles de extraer ya sea por cuestiones económicas, técnicas o incluso energéticas, el tiempo y el perfil del pico de producción, existe una variación considerablemente de un estudio a otro. De acuerdo con los estudios de Hubbert se alcanzaría el pico de producción alrededor de 2150. Ver figura 2.7

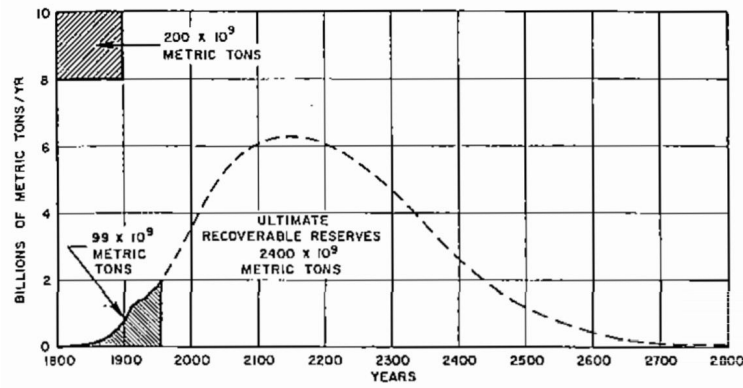


Figura 2.7 Producción mundial de carbón según Hubbert. (Hubbert, 1962)⁴

La producción mundial de carbón según los estudios de Patzek y Croft¹¹ alcanzaría su pico en el año 2011. Ver figura 2.8

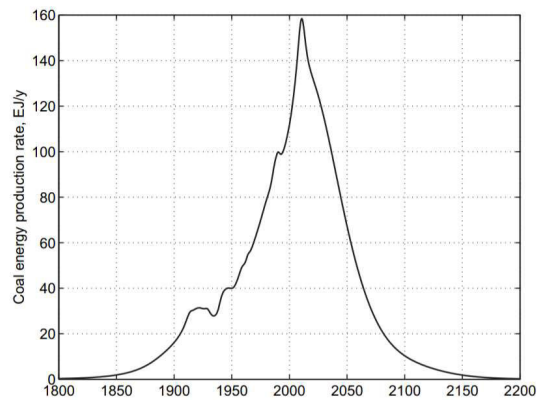


Figura 2.8 Producción mundial de carbón según Patzek y Croft. (Patzek y Croft, 2010)¹¹

Mientras que los estudios de Höök et al. pronosticarían este pico entre los años 2020 y 2050. Ver figura 2.9

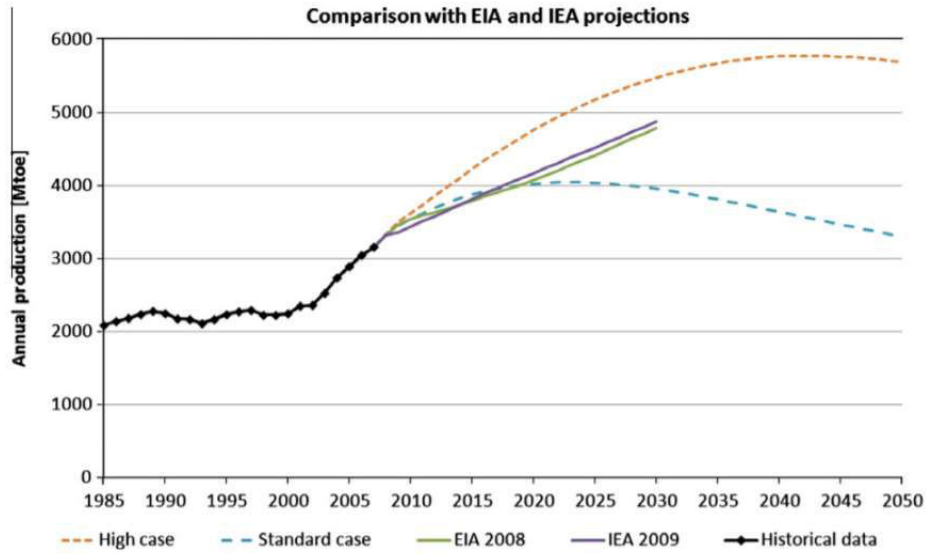


Figura 2.9 Producción mundial de carbón según Höök et al. (Höök, 2010)¹²

Mohr utiliza los siguientes URR para los pronósticos de carbón, ver tabla 2.3

Carbón	EJ		
	Bajo	MA	Alto
África	467	988	1,014
Asia	7,338	12,353	16,400
Europa	2,461	2,675	2,980
Antigua Unión Soviética	1,669	1,669	4,445
Medio Oriente	2	2	28
Norte América	2,350	4,337	6,342
Sudamérica	182	381	384
Total	14,469	22,406	31,593

Tabla 2.3 URR de carbón. (Mohr, 2015)⁹

Mediante el uso del modelo GeRS-DeMo se obtuvieron los siguientes escenarios (Figura 2.10):

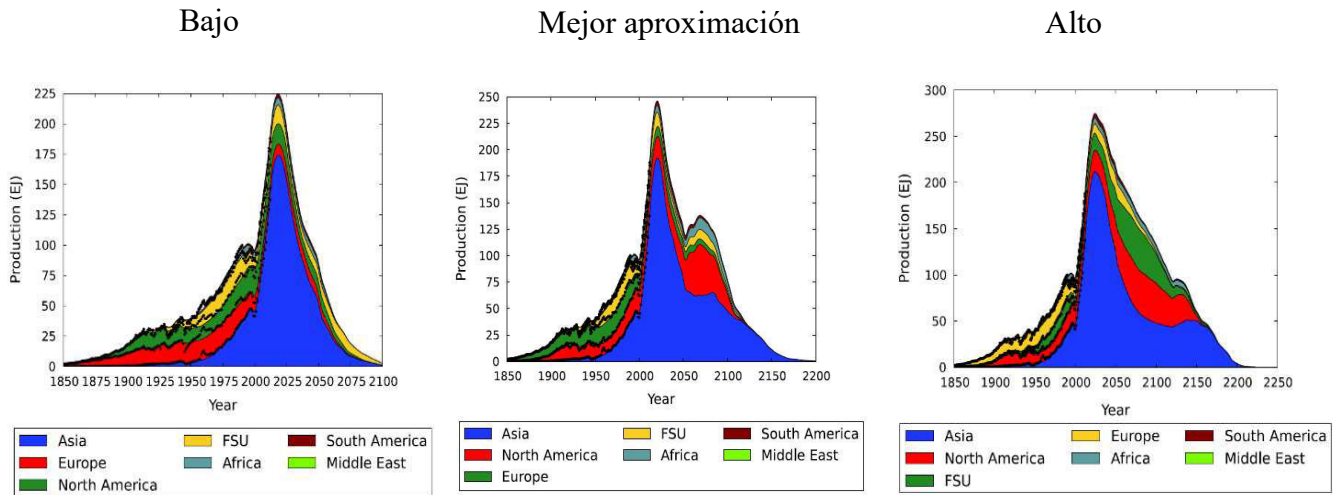


Figura 2.10 Escenarios estimados de producción de carbón. (Mohr, 2015)⁹

En los tres escenarios puede observarse que el pico de producción se encuentra alrededor del año 2025, la variación principal radica en cómo va cayendo la curva.

2.1.3 Gas natural

El gas natural es el único combustible de origen fósil del que se espera un crecimiento en el futuro, se considera el más limpio al quemarse y más eficiente que los derivados de petróleo o el carbón, además de contar con un precio competitivo. Según el Consejo Mundial de la Energía, el gas natural puede jugar un papel esencial en la transición hacia un futuro energético más limpio, accesible y seguro. La empresa General Electric (GE) lo considera no sólo una transición sino el protagonista de una nueva era a la que denomina “La Era del Gas”, aunque no podemos perder de vista que estamos hablando del proveedor de turbinas de gas.

Las reservas recuperables son del orden de los 172 mil millones de toneladas equivalentes de petróleo, según el reporte de 2016 del Consejo Mundial de la Energía (WEC), el equivalente a 7,201 EJ.

Para el caso del gas natural, Mohr se basó en los siguientes URR, Tabla 2.4

Gas	EJ		
	Bajo	MA	Alto
África	1,032	3,713	6,225
Asia	2,260	4,995	9,171
Europa	791	1,482	2,681
Antigua Unión Soviética	2,671	4,103	10,061
Medio Oriente	3,357	4,406	5,088
Norte América	2,894	5,359	8,139
Sudamérica	922	3,753	5,341
Total	13,927	27,810	46,707

Tabla 2.4 URR de gas natural. (Mohr, 2015)⁹

Una vez utilizado el algoritmo se obtuvieron los siguientes escenarios. Figura 2.11

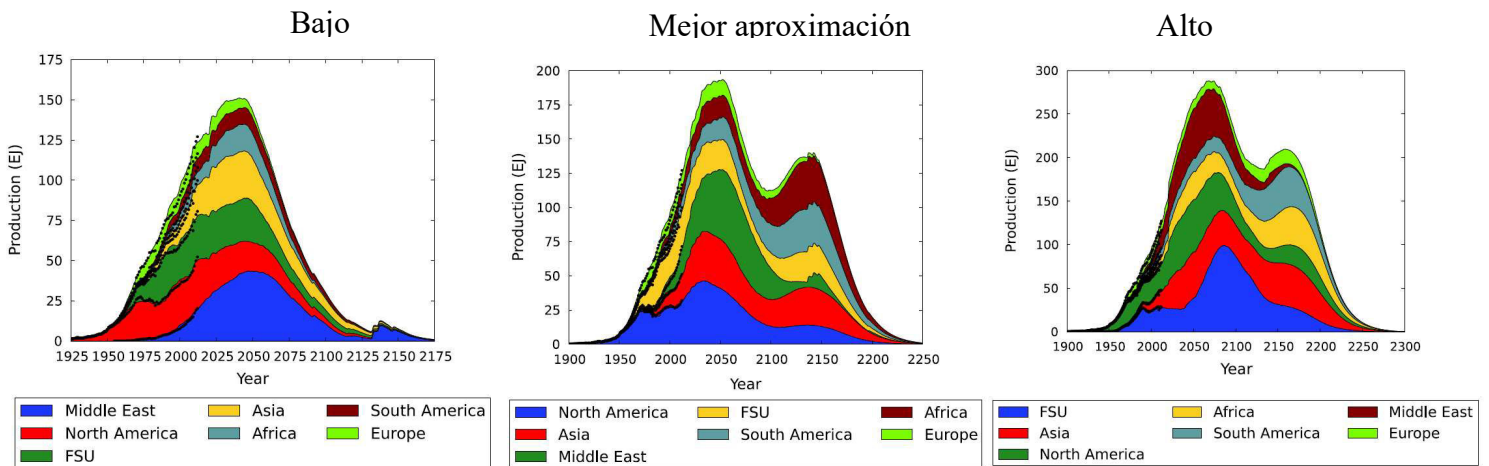


Figura 2.11 Escenarios estimados de producción de gas natural. (Mohr, 2015)⁹

La producción de gas se espera que alcance su pico entre 2050 y 2075.

2.1.4 Todos los combustibles fósiles.

Agrupando los tres combustibles fósiles obtenemos los siguientes escenarios, figura 2.12:

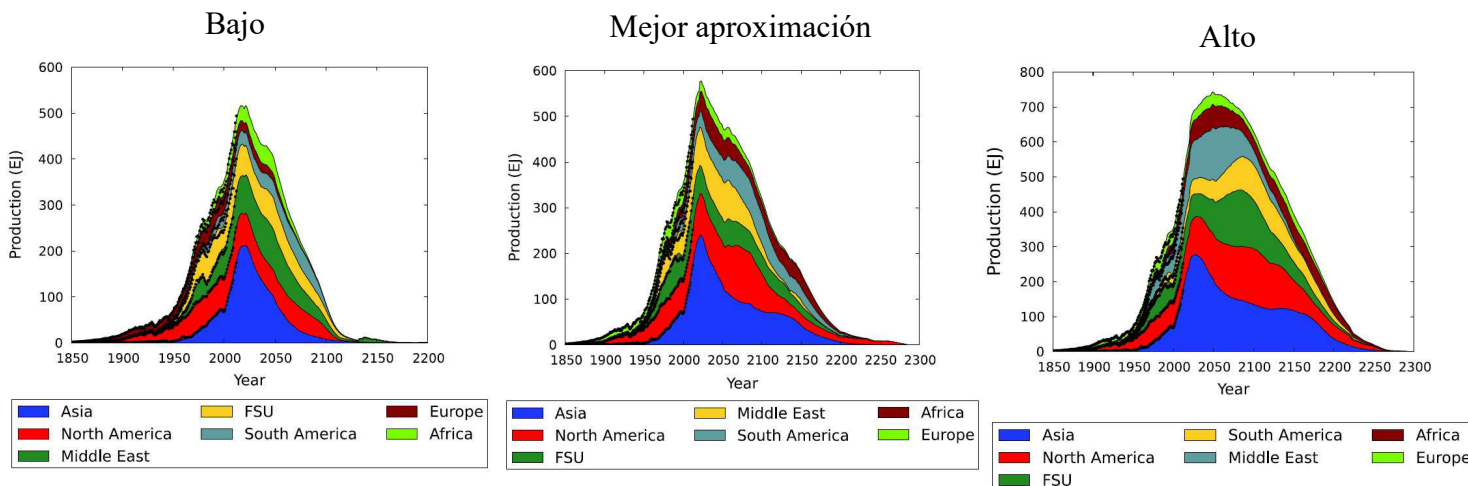


Figura 2.12 Escenarios estimados de producción de combustibles fósiles. (Mohr, 2015)⁹

Se pronostica que la producción de energía a través de las diferentes fuentes fósiles podría alcanzar su pico entre el 2025 y 2050. Si estos los resultados los convertimos a unidades de dióxido de carbono equivalentes CO₂e, podemos comparar los escenarios con las proyecciones del IPCC basadas en las trayectorias de conservación representativas (RCP) generadas según el forzamiento radiativo (diferencia entre la insolación absorbida por la Tierra y la energía radiada de vuelta al espacio). Se consideran cuatro escenarios:

	Descripción
RCP8.5	Trayectoria de forzamiento radiativo incremental que conduce a 8.5 W/m ² en 2100. (Se proyecta un fuerte crecimiento en la producción de fuentes fósiles alcanzando más de 100 Gt de CO ₂ e para el 2100).
RCP6	Trayectoria de estabilización sin rebasamiento a 6 W/m ² en estabilización después de 2100.
RCP4.5	Trayectoria de estabilización sin rebasamiento a 4.5 W/m ² en estabilización después de 2100.
RCP2.6	Pico de forzamiento radiativo en ~ 3 W/m ² antes de 2100 y posterior disminución. (Considera las menores emisiones)

Tabla 2.5 Descripción de escenarios RCP. (IPCC, 2017)

Podemos ver los diferentes escenarios en una misma gráfica. Ver figura 2.13 El escenario de 8.5 está muy por arriba del escenario alto de Mohr y muestra una posibilidad que por el bien de quienes vivimos en este planeta, esperamos que sea muy remota. Los tres escenarios de Mohr coinciden en que entre 2025 y 2050 habremos pasado el pico de producción y la utilización de combustibles fósiles comience a decaer, acercándonos así a las RCP de menores emisiones.

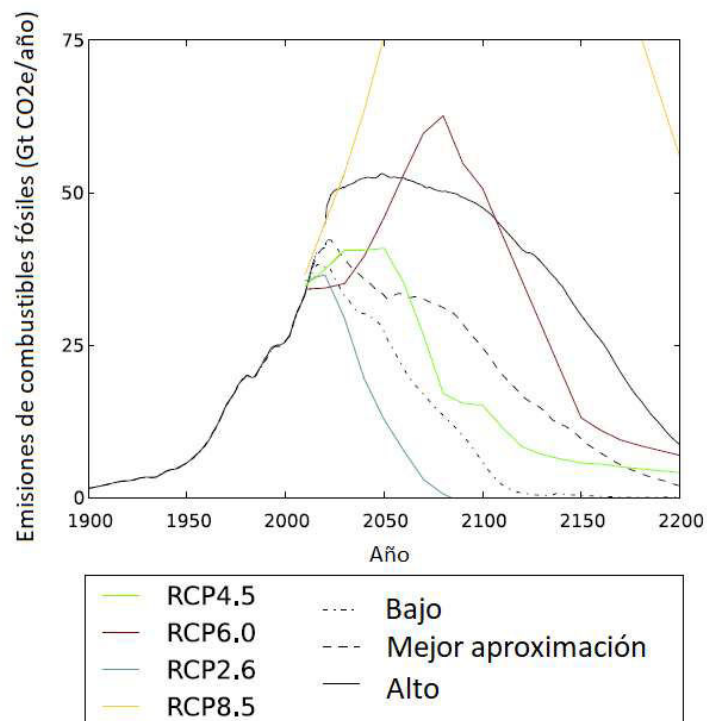


Figura 2.13 Comparaciones de estimados de producción de combustibles fósiles contra escenarios IPCC. (Mohr, 2015)⁹

2.2 Nuclear

La producción de energía nuclear en 2016 fue del 11% del total de la electricidad producida en el mundo, es decir, de 2,477 TWh^{N1}.

La energía nuclear ocupa un espacio especial entre las fuentes de energía, no proviene de un combustible fósil, pero sí de un recurso no renovable. Al igual que los combustibles fósiles tiene un límite ligado a la capacidad de extracción, en este caso de uranio. Hubbert la consideraba como la alternativa para producción de energía cuando las reservas de petróleo se vieran agotadas.⁴

Se calcula en la actualidad que existen más 11 millones de toneladas de uranio identificadas^{N5}. La Agencia Internacional de Energía Atómica calculó que los recursos habían crecido 70% en los últimos diez años. En enero del 2015, se consideraba que había suficiente uranio para mantener durante 100 años la producción de ese momento, 390 GWe, que aportaba el 11% de la producción mundial de electricidad. (WEC, 2016)^{N4}

Al igual que con el petróleo, la extracción del uranio tiene diferentes costos dependiendo de la localidad y la tecnología requerida, que van desde \$40 dólares por kilo, hasta \$260 por kilo.

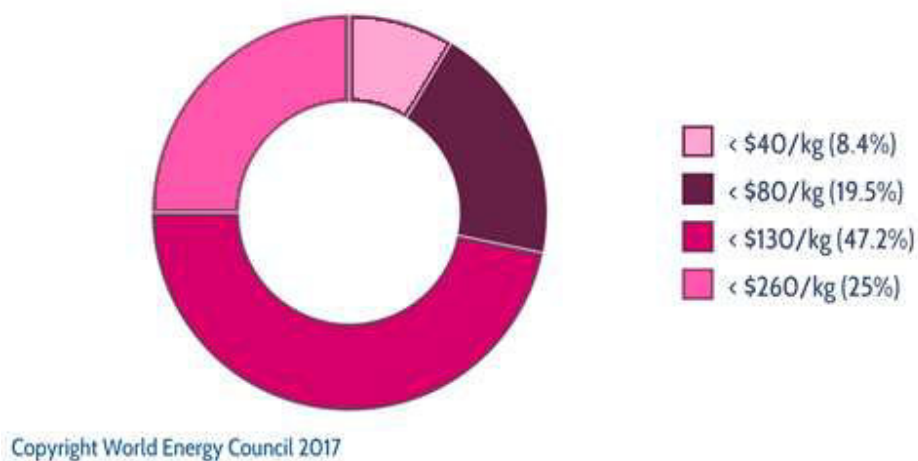


Figura 2.14 Recursos de uranio identificados en el mundo. (World Energy Resources, 2017)^{N5}

Se requiere de aproximadamente 27 toneladas de insumos nuevos al año para un reactor de 1000 MWe en comparación con las 2.5 millones de toneladas de carbón para producir la misma cantidad de electricidad^{N2}. Entre las lecciones aprendidas en el capítulo 1 vimos que un energético se volvía atractivo cuando se podía obtener de él mayor energía con menor volumen, con sólo este argumento la energía nuclear habría podido acabar con la competencia, sin embargo, se requiere

una infraestructura mucho más sofisticada para su aprovechamiento lo cual conlleva a un mayor costo. Debido a los accidentes que se han dado en la historia, los requerimientos de seguridad se han visto intensificados lo cual genera aún mayores costos y tiempos de construcción.

A lo largo de los años los reportes de Perspectivas Mundiales de Energía (World Energy Outlook), fueron cambiando de posturas respecto a este tipo de energía, entre los reportes de 2010 y 2011 se ve una caída de 90 a 60% de las perspectivas de crecimiento de la energía nuclear para 2035, sin embargo, no se deja de reconocer que representa una fuente importante para poder combatir el cambio climático. En el World Energy Outlook de 2016 se dice que para el año 2040 la generación por esta fuente podría alcanzar 18,492 TWh/año.

Entre 2005 y 2015 el crecimiento de la energía nuclear vio números negativos, -0.7%, sin embargo para el cierre del 2015 había 65 reactores en construcción con una capacidad de generación de 64 GW ^{N4}.

La energía nuclear además de producir electricidad puede emplearse también para generación de calor, producción de hidrógeno y desalinización. Las plantas nucleares están limitadas a zonas donde exista abundante acceso a agua y piso firme, deberán descartarse zonas con cercanía de volcanes activos, zonas de alta sismicidad, zonas con líquido en subsuelo que pudieran hundirse, zonas colapsables o con propensión a derrumbes o inundaciones.

Otro de los límites es al momento de la producción, la generación no debe ser mayor a la carga base, es decir que no debe sobrepasar la demanda mínima de energía. Las centrales nucleares no se pueden detener debido a la fluctuación de la demanda eléctrica, tienen prioridad de suministrar su producción para evitar detener la reacción nuclear y desconexión de la red, si bien no son operaciones imposibles, tampoco son recomendadas y llevarlas a cabo requiere de una programación anticipada.

Es considerada una energía limpia aun cuando existen desechos radiactivos. Con los reactores rápidos de cría se pretende que los desechos sean de menor radiactividad, al mismo tiempo se requerirían menores insumos de uranio.

Su crecimiento se ve restringido en algunas regiones del mundo debido al bajo precio del gas natural y al crecimiento de la capacidad de las fuentes de energía renovable que en muchos casos reciben subsidios. Dada la tendencia de crecimiento poblacional, el consecuente aumento en la

demanda de electricidad, el cambio climático, la calidad del aire, la volatilidad en los precios de otros combustibles, la seguridad energética y otros, la energía nuclear seguirá siendo una opción a la cual recurrir.

2.3 Límites de fuentes renovables

2.3.1 Hidroeléctrica

De entre las energías renovables, la hidroeléctrica es la que lleva la delantera en la generación de electricidad aportando el 71%. En 2016 alcanzó una capacidad instalada de 1,064 GW. Representa el 16.4% de toda la generación eléctrica a nivel mundial, incluyendo la generada con fuentes fósiles.

El potencial hidroeléctrico mundial factible, según la Agencia Internacional de Energía (AIE), es de 14,000 TWh/año; según el reporte de World Energy Resources Hydropower 2016, es de 10,000 TWh/año donde también se dice que varios escenarios indican que para 2050 se podría alcanzar un potencial de entre 2,000 y 2,050 GW de capacidad de generación de energía hidroeléctrica (IEA/IHA). En 2015 el potencial fue de 3,969 TWh^{H2} y la capacidad instalada de 1,212 GW.

Muchos de los estudios que se habían realizado sobre el potencial hidroeléctrico se habían hecho a nivel local, en 2017 se llevó a cabo uno que evaluó detalladamente el potencial de cada río en el mundo basados en su pendiente y descarga. El estudio arrojó un resultado de 52,000 TWh/año dividido en más de 11.8 millones de sitios, lo cual representa una tercera parte de la energía anual requerida a nivel global, actualmente únicamente se aporta una décima parte de eso, 3%. Asia es el continente con mayor potencial sin utilizar, el cual se estima de 7,195 TWh/año

La energía proveniente de hidroeléctrica cuenta con la ventaja de poder almacenar capacidad de producción lo que le da la posibilidad de responder a variaciones en la demanda. Parte de la capacidad es mantenida en reserva en caso de que alguna planta generadora o alguna línea de transmisión se desconectaran de improviso. Se tiene la capacidad de proveer generación de manera rápida, sin embargo, esto implica que la hidroeléctrica no esté trabajando a su máxima capacidad lo cual merma la eficiencia del sistema e inevitablemente incrementa su costo de operación. Los

sistemas hidroeléctricos de almacenamiento por bombeo son capaces de proveer una generación de base constante y eficiente, típicamente absorben el exceso de energía por la noche y lo inyectan a la red durante los picos de demanda durante el día. IRENA estima que se requiere de 150 GW de almacenamiento de baterías y 352 GW de almacenamiento por bombeo de agua en hidroeléctricas, para poder duplicar la generación de fuentes renovables para el 2030.

“La capacidad hidroeléctrica es frecuentemente categorizada en: ‘capacidad teórica bruta’ que es la capacidad de generación hidroeléctrica posible si todos los cauces naturales de agua contaran con tantas turbinas 100% eficientes fueran posibles; ‘capacidad técnicamente explotable’ es la cantidad de capacidad teórica bruta posible dentro de los límites de la tecnología actual’; y ‘capacidad económicamente explotable’ es la capacidad posible dentro de los límites de la tecnología actual y las condiciones económicas de la localidad” (World Energy Council)

Se estima que el potencial de la capacidad teórica bruta global es de entre 36 y 128 PWh/año, un potencial de la capacidad técnicamente explotable global de entre 8 y 26 PWh/año y un potencial de la capacidad económicamente explotable de entre 8 y 21 PWh/año. Ver figura H (Hoes, et al.)^{H3}. El desarrollo de hidroeléctricas implica una consideración de cuestiones tanto técnicas como económicas, sociales e incluso políticas, como en el caso de aquellas que utilizan ríos que atraviesan dos o más naciones.

Existen impactos sociales negativos asociados a las hidroeléctricas debido a que en ocasiones pobladores de la zona son desplazados, incluyendo fauna y flora del lugar. Es criticada también por las afectaciones que llegan a tener poblaciones que viven debajo de las presas y que ven reducida la afluencia de los ríos, por aportar a los gases de efecto invernadero debido a la evaporación del agua que contienen, porque el agua que no fluye adquiere nutrientes que de otra manera no hubieran estado ahí, entre otros.

Se trata también, en muchos de los casos, de grandes obras de ingeniería lo cual implica la necesidad de una fuerte suma de capital para su construcción.

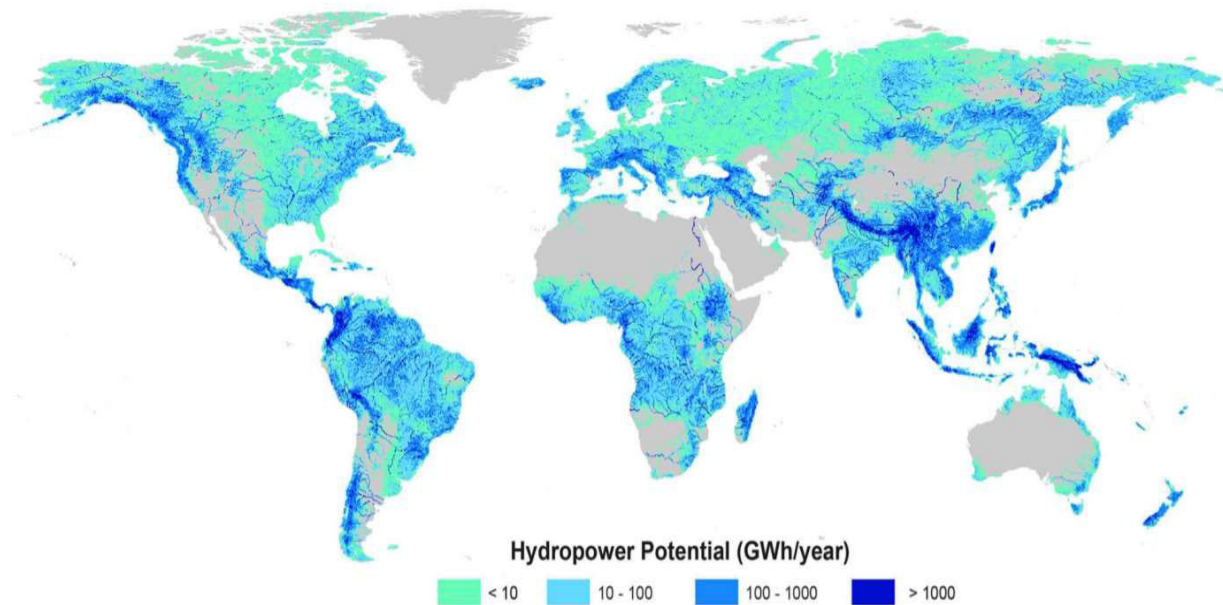


Figura H. Mapa mundial de la distribución del potencial hidroeléctrico bruto. (Hoes, et. al.)^{H3}

La energía hidráulica es una de las opciones renovables que pueden conjuntarse con otras para dar lugar a soluciones híbridas que podrían complementar sus limitantes. Tal es el caso de los paneles solares fotovoltaicos flotantes en presas de hidroeléctricas. Se aprovecha el área ya ocupada por la presa y se limita la evaporación de la superficie del reservorio. ^{H1}

2.3.2 Eólica

Según el Consejo Mundial de la Energía existe un potencial de 1,000 TWh en el mundo para la energía eólica, la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA) reporta que en el año 2015 se produjeron 825.78 TWh, así que el potencial debe ser mucho mayor. En un estudio ^{E5} de 2017, se reporta que la capacidad global es de más de 580,000 TWh/año. En el Reporte Especial de Energías Renovables de IRENA, se dice que el potencial técnico oscila entre los 19,400 TWh/año hasta los 125,000 TWh/año. ^{E6}

Para la Comunidad Económica Europea, la energía eólica se perfila para ser la energía limpia más usada en el 2050, sin embargo, el recurso eólico presenta una limitante significativa: su

intermitencia y variación. Las turbinas eólicas no generan producción durante periodos de baja velocidad del viento y también pueden dejar de producir cuando las velocidades son muy altas, las velocidades de operación normalmente oscilan entre los 2.5 y 25 m/s, aunque las turbinas están diseñadas para dar su máxima potencia en un espectro particular de velocidades. Estas velocidades pueden cambiar de manera significativa en tan solo unos minutos por lo que el comportamiento climatológico juega un papel importante en la producción eólica.

Las variaciones de la producción implican un reto para la integración de la electricidad producida por las turbinas a la red eléctrica. La variación normalmente es cubierta con generación por fuentes fósiles.

No cualquier área es susceptible para instalar un parque eólico, se requiere de estudios para encontrar los lugares donde la velocidad de los vientos sea propicia para la generación eléctrica. Ver figura E.

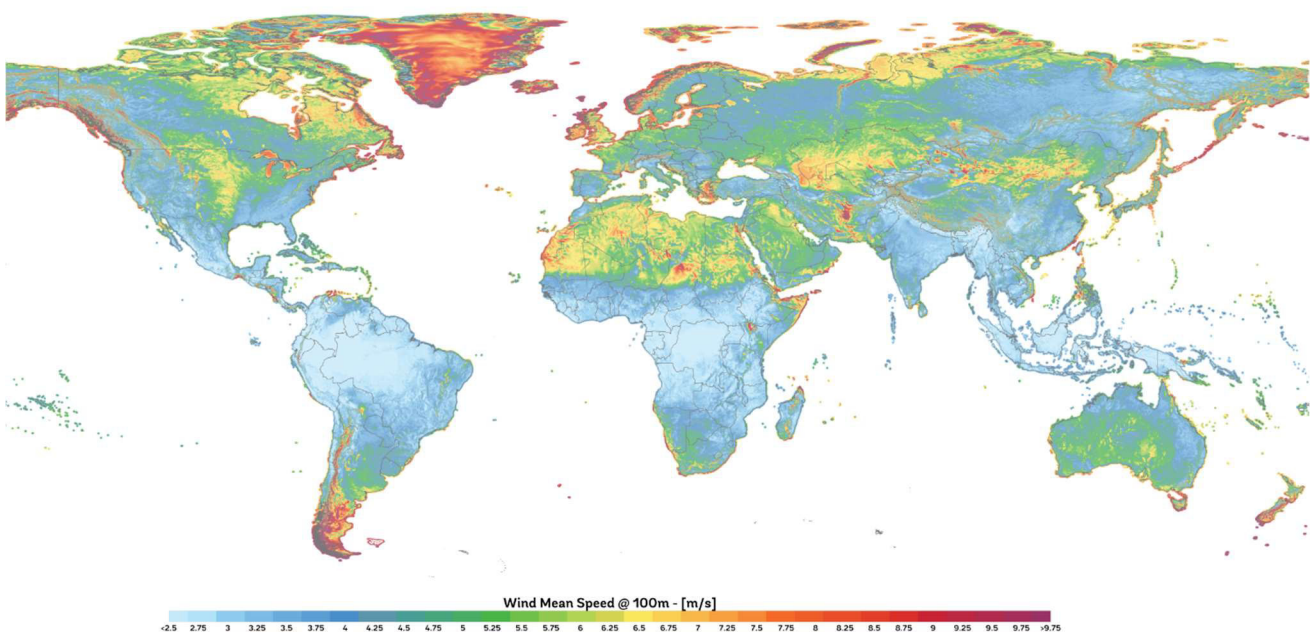


Figura E. Atlas mundial del viento. (Global Wind Atlas)^{E7}

Una vez encontrado un sitio propicio existe un impacto por el uso de suelo, en muchos casos se utilizan grandes extensiones de tierra, aunque tan sólo entre un 3% y un 5% de tierra es ocupado por la infraestructura eólica, lo cual permite que el resto siga siendo útil para otras actividades como la agricultura, para que esto se logre los generadores deben contar con un buen plan de mantenimiento que evite derrames de aceite u otras sustancias que pudieran contaminar la tierra. Existen además preocupaciones por el impacto a la fauna local, particularmente de aves y murciélagos que son los que llegan a impactarse con las turbinas, se piensa que además la vida salvaje puede llegar a evitar dichas zonas debido a la fragmentación y degradación del área. (WEC)

De forma más reciente se han empezado a dar desarrollos aguas adentro, donde existen las mismas preocupaciones sobre el impacto a la fauna marina y las aves costeras que es mayor durante la fase de instalación debido al ruido. Según el Consejo Nacional de Energía (WEC), hay estudios que apuntan que las afectaciones son mínimas, aun así, se recomienda que los parques eólicos marinos se instalen en zonas donde exista el menor impacto a la fauna salvaje. El costo de tecnología para este tipo de aerogeneradores sigue siendo alto en comparación con su contraparte terrestre.

Otro problema que enfrenta la energía proveniente del viento es el rechazo social en lugares donde existe un historial de abusos e injusticias en contra de los pobladores de las comunidades en donde se han instalado parques eólicos, tal es el caso de México que será explicado más a detalle en el siguiente capítulo.

Existen también impactos a la población mayormente relacionados con contaminación auditiva y visual. Los ruidos generados por las turbinas se deben a dos situaciones: ruido aerodinámico del movimiento de las aspas de la turbina a través del aire y el ruido mecánico de la caja de engranes y el generador. Las nuevas tecnologías han permitido que el ruido sea cada vez menor. De acuerdo con el reporte del WEC que a su vez se basó en el estudio de “Stevenson, R. (2009) Environmental Impact Assessment for Wind Farms”, un nivel aceptable de ruido se encuentra entre los 35 y 45 dB, la mayoría de los refrigeradores generan alrededor de los 40 dB, sin embargo, hay también una componente de emisión imperceptible para el oído humano que se argumenta puede producir efectos en la salud, aunque no hay ningún estudio concluyente al respecto.

Varios han sido los estudios que se han llevado a cabo intentando buscar el potencial de generación que se puede alcanzar con la energía eólica, muchos de éstos son de tipo local. Entre los estudios

globales se encuentra uno publicado en 2011 en la revista *Energy Policy*, (De Campo, et. al.), en donde se consideran todas las limitantes tanto físicas como tecnológicas:

- No todo el viento que existe puede ser convertido en electricidad, sólo podemos capturar aquel que está cerca de la superficie terrestre.
- No toda área es susceptible para instalar un parque eólico, consideraciones como muy bajas temperaturas que no sólo implicarían zonas perennemente cubiertas con hielo o la posibilidad de congelar el generador o impedir el libre movimiento de las aspas, zonas de fondo marino abisal, zonas de gran altitud, ciudades, áreas protegidas, etc. Lo cual deja apenas un 25% de área disponible. Hay tecnologías desarrollándose que permitirían instalar aerogeneradores en este tipo de lugares en un futuro, sin embargo, en el estudio no son consideradas.
- Se parte de producción con generadores típicos a 200 metros de altura y con aspas de 100 metros de diámetro. El futuro podría también otorgarnos generadores que pudieran tener mayor eficiencia.
- La distribución de la velocidad de los vientos ha cambiado con el tiempo, se ha visto un aumento de la aportación de la energía eólica en océanos durante la última mitad del siglo pasado, pero una disminución cerca de la superficie terrestre. Los cambios son atribuidos tanto al cambio climático como al cambio de uso de suelo: deforestaciones, reforestaciones, urbanización, etc.

El estudio concluiría que el potencial eólico mundial es de 1 TW. Bien podríamos considerar el dato como el escenario crítico dado que es factible romper varias de las barreras limitantes expuestas.

Seis años antes, en 2005, ingenieros del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Stanford, en un estudio sobre el potencial eólico^{E2}, encontraron que en condiciones del año 2000 se podía alcanzar un potencial de aproximadamente 72 TW o 54,000 Mtoe.

Para finales de 2017, la capacidad instalada a nivel mundial fue de 539 GW^{E8}, apenas un poco más de la mitad del escenario potencial más conservador.

2.3.3 Solar

De acuerdo con el World Energy Council el promedio de radiación solar por metro cuadrado al año que incide sobre la superficie terrestre, es capaz de producir la misma cantidad de energía que

un barril de petróleo, 200 kilos de carbón o 140 metros cúbicos de gas natural. Según el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) es de $1\text{kW}/\text{m}^2$ en un día despejado, y por nubosidad, baja humedad, y demás condiciones tiene un promedio de $198\text{ W}/\text{m}^2$, el potencial teórico sería de 3.9×10^6 EJ/año, es decir $1,083 \times 10^6$ TWh/año, considerando tanto superficie marina como terrestre^{S5}. En 2015 la producción fue de 253.59 TWh^{S5}, 1% de la electricidad producida en el mundo provenía de generación solar.

La energía solar, al igual que la eólica, tiene limitaciones por intermitencia que van más allá del día y la noche; la duración de los días varía (amanecer-atardecer) a lo largo del año, la nubosidad puede variar a lo largo del día, inclinación solar, etc. Lugares que resultarían idóneos por su extensión territorial e incidencia solar, están alejados de asentamientos humanos, llevar la energía a donde se necesita implicaría mayores gastos en infraestructura y mayores pérdidas durante la transmisión.

El potencial técnico varía de un estudio a otro. Para el caso de fotovoltaica los números van desde una producción anual de 371,667 TWh hasta 4,105,000 TWh. Para tecnología de concentración solar (CPS por las siglas en inglés correspondientes a *Concentrated Solar Power*), el rango oscila entre 68,889 TWh y 2,945,927 TWh.

En el Centro Aeroespacial Alemán, *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*, se llevó a cabo un estudio sobre el potencial energético solar. Alemania ha sido el líder en capacidad fotovoltaica instalada en la última década, aunque el estudio se basa en tecnología de concentración solar (CSP). Con los datos obtenidos por 22 años de la irradiación normal directa al año del programa Meteorología de Superficie y Energía Solar de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), fue posible generar un mapa de irradiación global (Figura S1).

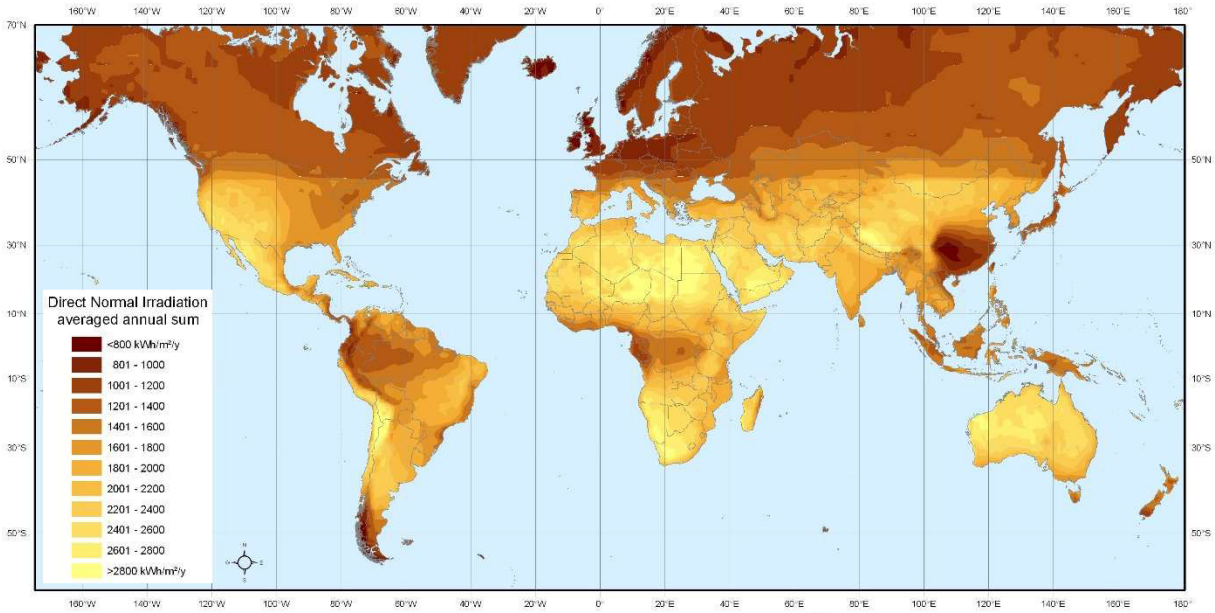


Figura S1. Irradiación normal directa en la superficie terrestre. (Trieb, 2009)^{S1}

Dado que no toda la superficie terrestre es susceptible a instalar paneles solares, se generó también un mapa de los lugares idóneos donde la tecnología CSP pudiese ser instalada, a esta área le llaman potencial de superficie geográfica. Figura S2.

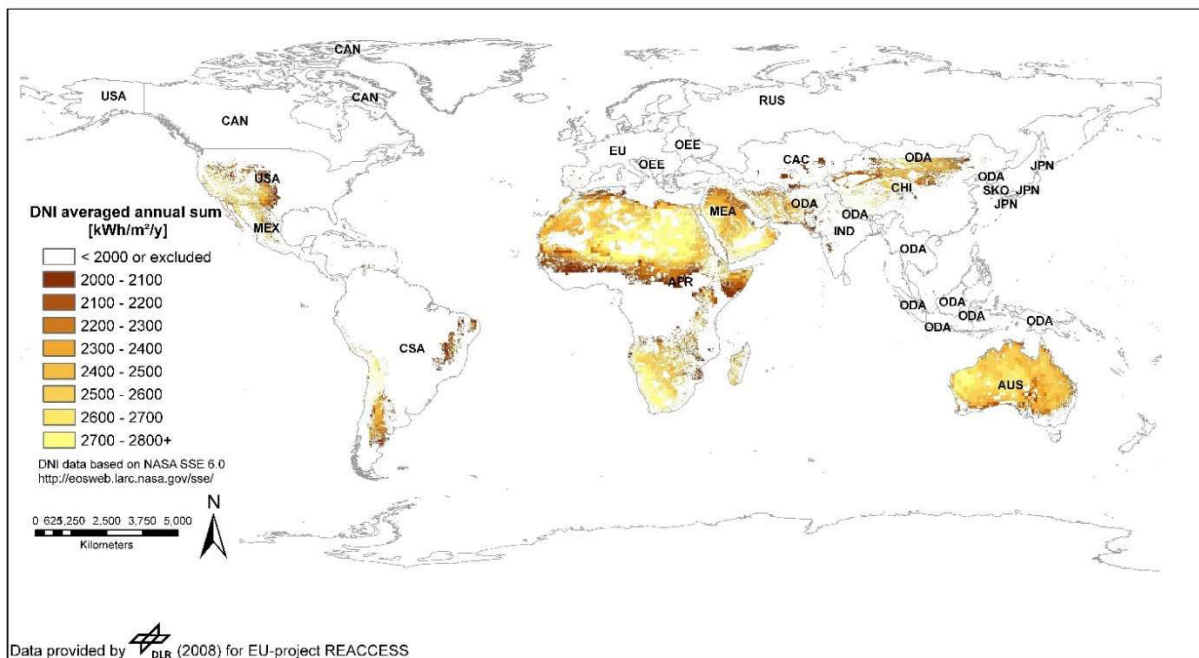


Figura S2. Zonas propicias para la colocación de plantas de energía solar por concentración.

(Trieb, 2009)^{S1}

En el potencial de superficie geográfica son excluidas zonas inclinadas, que puedan inundarse, bosques, pantanos, dunas, áreas agrícolas, arenas movedizas, salinas, glaciares, asentamientos, aeropuertos, campos de petróleo o gas, minas, canteras, plantas desalinizadoras, áreas protegidas o de acceso restringido. Las zonas resultantes junto con aquellas que reciben mayor incidencia solar dan lugar al mapa de la figura S2, la superficie cubierta puede apreciarse en la tabla S1. Este tipo de tecnología tiene una eficiencia solar-eléctrica del 12%, un factor de uso de tierra del 37% y se asume que se cuenta con capacidad de almacenamiento de energía.

Se analizó cada área y se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla S2. La suma de totales da como resultado 2,945,927 TWh/año.

DNI Class kWh/m ² /y	Africa km ²	Australia km ²	Central Asia, Caucase km ²	Canada km ²	China km ²	Central South America km ²	India km ²	Japan km ²
2000-2099	1,082,050	70,164	151,109		88,171	334,096	83,522	
2100-2199	1,395,900	187,746	3,025		184,605	207,927	11,510	
2200-2299	1,351,050	355,188	3,594		415,720	232,678	5,310	
2300-2399	1,306,170	812,512	1,642		263,104	191,767	7,169	
2400-2499	1,862,850	1,315,560	569		99,528	57,041	3,783	
2500-2599	1,743,270	1,775,670			96,836	31,434	107	
2600-2699	1,468,970	1,172,760			17,939	42,139	976	
2700-2800+	2,746,100	393,850			24,435	93,865	120	
Total [km²]	12,956,360	6,083,450	159,939	0	1,190,338	1,190,948	112,497	0

DNI Class kWh/m ² /y	Middle East km ²	Mexico km ²	Other Developing Asia km ²	Other East Europe km ²	Russia km ²	South Korea km ²	EU27+ km ²	USA km ²
2000-2099	36,315	16,999	47,520	59			9,163	149,166
2100-2199	125,682	34,123	52,262	129			5,016	172,865
2200-2299	378,654	35,263	105,768	23			6,381	210,128
2300-2399	557,299	53,765	284,963				1,498	151,870
2400-2499	633,994	139,455	172,043				800	212,467
2500-2599	298,755	60,972	37,855				591	69,364
2600-2699	265,541	12,628	2,084				257	19,144
2700-2800+	292,408	14,903	1,082				270	
Total [km²]	2,588,648	368,108	703,577	211	0	0	23,975	985,005

Tabla S1. Areas para la generación CSP (km²). (Trieb, 2009)^{S1}

DNI Class	Africa	Australia	Central Asia, Caucase	Canada	China	Central South America	India	Japan
kWh/m ² /y	TWh/y	TWh/y	TWh/y	TWh/y	TWh/y	TWh/y	TWh/y	TWh/y
2000-2099	102,254	6,631	14,280	0	8,332	31,572	7,893	0
2100-2199	138,194	18,587	300	0	18,276	20,585	1,140	0
2200-2299	139,834	36,762	372	0	43,027	24,082	550	0
2300-2399	141,066	87,751	177	0	28,415	20,711	774	0
2400-2499	209,571	148,001	64	0	11,197	6,417	426	0
2500-2599	203,963	207,753	0	0	11,330	3,678	13	0
2600-2699	178,480	142,490	0	0	2,180	5,120	119	0
2700-2800+	346,009	49,625	0	0	3,079	11,827	15	0
Total [TWh/y]	1,459,370	697,600	15,193	0	125,835	123,992	10,928	0

DNI Class	Middle East	Mexico	Other Developing Asia	Other East Europe	Russia	South Korea	EU27+	USA
kWh/m ² /y	TWh/y	TWh/y	TWh/y	TWh/y	TWh/y	TWh/y	TWh/y	TWh/y
2000-2099	3,432	1,606	4,491	6	0	0	866	14,096
2100-2199	12,443	3,378	5,174	13	0	0	497	17,114
2200-2299	39,191	3,650	10,947	2	0	0	660	21,748
2300-2399	60,188	5,807	30,776	0	0	0	162	16,402
2400-2499	71,324	15,689	19,355	0	0	0	90	23,903
2500-2599	34,954	7,134	4,429	0	0	0	69	8,116
2600-2699	32,263	1,534	253	0	0	0	31	2,326
2700-2800+	36,843	1,878	136	0	0	0	34	0
Total [TWh/y]	290,639	40,675	75,561	21	0	0	2,409	103,704

Tabla S2. Tecnología de concentración solar en TWh/año en las regiones mundiales con mejor pronóstico de irradiación solar. (Trieb, 2009)^{S1}

De Castro, en quien basamos uno de nuestros resultados de eólica, también realizó estudios de potencial eléctrico solar con tecnología fotovoltaica. Además de tomar en cuenta el potencial de superficie geográfica, considera que para llevar a cabo estos megaproyectos hay que tomar en cuenta los materiales a utilizar, entre ellos metales y elementos raros. La tecnología fotovoltaica tiene una fuerte dependencia de elementos raros o escasos, como el silicio, el cadmio, el telurio, sulfuro de cobre-indio y sulfuro de cobre-galio; de disminuir las reservas, el desarrollo de la tecnología podría verse comprometido. China está entre los proveedores de telurio e indio, pero la producción se ha visto afectada debido a que han entrado en vigor regulaciones ambientales, y si bien no todas las formas de aprovechamiento solares se ven afectadas, sí implicaría poner un mayor peso sobre el resto de las tecnologías. Aun cuando el silicio es abundante, las células de silicio policristalino se ven limitadas por la escasez de plata utilizada en los electrodos^{S3}. El estudio de De Castro concluye que el potencial solar sería de entre 2-4 TW (65-130 EJ/año).

De contemplar limitaciones minerales en el estudio del Centro Aeroespacial Alemán, considerarían que los espejos para CSP utilizan plata a razón de 1g/m² ^{S2} y que se está considerando

un área mundial total de 26,363,056 km² (sumatoria de tabla S1), lo cual equivaldría a una superficie aún mayor que Canadá, Estados Unidos y México juntos. Aún si sólo la tercera parte de esa área fuera cubierta por espejos, se necesitarían 8,787,685 toneladas de plata para alcanzar el potencial propuesto. De acuerdo con el Estudio Geológico de los Estados Unidos, USGS por sus siglas en inglés, las reservas mundiales de plata en 2017 eran de 570,000 toneladas, tan sólo un 6% de lo que se requeriría. Otras opciones más viables como el aluminio afectarían la reflectividad y por lo tanto la densidad energética.

2.3.4 Bioenergía

El potencial teórico para la bioenergía se calcula del orden de los 430,000 TWh/año^{B4}. El calor equivalente proveniente de toda la biomasa cultivada en el mundo para alimentos, forrajes, y fibra es alrededor de 60,833 TWh/año.

La bioenergía es quizás de entre las renovables, la energía más difícil de cuantificar a futuro. A pesar de la gran travesía energética que ha impulsado el desarrollo tecnológico de la humanidad, en los países menos desarrollados la biomasa tradicional sigue siendo el combustible principal del día a día, sobre todo en zonas rurales sin acceso a electricidad o a otro tipo de fuente de energía. La bioenergía proveniente de madera representa el 90% de la energía producida por biomasa. Del 18% que aportan las renovables, 14 corresponde a bioenergía, es decir 10% de la oferta de energía mundial. Las variaciones en el origen: recolectada del entorno, cultivada específicamente para energía o aprovechamiento de residuos orgánicos; llevan también a la variación de su presentación: sólido, líquido o gaseoso^{N3}. Ver tabla B1. El Consejo Mundial de la Energía asegura que los biocombustibles son la opción más viable y sustentable para sustituir la dependencia de los combustibles fósiles.

Categoría de biomasa	Comentarios	Potencial técnico a 2050 (EJ/año)
Categoría 1. Residuos de agricultura	Residuos primarios y secundarios de producción y proceso de alimentos.	15-70
Categoría 2. Producción dedicada a biomasa en terrenos agrícolas excedentes.	Existe el potencial 0 al haber la posibilidad de que todo el terreno agrícola se utilice para producir alimentos.	0-700
Categoría 3. Producción dedicada a biomasa en terreno marginal.	Tierra no apta para cultivo de alimentos, pero sí para biomasa. Puede resultar costoso.	0-110
Categoría 4. Biomasa forestal.	Residuos de tala, aserrín, corteza, arboles infestados. Inexistente cuando los recursos se asignan a sectores no energéticos	0-110
Categoría 5. Estiércol	El desarrollo de la población animal y su alimentación son factores determinantes.	5-50
Categoría 6. Desechos orgánicos	De origen residencial y de restaurantes. Papel, madera de demolición. La disponibilidad dependerá de otros usos y la habilidad para recolectarlos	5- >50
	Total	<50- >1000

Tabla B1. Potencial técnico de la biomasa. (IPCC, 2011)^{B1}

El potencial técnico alto de producción sería de más de 1000 EJ/año, o lo que es lo mismo, más de 277,778 TWh/año.

Para las categorías 2 y 3, las áreas potenciales de cultivo se muestran en la figura B1.

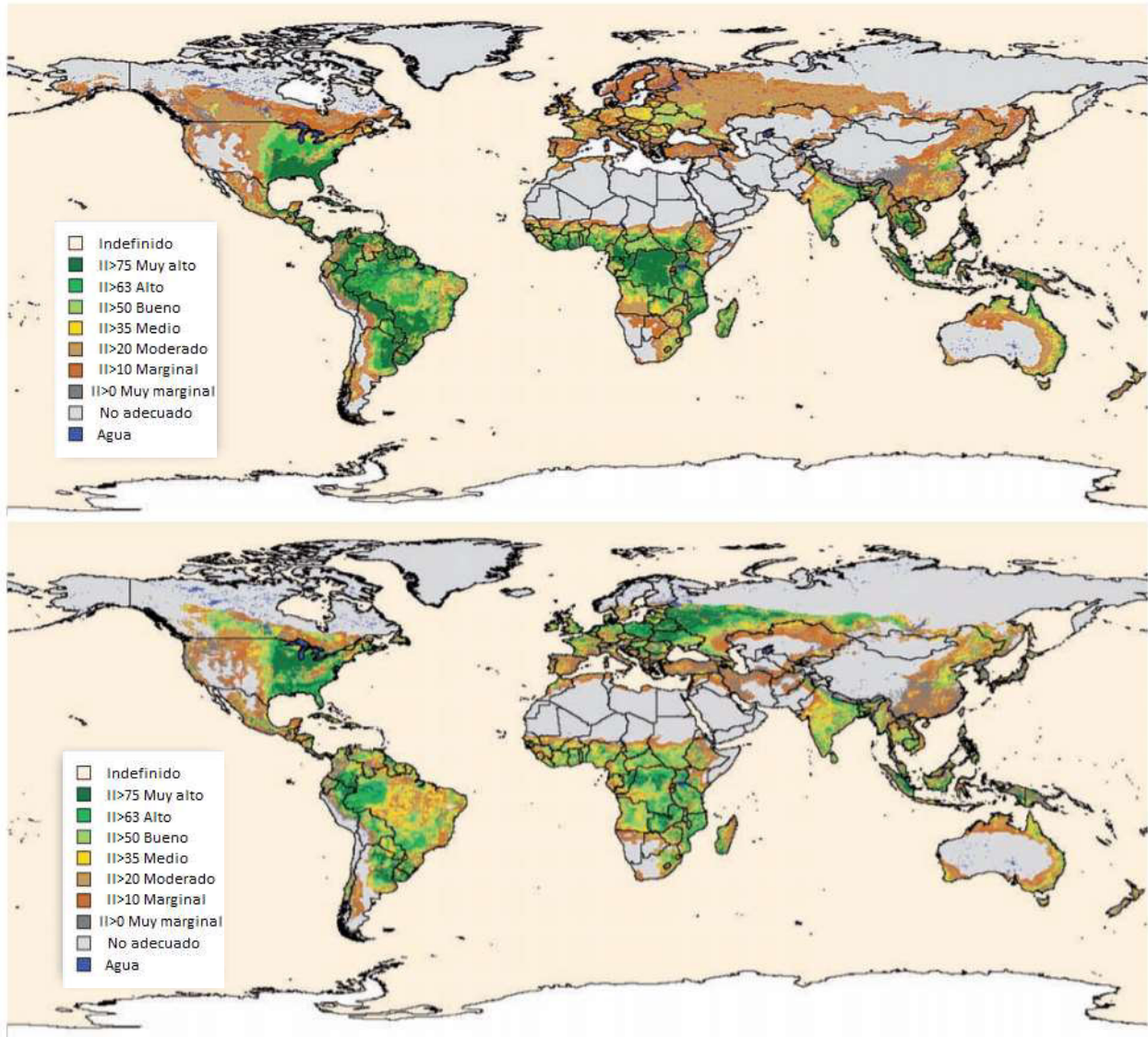


Figura B1. Índice de idoneidad de tierra para plantaciones con fines bioenergéticos. En la figura superior se consideran plantaciones herbáceas y lignocelulósicas (leña). En la inferior materia prima para biocombustibles de primera generación (caña de azúcar, maizales, Jathropa, aceite de palma, etc.)^{B1}

En Europa, el costo de producir cultivos para bioenergía también encuentra una limitante en el precio cuando la producción crece, como se muestra en la figura B2. Este incremento obedece a que se puede llegar a afectar la sustentabilidad de los recursos, tal es el caso de la degradación de

las tierras de cultivo además de que el incremento de la demanda de terrenos para este propósito va mermando la oferta incrementando así el precio^{B5}.

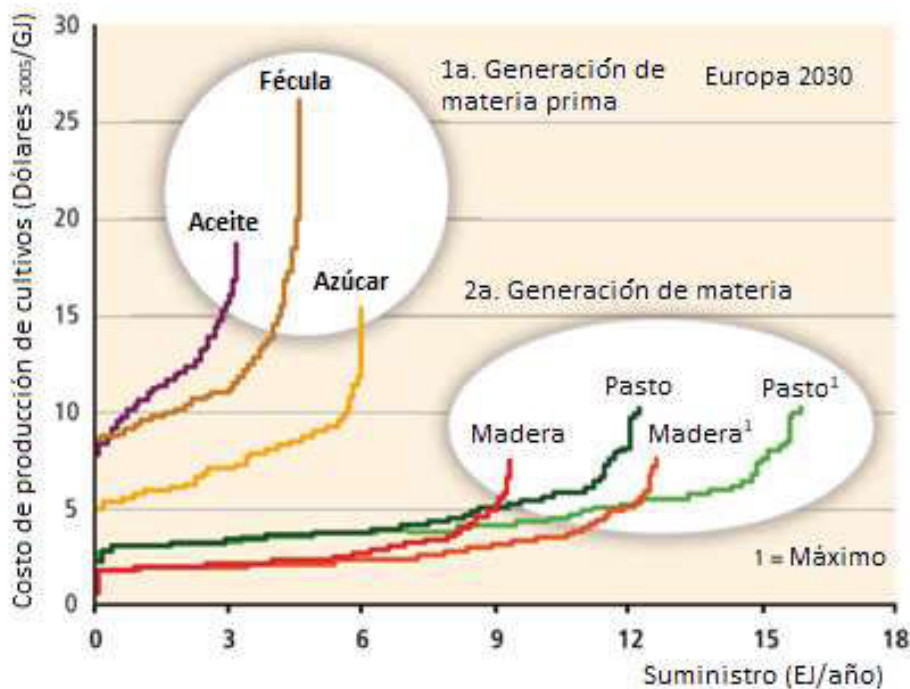


Figura B2. Costos de producción a medida que crece la producción del cultivo. (IPCC, 2011)^{B1}

La expansión de biomasa podría provocar conflictos regionales que involucran competencia por abastecimiento de alimentos, recursos hídricos, biodiversidad e inclusive podría ocasionar emisiones adicionales de gases de efecto invernadero provocados por el cambio en el uso de suelo y la pérdida de reservas de carbono. En un escenario alternativo los recursos biomásicos podrían provenir de residuos y desechos orgánicos, o de cultivos en tierras degradadas o subutilizadas, aunque esta última opción implica mayores costos. De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), existe un potencial de hasta 1000 EJ/año (B1, p. 301), sin embargo, siendo más realistas dadas las limitantes los expertos consideran un rango entre 100 y 300 EJ/año.

De Castro igualmente realizó un estudio sobre el potencial de los biocombustibles, específicamente en etanol, llegando a la conclusión de que la bioenergía ni siquiera debería ser considerada entre

las energías renovables dada su alta necesidad de flujos de energía y materiales para su producción, degradación de la tierra, además de presentar baja densidad energética. En muchas ocasiones su uso se da junto con combustibles fósiles por lo que no llegan a ser un verdadero sustituto^{B2}.

Una opción al uso de suelo y de agua es la de biocombustibles provenientes de algas, que pueden desarrollarse en agua salada, sin embargo, es costoso y aún presenta retos como lo es la rápida degradación del combustible comparada con la del fósil, debido a que el proceso de transesterificación (conversión de los aceites a combustibles) se ve revertido.

El comercio internacional puede resultar otra de las limitaciones, ya que los biocombustibles líquidos provenientes de plantas pueden ser portadores de pestes o patógenos por lo que su importación podría ser rechazada debido a las medidas sanitarias y fitosanitarias del país.

Actualmente menos del 1% de las tierras aptas para cultivo son dedicadas a la producción de insumos para biocombustibles líquidos. Los cálculos arrojan que, de ocuparse todas estas tierras para hacer biocombustibles de primera generación (combustibles derivados de almidones, azúcar, grasas animales y aceites vegetales) para reemplazar a los productos del petróleo, aún quedaría un déficit. En todo caso, los biocombustibles líquidos de primera generación pueden utilizarse como un punto de transición, mientras nuevas tecnologías son desarrolladas.

Se estima que la superficie necesaria para reemplazar el consumo actual de combustibles derivados del petróleo por biocombustibles de primera generación (bioetanol y biodiesel) supera ampliamente a la superficie que hoy se cultiva para alimentos en todo el mundo. Por lo tanto, los biocombustibles no pueden reemplazar a todos los derivados del petróleo, aunque este límite depende en gran parte de los tipos de biocombustible que se consideren y del desarrollo tecnológico de la bioenergía. En otras palabras, los biocombustibles líquidos son una opción limitada y de transición. Como tales no son entonces una solución definitiva a la sustitución de gasolina o diésel en el sector transporte.^{B3}

2.3.5 Geotérmica

De acuerdo con un estudio realizado en 1978 por el Instituto de Investigaciones de Energía Eléctrica (EPRI por sus siglas en inglés), el potencial global a 3 km de profundidad es de 43

millones de EJ; otros estudios concluyeron que representa un rango de entre 35 y 200 GW (WEC)^{G1}. De acuerdo con el IPCC el potencial técnico a la misma profundidad es de 118 EJ al año (32,778 TWh/año) y a 10 km de profundidad se podrían alcanzar 1,109 EJ al año (308,055 TWh/año).

El potencial geotérmico se ha encontrado en las fronteras de las placas tectónicas, donde se localizan volcanes y zonas sísmicas. Ver figura G.

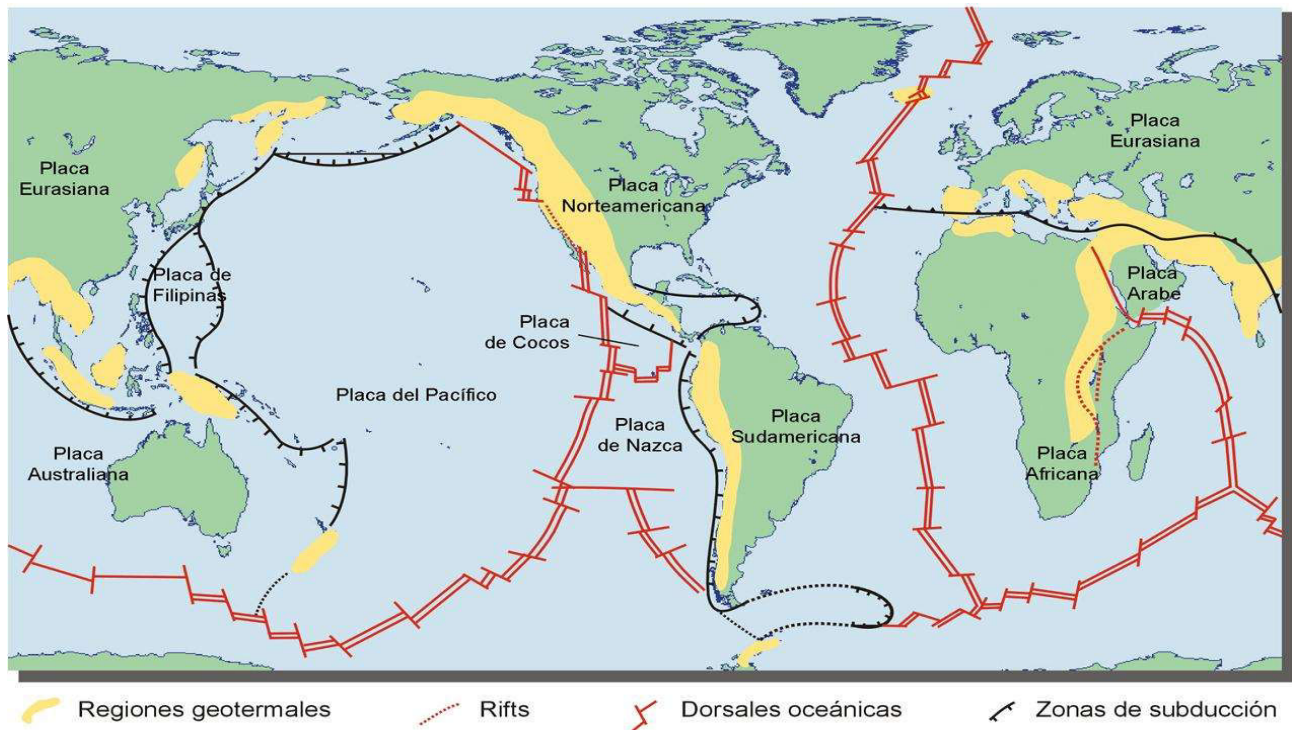


Figura G. Mapa mundial de placas tectónicas y regiones geotermiales. (Lahsen, 1988)^{G4}

La energía geotérmica aporta menos del 1% de la producción mundial, sin embargo, se cree que el potencial puede ser de 10 a 100 veces mayor (WEC). Entre sus grandes limitantes están los altos costos de instalación derivados de los materiales, acceso a la tierra y costos de perforación; así como los largos periodos de desarrollo, en comparación con las energías solares y eólicas.

Existen descargas e impactos al ambiente durante la extracción geotérmica. Los fluidos geotérmicos pueden contener dióxido de carbono, nitrógeno, amonio y sulfuro de hidrógeno, y hasta 1.5% de metano, que pueden ser descargados al aire, al agua o a la tierra. En algunos casos se ha encontrado

mercurio, arsénico, antimonio y boro. También existe contaminación por ruido e incluso puede inducirse actividad sísmica. Otro efecto secundario es el hundimiento de tierras que se puede presentar al agotarse los acuíferos superficiales. (WEC)

2.3.6 Marina

En la actualidad existen muy pocas obras para el aprovechamiento de la energía del mar, ya sea por mareas, olas o conversión de energía térmica del océano (OTEC, por sus siglas en inglés). Existen 0.5 GW de capacidad de generación instalada y 1.7 GW en construcción, cuando el potencial teórico global se estima de 29,500 TWh/año^{N3}. En el Reporte Especial de Fuentes de Energía Renovable del IPCC se estima que el potencial teórico global es de poco más de 2 millones de TWh/año, de los cuales 32,000 TWh/año son del potencial de olas, figura M1. De OTEC se cree que se pueden alcanzar hasta 88,000 TWh/año sin afectar la estructura térmica del océano. El potencial mareomotriz es más limitado, de tan solo 3 TW. Las estimaciones de potencial técnico difieren, se cree que se podrían alcanzar hasta 91,944 TWh/año, para el 2050 se podría alcanzar una producción de 1,943 TWh/año.^{M1}

El costo para producir energía con esta fuente es muy alto, en 2015, la producida por oleaje era de \$500 dólares/MWh, la de marea \$440 dólares/MWh y la de conversión de energía térmica de pequeña escala (1-10 MW) oscila entre \$190 y \$940 dólares/MWh, en este último caso se piensa que si se aumentara la producción (50-400 MW) el costo podría disminuir a un rango de entre \$70 y \$320/ MWh. Con estos costos no es de extrañarse que la mayoría de los proyectos a futuro sean de energía mareomotriz, y que sea poca la inversión en general que se destina a la energía marina.

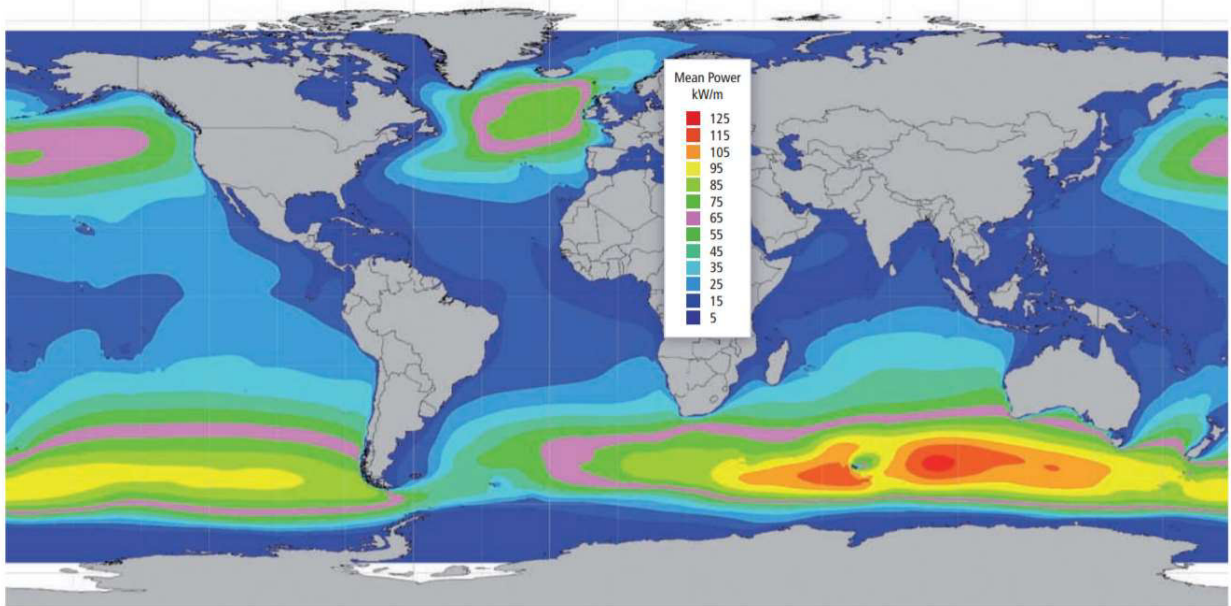


Figura M1. Distribución de la energía de las olas en el mundo (kW/m). (IPCC, 2011)^{M1}

2.4 Visión en conjunto

En todos los casos el potencial teórico de las energías renovables excede, por mucho, los requerimientos mundiales de energía de hoy en día.

Para la mayoría de las fuentes de energía la ocupación de suelo resulta una de las grandes limitantes, en la figura 2.14 puede apreciarse un comparativo de la densidad de producción de potencia, capacidad de producción de energía en una cierta área, contra el área que requieren diferentes fuentes de energía.

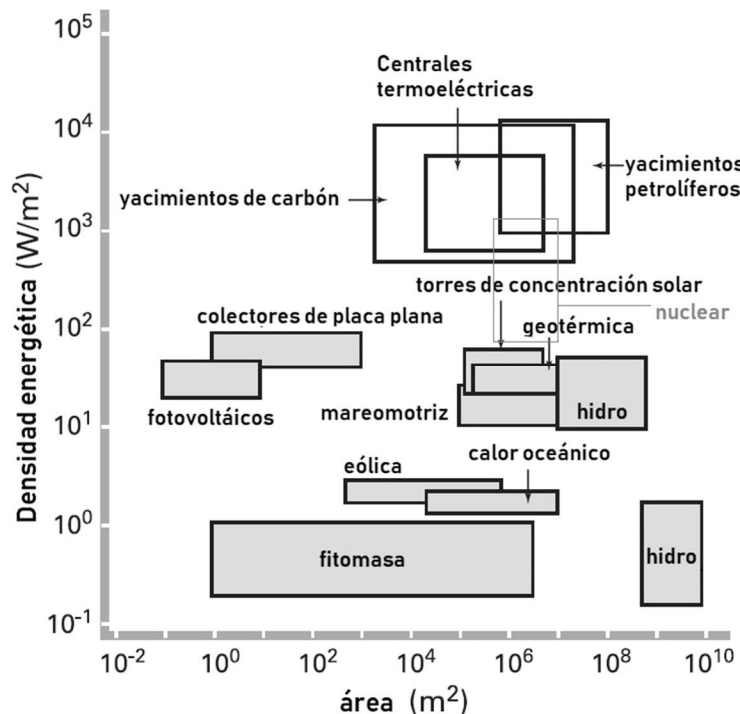


Figura 2.14 Densidad de producción de potencia de diversas fuentes de energía. (Smil, 2010)¹⁴

Lo ideal sería una energía que ocupara la esquina superior izquierda, las grandes hidroeléctricas ocupan justamente el lugar menos adecuado y aun así representan junto con las pequeñas, el 2.5% de la producción mundial. Los combustibles fósiles se encuentran en la parte superior, los mejores lugares en cuanto a densidad energética y la energía de masa vegetal (fitomasa) en la parte baja. La energía nuclear estaría por arriba de las torres de concentración solar y la geotérmica, si tomamos en cuenta que su densidad de producción de potencia es de entre 100 y 1000 W/m²^{N5} y que una planta ocupa una superficie de decenas de millones de metros cuadrados^{N6}.

Otra de las grandes limitantes es el costo de producción de energía, aún dentro de una misma fuente primaria los costos pueden variar como se vio en la figura 2.5 Mucho del gran éxito de los combustibles fósiles es su bajo costo y aunque las energías limpias se acercan, aún no logran estar a la par de precio y capacidad. En la figura 2.15 se muestran los resultados de costos según datos de Lazard¹⁵, una compañía de asesoría financiera y de administración de recursos. Dado que no se incluían los datos de energía hidráulica, éstos fueron tomados de la Administración de Información de la Energía.

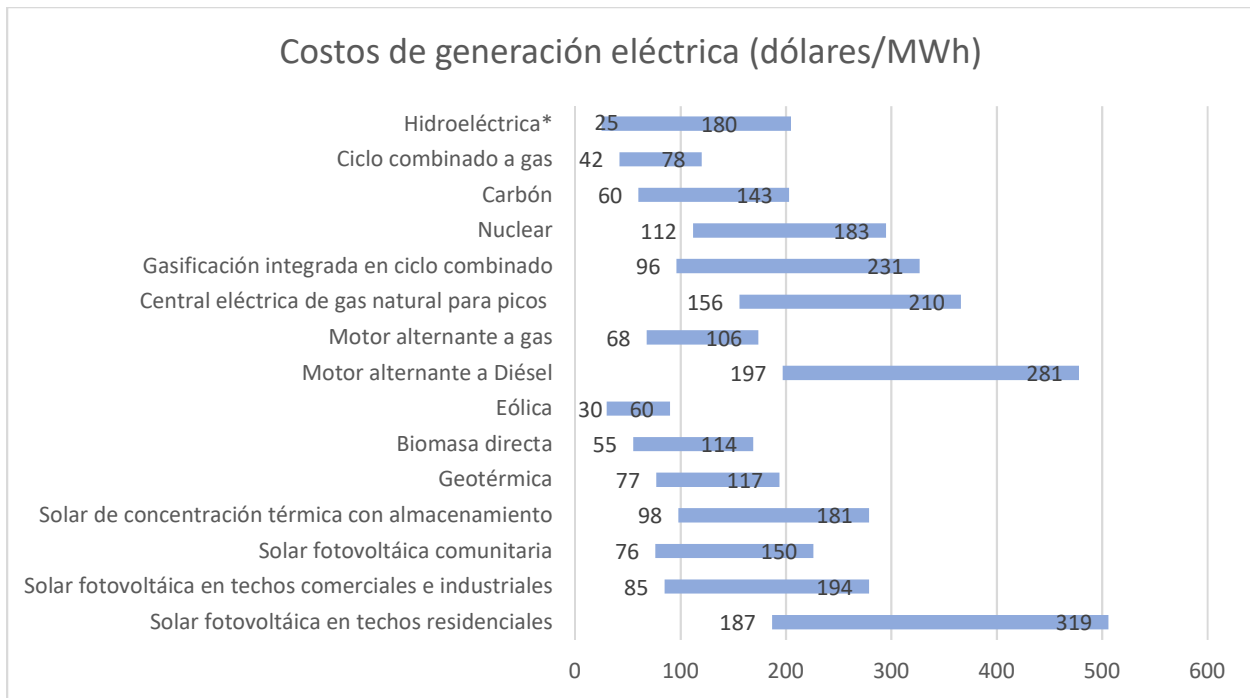


Figura 2.15 Costos de generación de energía según su fuente. Mínimo y máximo. (dólares/MWh)
Tabla propia basada en datos de Lazard¹⁵, 2017 e IEA^{H5}, 2012

Al hacer una comparación entre el potencial y las limitantes de las diferentes fuentes de energía disponible, se obtuvo el siguiente cuadro:

		Potencial teórico	Potencial técnico	Generación actual	Límites					
					Mineral	De superficie	Económico	Social	Ambiental	
TWh	Petróleo	2,779,570		50,967/año	Alto	Alto	Medio	Medio	Alto	
	Carbón	9,269,090		42,523/año	Alto	Medio/Alto	Bajo	Medio/Alto	Alto	
	Gas Natural	1,969,881		37,493/año	Alto	Medio/Alto	Muy bajo	Medio/Bajo	Medio	
TWh/año	Nuclear		18,492	7,777	Medio	Medio	Medio/Alto	Alto	Medio	
	Hidroeléctrica	52,000	14,000	3,900	Bajo	Muy alto	Medio/Alto	Medio/Alto	Medio	
	Eólica	580,000	19,400-125,000	826	Bajo	Medio	Bajo	Medio	Bajo	
	Solar	Fotovoltaica	1,083x10 ⁶	371,667-4,105,000	254	Medio	Bajo	Medio/Alto	Bajo	Medio
		Térmica		68,889-2,945,927		Medio	Alto	Medio/Alto	Bajo	Bajo
	Bioenergía	430,000	277,778	477	Bajo	Alto	Medio	Bajo	Bajo	
	Geotérmica	11.19x10 ⁶	32,778	80	Bajo	Medio	Medio	Bajo	Bajo	
Marina	2.055x10 ⁶	91,944	1	Bajo	Medio	Muy alto	Bajo	Bajo		

Tabla 2.5 Potencial de las diferentes fuentes de energía y sus limitantes. Elaboración propia con datos recabados para el capítulo 2.

2.5 Conclusiones

Las reservas de combustibles fósiles aún son grandes, lo que permitiría seguir explotándolos por varias décadas aun considerando los incrementos de la demanda. El límite del petróleo, al igual que el de otros combustibles fósiles, puede ocurrir cuando su costo de extracción y comercialización sea mayor al que la mayoría de las personas esté dispuesta a pagar por ellos. El peligro sería que esperar a que esto suceda, podría llevar al planeta a una catástrofe ambiental. El mismo efecto podría lograrse con políticas que incrementaran el precio y desmotivaran a la compra de energías contaminantes. De igual manera, pero en sentido inverso, debería de fomentarse el uso de energías limpias incentivando su adquisición. Incrementar la demanda de energía limpia podría llevar a mayores inversiones en investigación y desarrollo que terminen por reducir los precios y fomentar aún más su uso.

Aún con la mala percepción que tiene gran parte de la población respecto a la energía nuclear, sigue siendo una alternativa para la generación sin altas emisiones contaminantes, aunque sí con desechos radiactivos. Sus altos costos ligados a la seguridad hacen de ella una opción cada vez menos atractiva.

La transición hacia energías más limpias requerirá que el sistema eléctrico sea más sensible a las limitantes de las energías renovables para que pueda proveer de electricidad de manera continua y confiable aun con variaciones tanto por su lado de generación como del de demanda. Es altamente probable que las cargas base se mantengan entre la nuclear, la hidroeléctrica y la geotérmica, y el resto de las energías pudieran buscar una manera de compensar entre sí sus intermitencias o variaciones. Una de las opciones para hacer frente a los cambios sería la posibilidad de almacenar energía, sin embargo, en la mayoría de los casos esto sigue representando un alto costo.

Evidentemente un cálculo de potencial implica muchas variables, entre las más importantes se encuentra el tipo de tecnología a usar.

2.6 Bibliografía

- [1] “Key world Energy Statistics” (2017) International Energy Agency. En línea. Disponible en: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf> [Accesado el 1o. de octubre de 2017].
- [2] Mohr, S. (2010)_"Projection of world fossil fuel production with supply and demand interactions" Tesis de doctorado. Australia, Facultad de Ingeniería y Construcción del Ambiente, Escuela de Ingeniería, Universidad de Newcastle. [En línea]. Disponible en: <http://ogma.newcastle.edu.au:8080/vital/access/manager/Repository/uon:6530> [Accesado el 1o. de octubre de 2017].
- [3] “Evaluación de las reservas de hidrocarburos. 1 de enero de 2017” (2017) PEMEX exploración y producción. México, 1o. de enero de 2017. [En línea]. Disponible en: http://www.pemex.com/en/investors/publications/Reservas%20de%20hidrocarburos%20evaluaciones/20170101_rh_e.pdf [Accesado el 5 de octubre de 2017].
- [4] Hubbert, M.K. (1962) “Energy Resources. A Report to the Committee on Natural Resources” National Academy of Science. National Research Council. Publication 1000-D. Washington. [En línea] Disponible en: <http://www.hubbertpeak.com/hubbert/EnergyResources.pdf> [Accesado el 3 de octubre de 2017].
- [5] “Oil” en Agencia Internacional de Energía en About, FAQ. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/about/faqs/oil/> [Accesado el 3 de octubre de 2017].
- [6] “Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability” (2012) Ginley, D. y D. Cahen, Materials Research Society, Cambridge University Press, Cambridge. <https://goo.gl/E8jWcr> [Accesado el 12 de octubre de 2017].
- [7] Adelman, M (1996) “The Genie Out of the Bottle: World Oil Since 1970” MIT Press, Massachusetts. p.11 [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/8XAUg3> [Accesado el 10 de octubre de 2017].
- [8] “Oil reserves” (2016) en Energy economics, Statistical Review, Oil, Oil reserves; en BP Global. [En línea]. Disponible en: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/oil/oil-reserves.html> [Accesado el 10 de octubre de 2017].
- [9] Mohr, S. *et. al.* (2015) “Projections of world fossil fuel by country” en *Fuel*, volumen 141, 1o. febrero 2015, pp. 120-135. [En línea]. Disponible en: <https://www-sciencedirect-com.pbidi.unam.mx:2443/science/article/pii/S0016236114010254> [Accesado el 1o. de noviembre de 2017].
- [10] “Crude oil production” en Crude Oil, Global Energy Statistical Yearbook 2018 en Enerdata. [En línea]. Disponible en: <https://yearbook.enerdata.net/crude-oil/world-production-statistics.html> [Accesado el 24 de agosto de 2018]

[11] Patzek, T y G. Croft (2010) “A global coal production forecast with multi-Hubbert cycle analysis” en *Energy*, 35 (2010) pp. 3109-3122 [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544210000617> [Accesado el 1o. de noviembre de 2017].

[12] Höök, M. et. al. (2010) “Global coal production outlooks based on a logistic model” en *Fuel*, volumen 89 (2010) pp. 3546-3558. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236110002954> [Accesado el 1o. de noviembre de 2017].

[13] Petroff, A. y T. Yellin “What it costs to produce oil” en CNN Money. [En línea]. Disponible en: <http://money.cnn.com/interactive/economy/the-cost-to-produce-a-barrel-of-oil/index.html?iid=EL> [Accesado el 29 de octubre de 2017].

[14] Smil, V. (2010) *Energy Transitions: History, Requirements, Prospects*. Praeger, Santa Bárbara.

[15] “Lazard’s Levelized Cost of Energy Analysis” (2017), en Lazard News, 2 de noviembre de 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.lazard.com/media/450337/lazard-levelized-cost-of-energy-version-110.pdf> [Accesado el 1o. de noviembre de 2017].

[16] “Coal” (2017), BP Statistical Review of World Energy, edición 66va., junio 2017. BP. [En línea]. Disponible en: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-coal.pdf> [Accesado el 10 de noviembre de 2017].

[17] “Representative Concentration Pathways (RCPs)” en Scenario process for AR5, Guidelines, Data Distribution Center, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [En línea]. Disponible en: http://sedac.ipcc-data.org/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html [Accesado el 12 de enero de 2018]

N1 “Nuclear Power in the World Today”, en Current and future generation, Information Library, World Nuclear Association. [En línea]. Disponible en: <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx> [Accesado el 17 de agosto de 2018]

N2 “How uranium ore is made into nuclear fuel”, en How is uranium made into nuclear fuel, Nuclear Basics, World Nuclear Association. [En línea]. Disponible en: <http://www.world-nuclear.org/nuclear-basics/how-is-uranium-ore-made-into-nuclear-fuel.aspx> [Accesado el 11 de noviembre de 2017].

N3 “Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050” (2016) Reference Data Series No. 1, en Scientific and Technical Publications en Publications en International Atomic Energy Agency. Viena. [En línea]. Disponible en: <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/11120/Energy-Electricity-and-Nuclear-Power-Estimates-for-the-Period-up-to-2050> [Accesado el 11 de noviembre de 2017].

- N4 “World Energy Resources 2016” publicado por el World Energy Council, Londres. [En línea]. Disponible en: <https://www.worldenergy.org/publications/2016/world-energy-resources-2016/> [Accesado el 11 de noviembre de 2017].
- N5 “Identified Uranium resources by region” en Nuclear, Energy Resources, Data, World Energy Council. [En línea]. Disponible en: <https://www.worldenergy.org/data/resources/resource/nuclear/> [Accesado el 12 de noviembre de 2017].
- N6 Wilson, R. (2013) “The Future of Energy: Why Power Density Matters” en The Energy Collective, 9 de Agosto del 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.theenergycollective.com/robertwilson190/257481/why-power-density-matters> [Accesado el 12 de noviembre de 2017].
- N7 Jenkins, J. (2015) “How Much Land Does Solar, Wind and Nuclear Energy Require?” en The Energy Collective, 25 de junio de 2015. [En línea]. Disponible en: <http://goo.gl/cfbVj4> [Accesado el 13 de noviembre de 2017].
- N8 “International Status and Prospects for Nuclear Power 2017” Board of Governors General Conference, International Atomic Energy Agency (IAEA), 28 de julio de 2017, Viena. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/Y9yKh2> [Accesado el 13 de noviembre de 2017].
- H1 “Hydropower Status Report 2017” International Hydropower Association. Sutton. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/9v6voJ> [Accesado el 13 de noviembre de 2017].
- H2 “World Energy Resources Hydropower | 2016”, World Energy Council. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/je6aCp> [Accesado el 13 de noviembre de 2017].
- H3 Hoes, O. et. al. “Systematic high-resolution assessment of global hydropower potential” (2017), Department of Water Management, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, PLoS ONE12(2): e0171844. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171844> [Accesado el 14 de noviembre de 2017].
- H4 “Chapter 5. Hydropower” (2009) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/GmGVXt> [Accesado el 16 de noviembre de 2017].
- H5 “Technology Road Map. Hydropower”, (2012), International Energy Agency. [En línea]. Disponible en: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/2012_Hydropower_Roadmap.pdf [Accesado el 16 de noviembre de 2017].
- E1 De Castro, C. et. al. “Global wind power potential: Physical and technological limits” (2011) en Energy Policy, Vol. 39, suplemento 10, octubre 2011, pp. 6677-6682 [En línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421511004836> [Accesado el 18 de noviembre de 2017].
- E2 Archer, C. y M. Jacobson “Evaluation of global wind potential” (2005), Journal of Geophysical Research, Vol. 110, D12110, doi:10.1029/2004JD005462, 2005 [En línea]. Disponible en:

<https://web.stanford.edu/group/efmh/winds/2004jd005462.pdf> [Accesado el 18 de noviembre de 2017].

E3 “World Energy Resources Wind | 2016”, World Energy Council. [En línea]. Disponible en: https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_Wind_2016.pdf [Accesado el 18 de noviembre de 2017].

E4 “Renewable Energy Technologies” en Capacity and generation, Renewable Energy Topic, International Renewable Energy Agency. [En línea]. Disponible en: <http://goo.gl/epdC5Q> [Accesado el 18 de noviembre de 2017].

E5 Bosch, J. et.al. (2017) “Temporally-explicit and spatially-resolved global onshore wind energy potentials” en *Energy*, volume 131, 15 de julio de 2017, pp. 207-217. Elsevier. [En línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217308095> [Accesado el 18 de noviembre de 2017].

E6 “Chapter 7. Wind Energy” (2011) en Reporte Especial en Fuentes de Energía Renovables del IPCC. Cambridge y Nueva York. [En línea]. Disponible en: <http://goo.gl/U3YBuA> [Accesado el 18 de noviembre de 2017].

E7 “Onshore & offshore wind resource map” en Wind speed potencial en Global Wind Atlas [En línea]. Disponible en: <https://globalwindatlas.info/downloads/World> [Accesado 16 marzo 2017].

E8 “Wind power capacity reaches 539 GW, 52.6 GW added in 2017” (2018), En Evwind, News Menu, offshore, Uncategorized, Wind Energy, wind energy, 12 de febrero de 2018 [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/cNHP94> [Accesado el 17 de marzo de 2018].

S1 Trieb, F. et.al. “Global Potential of Concentrating Solar Power” (2009), SolarPaces Conference, Berlín. 15-18 septiembre, 2009. [En línea]. Disponible en: <http://goo.gl/Q9Mjv7> [Accesado el 20 de noviembre de 2017].

S2 De Castro, C. et.al. “Global solar electric potential: A review of their technical and sustainable limits” (2013), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 28, diciembre 2013, pp. 824-835. [En línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113005807> [Accesado el 21 de noviembre de 2017].

S3 García-Olivares, A. et.al. “A global renewable mix with proven technologies and common materials” (2012), en *Energy Policy*, volumen 41, 2012, pp. 561-574. [En línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421511008950> [Accesado el 21 de noviembre de 2017].

S4 “Silver” (2017) en Mineral Commodity Summary, Annual Publications, Publications, Silver Statistics and Information, Minerals Information, United States Geological Survey (USGS) [En línea]. Disponible en: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/silver/mcs-2017-silve.pdf> [Accesado el 21 de noviembre de 2017].

S5 “Chapter 3. Direct Solar Energy” (2011) en Reporte Especial en Fuentes de Energía Renovables del IPCC. Cambridge y Nueva York. [En línea]. Disponible en: [http:// goo.gl/bUoBef](http://goo.gl/bUoBef) [Accesado el 22 de noviembre de 2017].

B1 Chum, H., et.al. “2011: Bioenergy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation”, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. [En línea]. Disponible en: [https:// goo.gl/bEmsNv](https://goo.gl/bEmsNv) [Accesado el 23 de noviembre de 2017].

B2 De Castro, C. et.al. (2014) “A top-down approach to assess physical and ecological limits of biofuels” en *Energy*, volume 64, 2014, pp. 506-512. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/journal/03605442/64> [Accesado el 23 de noviembre de 2017].

B3 “La bioenergía en México. Situación actual y perspectivas” (2011) Cuadernos temáticos sobre bioenergía. Red Mexicana de Bioenergía. México. [En línea]. Disponible en: <http://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2014/12/CT4.pdf> [Accesado el 23 de noviembre de 2017].

B4 “Chapter 2. Bioenergy” (2011) en Reporte Especial en Fuentes de Energía Renovables del IPCC. Cambridge y Nueva York. [En línea]. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/Chapter%202%20Bioenergy.pdf> [Accesado el 24 de noviembre de 2017].

B5 De Wit, M. y Faaij, A. (2009) “European biomass resource potential and costs”, en *Biomass and Energy* 34 (2), 34.10.1016/j.biombioe.2009.07.011., [https:// goo.gl/gao6mn](https://goo.gl/gao6mn) [Accesado el 25 de noviembre de 2017].

G1 “World Energy Resources Geothermal | 2016”, World Energy Council. [En línea]. Disponible en: [https:// goo.gl/XsXRma](https://goo.gl/XsXRma) [Accesado el 27 de noviembre de 2017].

G2 Bertani, R. (2012) “Geothermal power generation in the world 2005–2010 update report” en *Geothermics*, volumen 41, enero 2012, pp. 1-29. [En línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650511000526> [Accesado el 30 de noviembre de 2017].

G3 “Chapter 4. Geothermal Energy” (2011) en Reporte Especial en Fuentes de Energía Renovables del IPCC. Cambridge y Nueva York. [En línea]. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/Chapter%204%20Geothermal%20Energy.pdf> [Accesado el 2 de diciembre de 2017].

G4 Lahsen, A. (1988) “La energía geotérmica: Posibilidades de desarrollo en Chile” Departamento de Geología Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile. [En línea]. Disponible en: <http://www.datoanuncios.org/images/energiageotermica.pdf> [Accesado 12 agosto 2017].

M1 “Chapter 6. Ocean Energy” (2011) en Reporte Especial en Fuentes de Energía Renovables del IPCC. Cambridge y Nueva York. [En línea]. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/Chapter%206%20Ocean%20Energy.pdf> [Accesado el 10 de diciembre de 2017].

Anexo A. Cantidad de Recursos Recuperables

URR (Ultimately Recoverable Resource)

Es un estimado de la cantidad total de petróleo que puede ser recuperado y producido. Aunque dentro de la naturaleza éste podría ser considerado como un número fijo, para los estudiosos del tema se trata de uno que tiende a crecer conforme se adquieren más conocimientos y la tecnología avanza. El URR comúnmente es dividido en tres subcategorías:

1. Producción acumulada. Es un estimado de todo el petróleo producido a una determinada fecha.
2. Reservas descubiertas. Es un estimado de la producción acumulada futura de yacimientos conocidos y se definen en términos de distribución probabilística. A su vez pueden ser divididas en 3 categorías:
 - a. Probadas. “Las reservas probadas de hidrocarburos son cantidades estimadas de aceite crudo, gas natural, y líquidos del gas natural, las cuales, mediante datos de geociencias y de ingeniería, demuestran con certidumbre razonable que serán recuperadas en años futuros de yacimientos conocidos bajo condiciones económicas y de operación existentes a una fecha específica.”³ La relación entre las reservas y la producción real para un yacimiento dado, se conoce como factor de recuperación y éste puede variar en el tiempo dependiendo de la historia de operación del yacimiento, así como en respuesta a cambios tecnológicos y económicos.
 - b. Probables. También denominadas reservas P50 debido a que son aquellas que tienen una probabilidad mayor al 50 por ciento de ser técnica y económicamente producidas.
 - c. Posibles. Son aquellas en las que la posibilidad de ser técnica y económicamente producidas se calcula menor al 50 por ciento por lo que dicha producción no se espera en un futuro cercano.

En general, una porción de las reservas probables o posibles de un yacimiento tienden a convertirse con el tiempo en reservas probadas conforme se reduce la incertidumbre de recuperación de lo que queda de reservas recuperables y a partir del historial operativo del yacimiento, al fenómeno se le llama “crecimiento de reservas”

3. Recursos sin descubrir.

Capítulo 3. Futuro. Los posibles escenarios.

La mejor manera de predecir el futuro es creándolo.

Peter Drucker

El último capítulo de esta tesis habla de las tendencias en el crecimiento poblacional y sus consecuencias. Analiza las posibles opciones a futuro de la relación entre el hombre y la energía, y el futuro de las energías renovables en la mezcla energética. Existen diferentes escenarios, desde el más deseable hasta el peor que sería seguir actuando como lo hemos hecho hasta ahora, el “business as usual”. Se toman en cuenta los diferentes factores que podrían llevar a que dichos escenarios ocurriesen.

Se ven cuales son las barreras y cuales los puentes que afectaran la transición hacia energías limpias, así como los principales actores que podrían favorecer o impedir que la transición se lleve a cabo.

Por último, se aborda el caso de México, se da una breve visión de la situación respecto a la energía renovable y lo que el gobierno planea que suceda a futuro.

3.1 Los posibles escenarios

A medida que la población mundial crece y los países en desarrollo avanzan, las necesidades de energía se incrementan. Si bien los estudios indican que las tasas de crecimiento poblacional han disminuido, de 2.2% en 1963 a 1.1% en 2011 (Letcher, 2013 p. 3), se espera que para 2050 lleguemos a ser 9.7 miles de millones de personas habitando este planeta lo que provocará un mayor consumo de energía, entre 696-879 EJ (144-193 PWh)^[1]. Más del 50% de la población mundial vive en ciudades, que emiten entre 37% y 49% de las emisiones de efecto invernadero a nivel mundial, la infraestructura urbana abarca el 70% de la energía global usada. (Van Staden, 2017 p.18)

Entre los años 1900 y 2000, el incremento poblacional fue de 1.5 a 6.1 miles de millones de personas, tres veces mayor que el registrado en toda la historia de la humanidad.

Para los próximos 20 años se estima que, a nivel mundial, la tasa de crecimiento de la demanda de energía sea mucho mayor (5% anual en promedio) que la tasa de crecimiento poblacional, esto debido al incremento de producción de electricidad de los países en desarrollo (Letcher, 2013 p. 3). La producción de electricidad es la mayor consumidora de energía en el mundo y la mayor emisora de CO₂ al ambiente, 26%; la mayor parte de la electricidad se produce con gas natural o carbón.

Sería deseable que el aumento en el consumo energético pudiera ser cubierto con energías renovables, de las cuales se tiene tanto el potencial teórico como técnico, según lo visto en el capítulo 2. De acuerdo con el Reporte Especial de Energías Renovables del IPCC^[2], para el 2050:

- La generación hidroeléctrica reduciría su participación en la generación eléctrica de 16.4% en 2016, a entre 10 y 14%.
- Se podría alcanzar o incluso rebasar 20% de generación de energía a través de producción eólica.

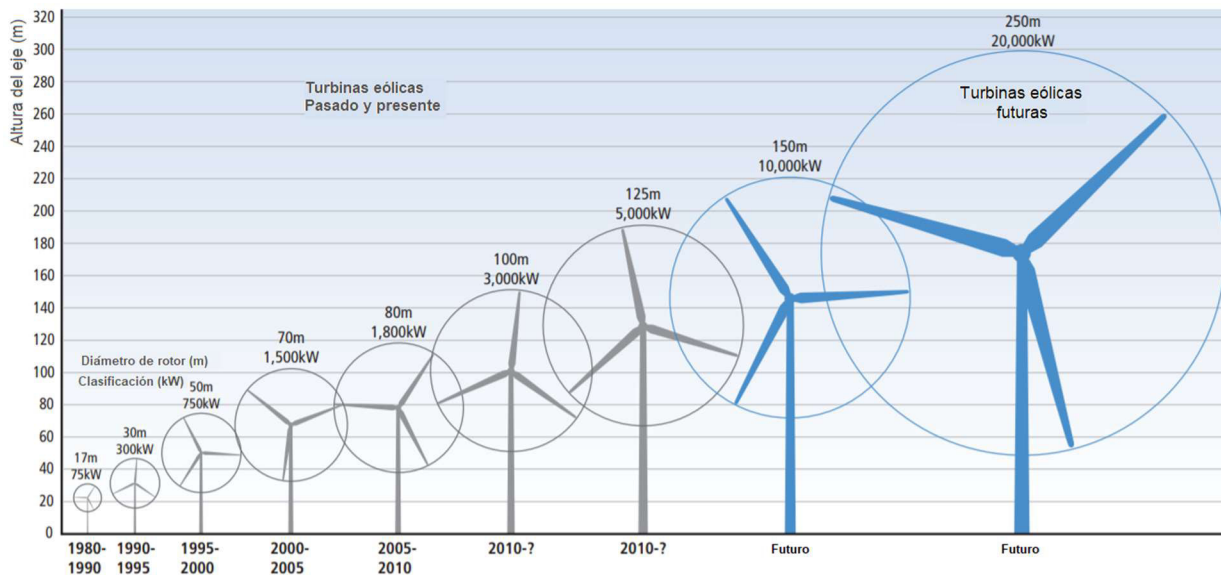


Figura 3.1 La tendencia de crecimiento de las turbinas eólicas. (IPCC, 2012)^[2]

- La energía solar cuenta con el mayor potencial técnico de entre las fuentes de energía renovables, sin embargo, su alto costo ha impedido su proliferación lo cual tiende a

cambiar. En los escenarios más optimistas la porción fotovoltaica de esta fuente de energía se pronostica de hasta un tercio de la producción total.

- La bioenergía oscila entre el 16 y el 48%, sin embargo, de alcanzar altos índices se debe tener especial cuidado en no competir con tierra destinada a la producción de alimentos ya que incrementaría su precio perjudicando principalmente a los más necesitados.

- La energía geotérmica podría alcanzar 3% en la mezcla de producción de electricidad y hasta 5% en demanda mundial de calentamiento y enfriamiento.

- La energía marina se pronostica que seguirá teniendo un alto costo, por lo que constituirá apenas un 1% en el mejor de los casos.

La energía nuclear debido a los altos costos de seguridad tiene una fuerte disposición a disminuir y de haber crecimiento éste sería muy pequeño. Aportaría entre 4 y 11% de la generación de energía eléctrica mundial, comparada con el 10.6% de 2014 (WEC, 2016).

La demanda de energía es directamente proporcional a varios factores, entre los más importantes están el crecimiento poblacional, el Índice de Desarrollo Humano (IDH) y el costo. Existe también una relación entre los ingresos y el tipo de energía que se emplea. En la figura 3.2 puede apreciarse cómo a medida que el ingreso aumenta, también se incrementa el consumo de energía, además de que la mezcla se modifica. A menor ingreso existe un mayor consumo de biomasa tradicional y muy poco consumo de productos del petróleo, a mayor ingreso sucede lo contrario.

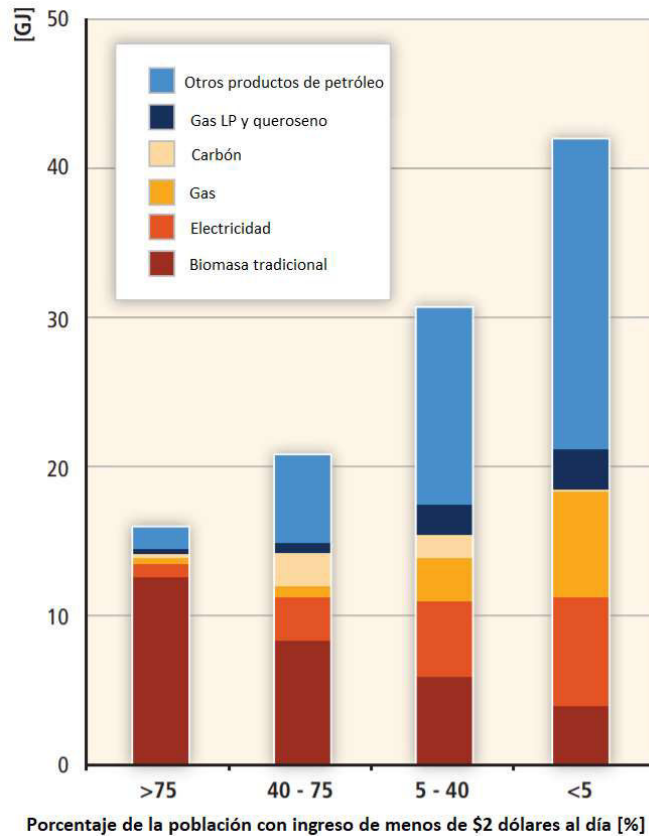


Figura 3.2 Relación entre consumo per cápita de energía e ingreso en países en desarrollo (IPCC 2010) [2]

El futuro no está escrito aún, y entre lo que nos gustaría que ocurriera, lo que podría ocurrir y lo que definitivamente no quisiéramos que pasara existen grandes diferencias por lo que lo más adecuado sería hablar de posibles escenarios. De acuerdo con el Dr. Christoph Frei, Secretario General del Consejo Mundial de la Energía: “Estamos luchando por tomar decisiones de inversión a largo plazo que sean robustas y nos permitan tener la infraestructura resiliente que necesitamos. Estaremos atados la siguiente mitad de siglo, ya sea para bien o para mal, a la infraestructura que construyamos el día de hoy”¹. El Consejo Mundial de la Energía propone que las decisiones tengan en consideración el “trilema energético”, ver figura 3.3, donde el futuro energético debe considerar un balance entre la seguridad energética, la igualdad energética y la sostenibilidad medioambiental.

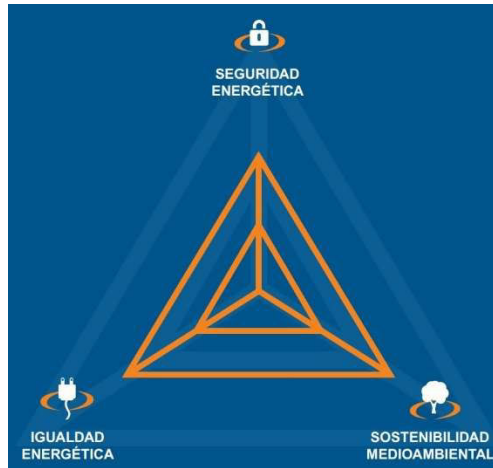


Figura 3.3 El “trilema” energético. (WEC, 2013) ^[1]

La seguridad energética se obtiene a través de una infraestructura confiable y proveedores capaces de cumplir la demanda energética. Las fuentes de energía pueden tener diferentes orígenes, lo cual resulta deseable a la hora de garantizar suministro en caso de presentarse imprevistos. La equidad o igualdad energética se obtendría cuando toda la población tuviera acceso a la energía y fuera capaz de pagarla. La sostenibilidad energética se obtiene cuando la energía proviene de fuentes bajas en carbón y fuentes renovables, y se logra una eficiencia energética tanto de lado de la oferta como de la demanda.

En 2014, cerca del 15% de la población mundial carecía de acceso a electricidad (World Bank) ^[3], de los cuales aproximadamente el 85% vivía en zonas rurales, este tipo de comunidades podría verse beneficiada con configuraciones de tecnologías de energía renovable tales como fotovoltaica, hidroeléctrica y bioenergía; las cuales resultarían con el paso del tiempo en un ahorro con respecto a generación con combustibles fósiles, además de representar independencia de proveedores externos y una opción amigable con el entorno; una muy buena alternativa para el trilema energético en comunidades donde la demanda de energía no es tan alta como en las grandes urbes.

Entre los estudios a futuro existen múltiples escenarios. El Consejo Mundial de la Energía, en su proyección para 2050^[1] habla de dos escenarios: Jazz y Sinfonía. El primero enfocado en la equidad energética, motivado por el mercado, descentralizado y adaptable a los cambios. En el segundo el acceso a la energía es un programa gubernamental, de mitigación orquestada con la

confianza puesta en un liderazgo y la cooperación el cual alcanza la sostenibilidad a través de políticas y prácticas internacionalmente coordinadas. Mas adelante, Christoph Frei hablaría en una presentación titulada “Gran transición, revolución digital y nuevas realidades energéticas” (Frei, 2018) sobre un tercer escenario, “Hard Rock”, en el que son consideradas políticas fragmentadas de contenido local, con soluciones particulares para las localidades para las cuales fueron concedidas.

Para propósitos de esta tesis los escenarios son considerados desde el punto de vista ambiental.

3.1.1 El bueno.

En el escenario más deseable la energía sería para todos, sería limpia, sería sostenible. Esto implicaría que las fuentes fósiles ya no ocuparían un lugar importante en la mezcla energética, o no ocuparían un lugar en lo absoluto. Nuestra energía sería básicamente electricidad, y en menor medida calor y biocombustibles. Considerando que se trata de un escenario ideal, el índice de desarrollo humano de toda la población sería igual o mayor a 0.8, estaríamos hablando (según la figura 3.4) de un consumo de al menos 100,000 MJ per cápita al año, en 2014 el consumo de energía per cápita a nivel mundial fue de 80,365 MJ ^[4]. Si pudiéramos alcanzar tan alto índice en el desarrollo humano, sería lógico pensar que el crecimiento poblacional podría verse reducido substancialmente. Con una población mundial en el 2050 de 9.7 miles de millones de personas, se requeriría de 970,000,000 TJ anuales o lo que es lo mismo: 269,444 TWh. Si tan sólo buscáramos un índice de desarrollo humano alto, éste sería de al menos 0.7 para el cual correspondería la mitad de la energía antes mencionada, 50,000 MJ. La sumatoria del potencial técnico “bajo” de las energías renovables es de cerca de 895,000 TWh; aun cuando tal magnitud es factible, esto implicaría que, entre otras cosas, el transporte tuviera que dejar de usar combustibles fósiles, incluyendo trenes, barcos y aviones. El transporte marítimo canaliza más del 80% en volumen del comercio mundial, en gran parte por su accesible costo, y contribuye con 4.1% de las emisiones de CO₂, contra el 73% del transporte en carretera, 12% del aéreo y 2% del ferrocarril ^[5]. Hoy, las aspiraciones ecológicas del transporte marítimo son su transformación a gas natural.

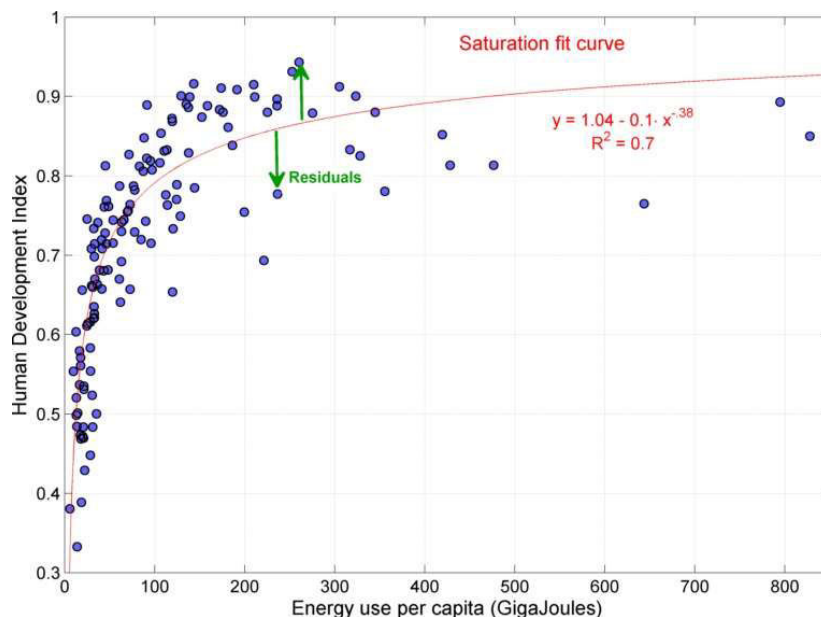


Figura 3.4 Índice de desarrollo humano contra consumo anual de energía primaria per cápita. (Steinberger, 2016)

En un escenario como éste se requiere de especial cuidado en el uso de los materiales raros necesarios para las energías renovables, desde su extracción y de ser posible en su reutilización. Se utilizan más de 60 elementos metálicos en la producción de energía. La Universidad de Ausburg, en Alemania, junto con BP realizaron un estudio (Zepf, 2014) sobre 23 elementos de la tabla periódica utilizados en la producción de energía cuya cuantía en la corteza terrestre es considerada como baja y cuya disponibilidad está restringida a un reducido número de países, algunos otros fueron excluidos por situaciones particulares; con el fin de demostrar la vulnerabilidad de la producción en el sector energético. (Ver Anexo 3.1) De la óptima utilización de este tipo de materiales, y hasta que no exista otra alternativa, dependerá en buena medida el futuro de cada tecnología, en especial cuando se trata de las energías renovables.

Viendo más allá del aspecto netamente energético, el escenario resultaría utópico cuando se piensa que más del 10% de la población mundial se encuentra en pobreza extrema, sin embargo, eliminar este porcentaje es el primero de los ocho Objetivos de Desarrollo del Milenio de la Organización de las Naciones Unidas, garantizar la sostenibilidad del medio ambiente es el séptimo y el octavo habla de fomentar una alianza mundial para el desarrollo. Entre 1990, año en el que se publicó el primer Informe sobre Desarrollo Humano y 2015, la población mundial aumentó 200,000 millones

de personas, alcanzando los 7,300 millones, pero también fue posible que 1,000 millones de personas salieran de la pobreza extrema, 2,100 millones tuvieran mejor saneamiento y 2,600 millones obtuvieran acceso a una mejor fuente de agua potable. Es posible llevar a la población que está por debajo del 0.7 a subir a este nivel, pero se requerirá más que recursos económicos y energía, habrá que trabajar en educación, salud, equidad.

3.1.1 El malo, el escenario más factible.

Los esfuerzos continuarán indudablemente, más cumbres se llevarán a cabo y estarán llenas de líderes mundiales con buenas intenciones. Más compromisos serán adquiridos y diversos países procurarán hacer su parte para reducir las emisiones contaminantes en sus territorios, sin embargo, los cambios ocurrirán siempre bajo la sombra económica de las fuentes fósiles que impedirá que se piense primero en el ambiente que en las ganancias monetarias. Los vehículos eléctricos comenzarán a reemplazar los impulsados por combustibles fósiles. Una pequeña parte del transporte marítimo será impulsado por gas natural. Las energías renovables tomarán un lugar importante, sin embargo, no lograrán reemplazar a los combustibles fósiles, el gas natural será de entre las fósiles, la energía que mayor porcentaje ocupe de las energías no renovables, la fractura hidráulica tomará mayor fuerza y será desarrollada en zonas donde su regulación aún lo permita. Para 2050 los combustibles fósiles ocuparán entre 59 y 77% de la mezcla energética ^[1, p.17]. El uso de fuentes fósiles mermará cuando los efectos del cambio climático comiencen a ser más costosos que invertir en fuentes renovables. Dos tercios de la población mundial vivirá en grandes urbes y dado que es ahí donde se genera la mayor cantidad de dióxido de carbono ^[6 p.25] las consecuencias se verán reflejadas en el calentamiento global.

3.1.2 El feo, “business as usual”

El peor de los escenarios sería continuar haciendo energía, produciendo y consumiendo como lo hemos hecho hasta ahora, sin grandes reparos en el daño a la naturaleza y con la mira hacia una mayor ganancia económica, ciegos ante las desigualdades y el posible futuro. Sería un escenario en el que la población seguirá creciendo a pasos agigantados al igual que la desigualdad social. Las fuentes fósiles seguirán representando más del 75% de las fuentes primarias de energía, más

recursos serán destinados para buscar la mejor manera de extraer el petróleo de yacimientos que hasta ahora no habían sido costeables, como los de aguas profundas o de esquisto. La extracción por fractura hidráulica o *fracking* empezará a tomar más fuerza, pocos países mantendrán regulaciones o bloqueos, limitando aún más la disponibilidad de agua para consumo humano, animal o de riego. El carbón seguirá siendo encontrado en abundantes cantidades y será la principal fuente de energía, para países desarrollados significará una entrada de divisas al exportarlo. Durante varias décadas los combustibles fósiles seguirán siendo la opción más económica para producir energía. Las emisiones contaminantes seguirán elevando los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera y de seguir haciéndolo a la misma velocidad que hasta ahora, se espera que puedan alcanzar 500 ppm en 50 años, lo que podría llevarnos a una elevación de temperatura de más de 3°C, un nivel que los científicos pronostican causaría cambios meteorológicos extremos y un aumento en el nivel del mar tal que pondría en riesgo los suministros alimenticios a nivel mundial, provocaría migraciones masivas e incluso podría destruir la selva del Amazonas debido a sequías e incendios (Jones, 2017). De continuar elevándose el resultado podría ser la sexta extinción masiva en la historia del planeta, que al igual que las primeras cinco, se presenta ante un cambio drástico en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera y se esperaría para el 2100 (Nace, 2017), al mismo tiempo en que se acabaría el petróleo según nuestro escenario “bajo” de uso de combustibles fósiles. Sería una ironía que la extinción humana se diera antes que la del petróleo, tantas preocupaciones, tantos estudios, tantas guerras para que el ser humano acabe cayendo dentro del mismo hoyo que él cavó.

3.2 Barreras y puentes para la transición energética hacia energías limpias

3.2.1 Barreras

- Resistencia política de los titulares de empresas relacionadas con el petróleo. Resulta muy complicado el establecimiento de nuevas políticas cuando las empresas que basan sus ganancias a través del petróleo se resisten fehacientemente al cambio. Para el 2014, tan sólo noventa compañías eran responsables de dos tercios de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial, entre las que se incluían Chevron, ExxonMobil, BP, Shell, ConocoPhillips y Peabody Energy. (Downie, 2017)

- El riesgo geopolítico que conlleva la energía al no estar distribuida equitativamente en el planeta y al ser de gran importancia económica para el desarrollo de las naciones, lo cual ha provocado conflictos, competencia y en pocos casos, colaboración. No todas las naciones se han visto beneficiadas de igual manera, ni siquiera aquellas que cuentan con el recurso. Los conflictos se han heredado por generaciones complicando futuras colaboraciones.
- Los costos. Las tecnologías limpias pueden ser complejas y costosas, además de requerir tecnología avanzada tanto para su manufactura como para su instalación y en el caso de la energía nuclear para sus sistemas de prevención de accidentes.
- La intermitencia en su producción, presente principalmente en la eólica y la solar, representa un reto tanto para la red eléctrica como para el constante abasto final, además de que el suministro de las fuentes renovables se da como corriente directa, cuando en la mayor parte de las redes se maneja la corriente alterna, lo que implicaría que se tendrán que hacer reformas y por ende inversiones para modificar la red eléctrica.
- Almacenamiento. Muy ligado a la intermitencia se encuentra el almacenamiento, si fuese posible almacenar la energía generada mientras se encuentra en abundancia, sería posible utilizarla en situaciones de escasez. De momento las tecnologías de almacenamiento son costosas y poco eficientes.
- De existir una migración de los automóviles a gasolina o Diésel hacia la versión eléctrica, y manteniendo el crecimiento que los vehículos han tenido a través de los años, el pronóstico indica que la red eléctrica tendría que crecer de manera sustancial para poder cubrir la demanda. Para 2040 se pronostica que se duplicará el número de vehículos que existían en 2016, así mismo se duplicará el kilometraje de viajes realizados en avión (Smith, 2016).
- La utilización de elementos químicos que pueden ser escasos y/o tóxicos al ambiente. La obtención y desecho representa un reto tanto para quienes lo manufacturan como para los consumidores. (Ver figura 3.5) El uso indiscriminado podría provocar una escasez y hacer su precio tan alto que se vuelvan incosteables.

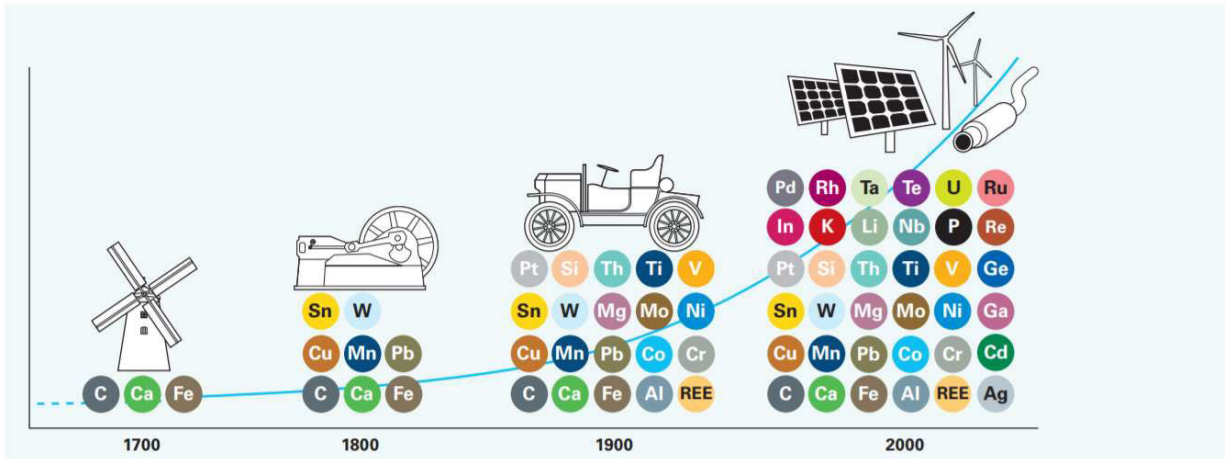


Figura 3.5 Elementos ampliamente utilizados en canales energéticos. (Zepf, 2014 p.6)

- La afectación al ambiente por la instalación de complejos de energía renovables, además de los riesgos a la sociedad no sólo durante la producción de la energía sino en toda la cadena de suministro.
- El uso o contaminación de agua para los sistemas. (Ver figura 3.6)
- El cambio del uso de suelo y posible degradación de la tierra.
- Interferencia con culturas, sitios patrimoniales, impactos a la biodiversidad y a los ecosistemas, a la estética del paisaje, han dado lugar a descontentos que generan precedentes para la instalación de otros complejos. Se requiere de la aceptación de la sociedad si se pretende seguir adelante con la transición energética.
- Resistencia a nuevos proyectos. Comúnmente se argumenta que las energías renovables son capaces de beneficiar a las comunidades al reducir la pobreza a través de oportunidades de trabajo, de desarrollo de competencias, inversión en infraestructura y la transferencia de tecnología, sin embargo, cuando las comunidades no perciben estos beneficios o la distribución de estos es vista como inequitativa, es común que se presente una resistencia a nuevos proyectos.
- Limitaciones técnicas, comúnmente encontradas en países en desarrollo, además de limitaciones en habilidades empresariales y una ausencia de soporte técnico para los sistemas. Falta de mano de obra calificada.

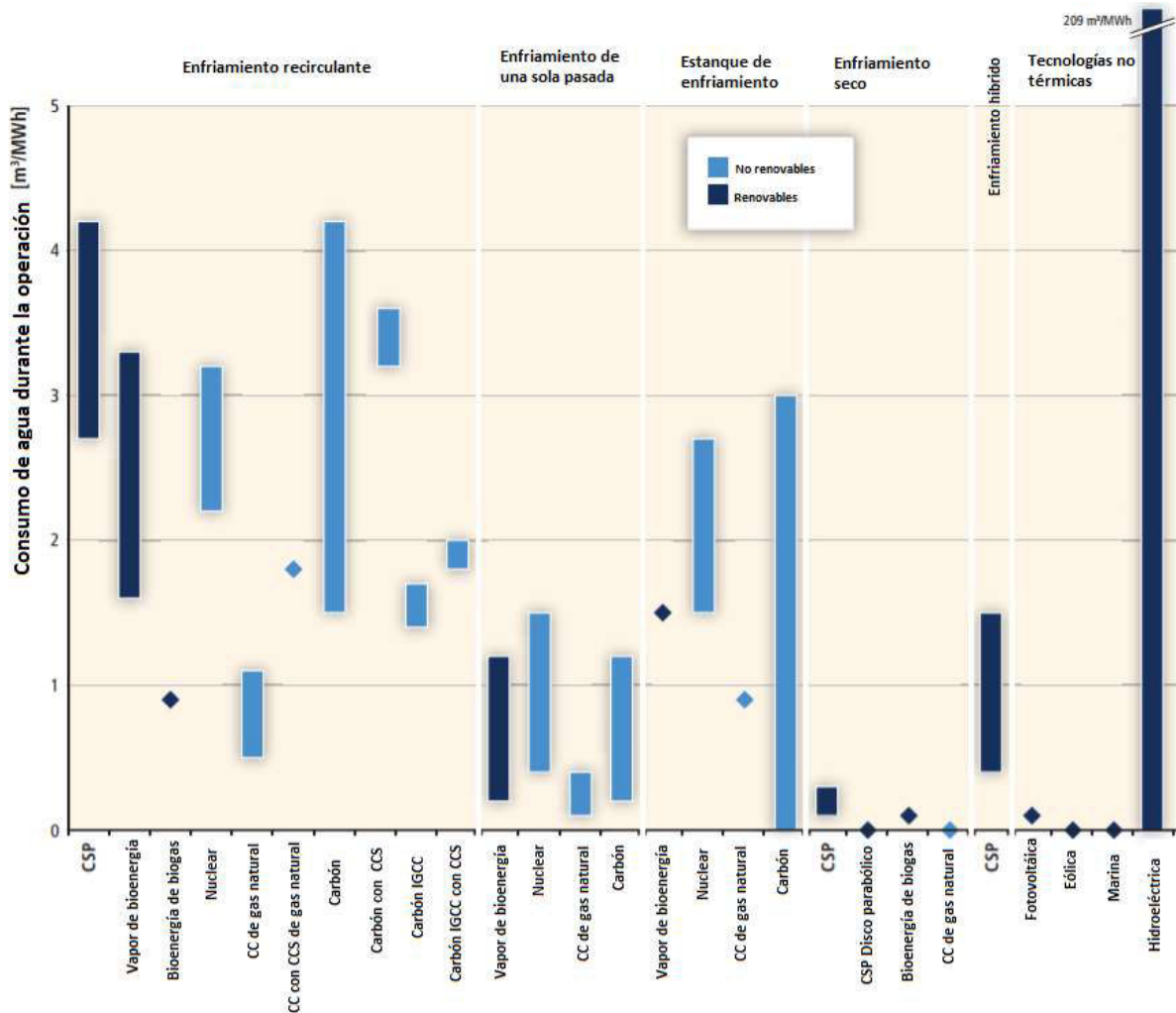


Figura 3.6 Uso de agua en diferentes tipos de generación de energía. IPCC [2]

Donde CSP: Generación por concentración de energía solar, CC: Ciclo combinado, CCS: Captura y almacenamiento de carbón

- La ignorancia. Es necesario convencernos de que nuestros hábitos, sobre todo los de muchos con IDHs superiores a 0.7, están acabando con nuestro entorno, que el momento de actuar es ahora y que, aun así, existe el riesgo de que el daño sea ya irreversible.

- La falta de información y concientización sobre las energías renovables disponibles es un determinante clave para la adopción y creación de mercados. Pasar por alto las preocupaciones relacionadas con la percepción de unidades descentralizadas comúnmente puede llevar al abandono de sistemas o que operen de manera disfuncional.

- La obsolescencia de regulaciones. Muchas regulaciones siguen obedeciendo a mercados monopólicos, impidiendo así la entrada a nuevos productores.
- Una puesta en marcha exitosa. En múltiples ocasiones lo que en teoría es posible, en la práctica acaba encontrando muchas dificultades.
- De toda la energía utilizada en el planeta, 31% corresponde a transporte (Letcher, 2013 p.5), en México es el 46.8% (SENER). Y aunque cada vez son más las compañías automotrices y de transporte que empiezan a ofrecer alternativas eléctricas o híbridas, no existe una alternativa real a los combustibles fósiles para el caso del transporte de carga pesada, por lo que se considera que ese rubro seguirá haciendo uso de este tipo de fuente más allá del 2050 ^[1, p.20].
- No existe una manera eficiente de tasar el costo de la contaminación ambiental, lo cual mantiene la brecha entre los precios de las energías fósiles y las renovables.
- Las renovables tienen un comportamiento más parecido a un flujo, a diferencia de las fósiles que funcionan más como un paquete haciendo su comercialización y uso más simple e inmediato.
- No existe una fórmula a seguir que satisfaga las necesidades de todos los individuos y naciones del planeta. Cada solución tendrá que darse de manera individual, atendiendo a los recursos disponibles para cada caso.
- La desigualdad. Con más del 10% de la población mundial en pobreza extrema se ve aún difícil que se pudiera reducir el consumo energético, se requiere de mucha energía para lograr desarrollar a la población que aún no logra una situación de vida digna.
- Para economías en desarrollo, la energía más utilizada será aquella de mayor disponibilidad y que les implique un menor costo; el carbón seguirá en el 2050 jugando un papel importante en el consumo energético de India y China ^[1, p.20].
- Se requiere capacitación para operar y dar mantenimiento a las nuevas tecnologías.
- La salida de Estados Unidos del Acuerdo de París, uno de los países más contaminantes y con un mayor consumo energético dificulta en gran medida el poder alcanzar los objetivos hacia una reducción en las emisiones y una transición hacia energías más limpias.

3.2.2 Puentes

- El costo de la energía renovable hacía muy difícil que compitiera con su contraparte fósil, sin embargo, los costos empiezan a menguar considerablemente y se empieza a ver que la contaminación del ambiente constituye un daño colateral costoso que durante mucho tiempo no fue tomado en cuenta. Eventualmente las renovables tenderán a convertirse en una opción aún más viable que los combustibles fósiles, ya sea por incentivos gubernamentales otorgados, o por penalizaciones en el uso de las no renovables.
- Es posible generar a través de algún tipo de energía renovable en cualquier parte del planeta. Las energías renovables están mejor distribuidas en el mundo de lo que están los combustibles fósiles, la predilección de una fuente de energía sobre la otra dependerá en gran medida de los recursos de cada localidad.
- Las tecnologías renovables que no se basan en combustión, tienen el potencial de reducir significativamente la contaminación del aire tanto local como regionalmente, reduciendo impactos a la salud asociados a la quema de combustibles, además de evitar la deforestación y la degradación de los bosques.
- Tecnologías como la fotovoltaica y eólica requieren muy poca agua comparadas con las plantas de conversión térmica que operan con carbón, gas, nuclear e incluso las de concentración solar, lo que las hace aún más atractivas desde el punto de vista ambiental.
- Después de todo puede que, más de un siglo después, la disputa entre Edison y Tesla vuelva a estar sobre la mesa, y quizás esta vez la ganadora sea la corriente directa. La electrificación ha estado basada en una economía de escala, generando electricidad para usuarios cercanos y lejanos a través de una red de transmisión y distribución, sin embargo, hoy en día, muchos desarrollos están complicando ese sencillo modelo. Una de las ventajas que daba el uso de corriente alterna era que se tenían menos pérdidas en el momento de la transmisión y distribución, ahora con la generación distribuida de fuentes renovables (generación eléctrica en el punto de consumo) se eliminan costos y complejidades asociados con la transmisión y distribución. La generación de electricidad tenderá a descentralizarse, fuentes renovables como la solar y la eólica podrían proliferar, los usuarios tendrán la capacidad de generar su propia energía.

- Fuentes de trabajo, en varios escenarios se habla de que existen más fuentes de trabajo en las energías renovables que en la industria petrolera, por lo que además de significar un mundo más limpio también obtendríamos más empleos para su población. Michael Terrell, Jefe de Desarrollo del Mercado de Energía en Google, afirma que en energía solar y eólica existen tres veces más empleos de los que hay en la industria del carbón. (Terrell, 2017).
- Los tratados internacionales. En el Acuerdo de París de 2015, se reconoce que el cambio climático representa una amenaza apremiante y potencialmente irreversible para el planeta, que requiere la cooperación en conjunto de todos los países para lograr una respuesta internacional, efectiva y adecuada.
- Existen zonas marginadas con un alto potencial de energías renovables, como el África subsahariana. De lograr desarrollar el recurso no sólo serían capaces de solventar sus necesidades energéticas, podrían incluso exportar sus excedentes y generar ingresos.

3.3 Los principales actores en la transición energética

El Consejo Mundial para la Energía plantea dos escenarios a futuro, lo que presenta dos grupos de actores principales para la transición energética (Ver tabla 3.1). El escenario “Jazz” está enfocado en el crecimiento económico para obtener energía accesible para los individuos, las fuentes de energía compiten según su precio y disponibilidad. El escenario “Sinfonía” se enfoca en obtener sostenibilidad ambiental a través de políticas y prácticas coordinadas internacionalmente, las fuentes de energía seleccionadas son subsidiadas e incentivadas por los gobiernos. En el escenario Jazz los principales actores serían las empresas multinacionales, bancos, inversionistas de riesgo y los consumidores preocupados por los precios, mientras que el escenario “Sinfonía” los principales actores son los gobiernos, el sector público y las empresas privadas, las organizaciones no gubernamentales (ONGs), y los votantes preocupados por el ambiente. Los escenarios no constituyen predicciones, el futuro bien podría situarse en un intermedio de ambos.

Jazz	Sinfonía
Compañías multinacionales con cadenas de distribución en expansión.	Los gobiernos de cada país actúan como los principales planificadores
Bancos e inversionistas de riesgo que provean el financiamiento	Organizaciones no gubernamentales (ONGs) e instituciones internacionales.
Empresarios que se desarrollan en ambientes competitivos	Compañías del sector público y privado.
Consumidores enfocados en los precios que desean energía asequible, que no consideran al cambio climático un problema hasta que hayan alcanzado un mínimo nivel de crecimiento económico.	Electores con conciencia ecológica cuyas decisiones terminan por dar forma a las políticas y quienes dan mayor importancia a los problemas ambientales locales o más cercanos que al cambio climático, especialmente en los contextos de países en desarrollo.
El gobierno impulsa el crecimiento económico a través del uso de las mejores fuentes de energía disponibles.	El gobierno da prioridad a la sostenibilidad ambiental, lo que fomenta que se tomen medidas y mecanismos para fomentar la inversión en energías renovables, reducción de CO ₂ , impuestos al carbón, etc.

Tabla 3.1 Principales actores en los escenarios del Consejo Mundial de Energía. Elaboración propia con datos del Consejo Mundial de Energía ^[1]

Los gobiernos son comúnmente responsables de definir estrategias, implementar políticas y regulaciones, y desarrollar y mantener estructuras de administración y servicios a los habitantes y negocios. Son capaces de guiar el cambio entre su población, negocios y la industria, al mismo tiempo que lo hacen en sus operaciones (Van Staden, 2017). Las acciones del gobierno deben estar encaminadas en buscar tener una sostenibilidad energética y cómo financiarla mientras se mantiene y se desarrolla aún más una buena calidad de vida entre la población. De acuerdo con Fischer y Newell, una transición energética no es posible a menos que el gobierno intervenga imponiendo restricciones obligatorias en las emisiones de carbono, ya sea a través de regulaciones directas o mediante regulación de precios. (Fischer y Newell 2008; Unruh 2002 citados en Aklín y Urpelainen 2013).

Se requiere de inversionistas, ya sean bancos o individuos que financien las nuevas energías.

Ciudadanos, empresas e industria deben estar dispuestos a cambiar hábitos de consumo y a adoptar los cambios que se den con las energías renovables.

Organizaciones no gubernamentales sin fines de lucro (ONGs), son las encargadas de llevar las preocupaciones de la ciudadanía a instancias gubernamentales, defender y promover políticas relacionadas con el fomento de energías renovables y la sanción a la contaminación ambiental. Ofreciendo información para incentivar la participación política a través de su competencia y análisis. Pueden fungir como mecanismos de alerta temprana, monitorear la implementación de los acuerdos internacionales y fomento a la investigación y desarrollo.

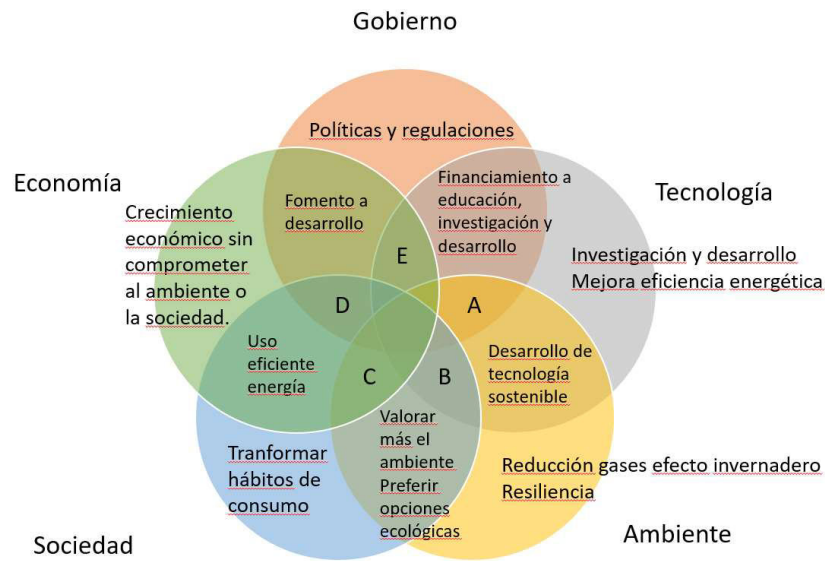
El papel del gobierno de cada localidad empieza a transformarse de “control y contención” hacia la “facilitación y soporte”, mientras que el de los residentes va de recibir servicios y ser poseedores de derechos, a hacerse más activos en su entorno ambiental y ser sujetos a obligaciones (Wittmayer, 2017).

La comunidad científica y expertos en otras disciplinas que estudian los impactos del uso de las energías no renovables, poseen conocimientos que ayudan a la toma de decisiones que nos lleven a un futuro sostenible. (Van Staden, 2017)

Los líderes empresariales tienen mucho poder sobre lo que puede suceder, el caso de Estados Unidos es significativo a este respecto. El gobierno ha decidido no apoyar los esfuerzos en cambio climático, sin embargo, existe una considerable fuerza de opinión en contra de esa postura que incluye ciudadanos, científicos y líderes empresariales que pueden continuar con los esfuerzos en contra del cambio climático, y si bien el no contar con el apoyo del gobierno hace las cosas un tanto más complicadas, no resultan imposibles.

Un gobierno que no sea capaz de tomar las mejores decisiones energéticas con visión a futuro junto con consumidores enfocados en energías de bajo costo inmediato y preocupados únicamente en sus intereses, incrementarán la pobreza energética y los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera.

A continuación, en la figura 3.7, una relación de sectores y su importancia como actores en la transición energética:



Donde:

- A. Gobierno y Ambiente: Fomento a energía limpia, penalización a contaminación
- B. Tecnología y Sociedad: Eficiencia energética.
- C. Ambiente y Economía: Dar valor económico a la contaminación ambiental.
- D. Gobierno y Sociedad: Seguridad energética. Desarrollo humano.
- E. Economía y Tecnología: Energía asequible

Figura 3.6 Acciones necesarias de los diferentes actores. Imagen de autoría propia.

Un futuro bajo en emisiones de carbono a la atmósfera no depende únicamente de fuentes de energía renovables, los hábitos del consumidor requieren también ser modificados.

3.4 El caso de México

“El Sistema energético mexicano está basado en combustibles fósiles, que proveen 92% de la energía primaria (65% de petróleo, 24% de gas natural y 2% de carbón). México posee el lugar 14 en términos absolutos de entre los países emisores de gases de efecto invernadero”. (García C., 2015)

En México existe una situación privilegiada en cuanto a recursos naturales y en el caso de los energéticos queda comprobada: combustibles fósiles, hidráulica, eólica, geotérmica, solar, biomasa, incluso es posible encontrar uranio en territorio nacional. De lo que ha carecido es de una gobernanza que le permitiera mejorar la situación de su pueblo, y no sólo de algunos cuantos. A pesar de haber empezado a hacer uso de los recursos renovables desde principios del siglo

pasado, el auge del petróleo no permitió el desarrollo de las opciones no fósiles. El petróleo cubría necesidades energéticas al mismo tiempo que generaba divisas para el país, convirtiéndose así en un energético favorecido.

La región más transparente de la que hablaban Alexander Von Humboldt en 1804, Alfonso Reyes en 1917 e incluso Carlos Fuentes en su novela homónima publicada en 1958, perdió el título hace ya varios años y lejos se vislumbra el día en que pudiera recuperarlo. A pesar de que la producción petrolera parece haber dejado sus días más productivos en el pasado, sigue siendo una significativa fuente de ingresos nacionales. Con la Reforma Energética se dio entrada a la inversión extranjera para la extracción del petróleo nacional, actividad que durante muchos años fue exclusiva del estado. Con esto se propone elevar de nueva cuenta la producción. Con el auge de la fractura hidráulica de nuestro vecino del norte, ocupando México el cuarto lugar en tamaño de depósitos de gas de esquisto en el mundo y dado que el gas natural representa el segundo insumo más importante de energía primaria nacional, 23.1%^[8], tan sólo superado por el petróleo, las posibilidades de que la fractura hidráulica cobre fuerza en nuestro país no son remotas.

Pese a su compromiso internacional de combate al cambio climático, México mira lejos la posibilidad de ver un futuro energético protagonizado por energías renovables, sin embargo, sí se pretende aumentar la proporción de energías renovables en la mezcla energética. La meta del gobierno federal es alcanzar una capacidad instalada con tecnologías limpias del 35% para el año 2024^[7], estimando que para el 2025 se incrementen 18,716 MW a la ya existente, liderada por una mayor participación de los sectores eólico con 60.3% e hidráulico con 24.3% (Ortega, M). Para alcanzar la meta de renovables, el gobierno federal tiene comprometidos 160 millones de dólares para el desarrollo de proyectos e innovación.

La generación hidroeléctrica ocupa el primer lugar en la generación nacional de energía por energía renovable, produciendo el 64.05% de entre las renovables, 4.53% corresponde a pequeña hidroeléctrica (≤ 30 MW)^[8]. Debido a la disminución de las aportaciones pluviales y a la reducción en el uso de agua para la generación de electricidad en las centrales públicas a cargo de la CFE, la generación de hidroenergía disminuyó 0.6%, respecto a 2015, alcanzando un total de 110.51 petajoules.”^[8] Se estima que existe un potencial de 53,000 MW. Para el periodo 2016-2030, la Secretaría de Energía planea adicionar 4,491.8 MW de capacidad de energía hidroeléctrica, de los cuales 653 MW están en proceso de construcción, 3,597.8 MW son proyectos autorizados, nuevos

o con permisos en trámite y 241 MW son proyectos por licitar. De esta manera se pretende que de 12,551.1 MW se crezca a 16,975.8 MW para 2030. En el mismo periodo, la participación de generación de electricidad se verá incrementada de 15,748.4 GWh a 49,902 GWh ^[7].

El potencial eólico dentro de la República Mexicana es elevado, se calcula mayor de 50,000MW según PricewaterCoopers ^[9] o de hasta más de 500,000 MW en el escenario del Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias de la SENER ^[10]. Con esta tecnología se espera no sólo ayudar a cumplir la meta de participación de energías limpias al 2024 y tener un beneficio ambiental al reducir emisiones de CO₂, se puede obtener también un beneficio económico al poder generar energía con recursos locales sin depender de un recurso de importación, un beneficio económico también para las comunidades en donde se instalen los aerogeneradores por el uso de sus tierras y además se puede obtener un beneficio social al poder instalar aerogeneradores en comunidades remotas que no estén conectadas a la red eléctrica. Se pronostica que en el período de 2016 a 2030, se instalen cerca de 12,000.0 MW de nueva capacidad, de la cual el 53.0% se encuentra en fase de construcción o por iniciar obras. Para 2030 se cree que casi el 52% de la capacidad total instalada provendrá de Pequeños Productores del sector privado, se espera para entonces contar con 15,101.1 MW de capacidad instalada y con una generación de electricidad de 47,365.6 GWh^[7].

La geotermia ocupa el tercer lugar en la generación nacional de energía, produciendo 13.21% de entre las renovables ^[8]. El 9 de mayo de 2016 fue inaugurado el Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo) en la ciudad de Ensenada Baja California, se trata de una alianza académica-industrial con el apoyo de la Secretaría de Energía de México (SENER) y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) que busca promover y acelerar el uso y el desarrollo de la energía geotérmica en nuestro país. En septiembre de 2017, se llevó a cabo en la Ciudad de México un Simposio Internacional de la Energía durante el cual se dio el taller “Aplicaciones Directas de la Geotermia: Recurso Eficiente, Versátil y de Bajo Costo” con expertos de Islandia, Nueva Zelanda, Francia, España y México. “El taller demostró que los usos directos de la geotermia son económicamente factibles y que existe mucho camino por recorrer en México.” (Boletín Energías Limpias)^[11]. “Se espera incrementar 894.4 MW de capacidad al 2030. 158.0 MW se encuentran en fase de construcción o por iniciar obras. A la fecha, existen permisos de generación, otorgados por la CRE (autorizados, nuevos, en trámite), por 681.4 MW” ^[7]. La energía

geotérmica a diferencia de la eólica y la hidroeléctrica, ha mostrado una disminución tanto en su capacidad instalada como en su generación a principios de la segunda década del presente siglo, a pesar de que en algún momento México ocupaba los primeros lugares en generación geotérmica a nivel mundial. Después de mucho indagar la razón de esta disminución, la conclusión parece ser que no tuvo el impulso para seguir adelante, se espera que esta situación se revierta y empiece a jugar un papel cada vez más importante en la mezcla energética.

La energía fotovoltaica se ha visto beneficiada en los últimos años por una disminución en el costo de la tecnología, lo que podría convertirla en una mejor competidora más adelante. “El país posee una radiación superior a 4.5 kWh/m² día en más del 70% de su territorio.” (García, G. 2017) Se pretende que la capacidad instalada crezca hasta llegar a 6,890.9 MW y la generación aumente a 12,697.1 GWh en 2030. La energía solar térmica presenta un uso limitado aún, se encuentra mayormente utilizada en el sector residencial, en calentadores de agua.

La bioenergía ocupa el cuarto lugar en la generación nacional de energía por energía renovable, produciendo 3.17%. En la actualidad se estima que 28 millones de mexicanos siguen dependiendo de la leña como principal energético en sus viviendas, además de seguir siendo utilizada en pequeñas industrias como tabiquerías, alfareros, panaderías. El consumo es aproximadamente de 18 millones de toneladas de leña seca, mayoritariamente en zonas indígenas. Constituye además un elemento importante en la derrama económica “el mercado actual de este combustible asciende a los 12,500 Mdp/a y genera 104 millones de jornales anuales, lo que representa 417 mil empleos”^[12, p.8]. México posee 70 centrales de generación eléctrica por bioenergía. La biomasa de mayor uso es el bagazo de caña, se cuenta con una capacidad (al cierre de 2015) de 599.1 MW y generación de 1,187.3 GWh. La capacidad instalada para generación de energía eléctrica por biogás es de 80.8 MW y producción de electricidad de 203.5 GWh. La Secretaría de Energía (SENER), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Agencia de Cooperación Alemana para el Desarrollo (GIZ), estiman que existe en México un potencial de 3.1 millones de toneladas anuales de residuos sólidos urbanos para utilizarse en el coprocesamiento cementero en México, que podría reemplazar el 30% de la energía térmica generada con coque de petróleo y carbón del sector.

Existe un gran potencial de recursos biomásicos para producir biocombustibles líquidos, biocombustibles sólidos y biogás. En un estudio (Johnson, 2009) se estimó que el potencial técnico de la bioenergía equivale a 3,569 PJ/a, o el 42% del consumo de energía primaria en 2008.

Todavía existen muchas oportunidades de aplicación del biogás, el manejo de residuos orgánicos y el tratamiento de aguas residuales generan egresos, su utilización podría representar un ahorro si se emplearan en generación de energía. En la Ciudad de México comenzó a haber campañas de separación de la basura, son muchas las colonias en que ésta es ya una práctica común que a la larga podría convertirse en la manera de capturar esta fuente de biogás.

En su “Prospectiva de Energías Renovables 2016-2030”, la SENER plantea cuatro posibles escenarios futuros:

Energía	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4	
	Capacidad Instalable (MW)	Potencial de Generación (GWh/a)	Capacidad Instalable (MW)	Potencial de Generación (GWh/a)	Capacidad Instalable (MW)	Potencial de Generación (GWh/a)	Capacidad Instalable (MW)	Potencial de Generación (GWh/a)
Eólica	583,200.0	1,486,713.0	290,249.0	740,332.0	158,302.0	402,847.0	297,444.0	750,186.0
Solar fijo	965,373.0	1,716,274.0	537,134.0	957,726.0	127,722.0	228,485.0	395,664.0	701,229.0
Solar Seguimiento	691,925.0	1,692,453.0	379,007.0	925,270.0	89,667.0	218,658.0	287,455.0	694,568.0
Geotérmica	174.0	1,373.0	399.0	3,146.0	571.0	4,509.0	125.0	986.0
Biomasa	1,097.0	7,694.0	1,231.0	8,631.0	1,478.0	10,365.0	-	-
Total	2,471,769.0	4,904,507.0	1,208,020.0	2,635,105.0	377,740.0	864,864.0	980,688.0	2,146,969.0

Fuente: SENER.

Donde:

Escenario 1 identifica zonas de alto potencial para el desarrollo de proyectos de generación eléctrica con energías limpias sin considerar la cercanía a las redes generales de transmisión.

Escenario 2 identifica zonas de alto potencial para el desarrollo de proyectos de generación eléctrica tomando en consideración una cercanía a las redes generales de transmisión menor o igual a 20 Km.

Escenario 3 identifica zonas de alto potencial para el desarrollo de proyectos de generación eléctrica tomando en consideración la cercanía con las redes generales de transmisión, con una distancia menor o igual a 10 km.

Escenario 4 identifica zonas de alto potencial para el desarrollo de proyectos de generación eléctrica lejanos a las redes generales de transmisión, más de 20 km.

Tabla 4. Escenarios de potenciales de capacidad y generación para las energías renovables (MW, GWh)

En la Estrategia Nacional de Energía 2014-2028, se espera que a través de la Reforma Energética se logre: acelerar el proceso de inversión, una mayor diversificación de proyectos, la eliminación de los cuellos de botella y la mejora de la eficiencia, la promoción de la inclusión social y el fortalecimiento institucional. Se espera mejorar el aprovechamiento de la energía mediante el apoyo a la investigación y desarrollo tecnológicos nacionales.

En México, uno de los ejemplos de barreras para el empleo de energías renovables por obsolescencia de políticas, se dio con la bioenergía. En 2004 inició operaciones la primera planta de biodiésel en México en el municipio de Cadereyta, Nuevo León. Se utilizaban grasas animales y aceites reciclados. Contaba con capacidad de 1.5 millones de litros mensuales y su producto era usado por PEMEX refinación como aditivo para lubricidad del Diésel de ultrabajo azufre, sin embargo, PEMEX decidió dejar de utilizar el biodiésel como lubricante y dado que PEMEX era la única empresa facultada para comercializar combustibles en territorio mexicano, la planta tuvo que cerrar en 2014.

Otra barrera, en la forma de resistencia de la población se está dando en la zona de La Ventosa, donde la población resentida por las injusticias a las que se han visto sometidos se opone a que se sigan instalando parques eólicos.

Una de las grandes áreas de oportunidad en México está en el involucramiento de los habitantes y en el trato justo cuando se refiere a la expropiación o cambio de uso de tierras. El crecimiento de la energía eólica en el país tuvo un precio en las comunidades en donde fueron instalados los parques. Existen quejas porque no existió una consulta previa, por el ruido, por derrame de aceite de los generadores, historias de despojo de tierras, afectaciones en la actividad económica, generación de conflictos dentro de las comunidades, corrupción, abuso de autoridad e incluso amenazas de muerte a activistas. La energía eólica puede ser el camino de desarrollo de comunidades que históricamente han permanecido marginadas, pero siendo implementada con políticas que consideren sus derechos, su cosmovisión y sus necesidades.

Lo que para unos es una alternativa energética para otros representa un problema de territorio, un peligro para la comunidad, a su modo de vida y sus tradiciones.

3.5 Conclusiones

Indudablemente nos espera un futuro con una mayor demanda de energía, principalmente debida al crecimiento poblacional, por un lado, y por otro al desarrollo humano. Pretender cubrir las necesidades con energía del siglo pasado pronostica que, como civilización, no alcancemos a ver el siglo futuro. La utilización de energías limpias más que una opción es una obligación que tenemos como habitantes de un planeta que ha empezado a alcanzar su punto de resiliencia. Ahora más que nunca requerimos modificar nuestros hábitos y prioridades, al mismo tiempo que aseguramos el aprovisionamiento de energía futuro.

Muchos materiales que eran poco utilizados pueden volverse indispensables en un futuro y si además se trata de elementos raros será mejor que empecemos a usarlos de mejor manera, igual que al resto de nuestros recursos.

Si la fractura se vuelve parte de las principales formas de extracción de fuentes fósiles será necesario encontrar una manera de hacerlo lo más inocuamente posible, aún no tiene precio, pero es altamente probable que en un futuro el agua sea uno de nuestros recursos con mayor valor monetario, su contaminación es completamente inaceptable.

La factibilidad de los distintos escenarios dependerá de las acciones que tomemos ahora, para eso se requiere actuar con un rumbo definido. La transición hacia un futuro sostenible plantea nuevos retos como la adecuada administración de los recursos, la modificación de la infraestructura actual, la cooperación de todos: gobierno, empresas, científicos, ciudadanos. Aunque podría parecer que el gobierno tiene la batuta, las políticas que pudiera implementar no servirían de nada si no fueran acatadas, sin embargo, en el sentido opuesto es posible, aun cuando el gobierno decidiera no impulsar un futuro sostenible, empresas, científicos y sociedad podrían unirse y lograr que sucediera.

Existen mucho más barreras que puentes para lograr una transición energética hacia fuentes renovables, sin embargo, el reto es posible y hay naciones completas que ya empezaron el camino hacia un futuro sostenible. México está encaminado, pero aún lejos de lograr un cambio sustancial en su forma de producir y consumir energía, la gran ventaja es que los recursos existen, el éxito dependerá de plantear y seguir las políticas que lleven incluso a superar las expectativas que se tienen a futuro sobre energías renovables.

Bibliografía

- [1] “World Energy Scenarios, Composing energy futures to 2050” (2013), Consejo Mundial de la Energía (WEC), p. 17, Londres. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/d4Y9f3> [Accesado el 15 de diciembre de 2017].
- [2] “Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation (SRREN)” (2012) IPCC [En línea]. Cambridge, disponible en: <http://www.ipcc.ch/report/srren/> [Accesado el 15 de julio de 2018].
- [3] “State of electricity access report 2017” (2017), International Bank for Reconstruction and Development, The World Bank [En línea]. Disponible en: <http://documents.worldbank.org/curated/en/364571494517675149/full-report> [Accesado 8 de agosto 2018]
- [4] “Energy use (kg of oil equivalent per capita)” (2014), The World Bank. [En línea]. Disponible en: <https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.PCAP.KG.OE?locations=1W> [Accesado el 16 de diciembre de 2017]
- [5] “El transporte Marítimo y el reto del cambio climático” en Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo, Ginebra, septiembre 2008. [En línea]. Disponible en: http://unctad.org/es/Docs/cimem1d2_sp.pdf [Accesado el 16 de diciembre de 2017]
- [6] “Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change” (2014), Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [En línea]. Disponible en: <http://goo.gl/K7XZdh> [Accesado el 12 de enero de 2018]
- [7] “Prospectiva de energías renovables 2016-2030” (2016), Secretaría Nacional de Energía, México. [En línea]. Disponible en: <http://goo.gl/zvjdwz> [Accesado el 6 de enero de 2018]
- [8] “Balance Nacional de Energía 2016” (2017), Secretaría Nacional de Energía, México. [En línea]. Disponible en: <http://goo.gl/FQ5veE> [Accesado el 16 de enero de 2018]
- [9] “El potencial eólico mexicano. Oportunidades y retos en el nuevo sector eléctrico” Asociación Mexicana de Energía Eólica y PricewaterhouseCoopers. [En línea]. Disponible en: <http://www.amdee.org/Publicaciones/AMDEE-PwC-El-potencial-eolico-mexicano.pdf> [Accesado el 8 de agosto 2018]
- [10] “Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias” en Secretaría de Energía [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/sener/articulos/atlas-nacional-de-zonas-con-alto-potencial-de-energias-limpias?idiom=es> [Accesado el 8 de agosto 2018]
- [11] “Grandes expectativas para usos directos de la geotermia en México” (2017) Boletín Energías Limpias, volumen 3 número 28, septiembre 2017, Subsecretaria de Planeación y Transición Energética, Secretaría de Energía. [En línea]. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/263208/Bolet_n_ENERGIAS_LIMPIAS_Veintiocho-final.pdf [Accesado el 8 de agosto 2018]

[12] “La bioenergía en México. Situación actual y perspectivas” (2011), Cuaderno temático No. 4, Edición agosto 2011. Cuadernos temáticos sobre bioenergía. Red Mexicana de Bioenergía, A.C. México. [En línea]. Disponible en: <http://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2014/12/CT4.pdf> [Accesado 10 de agosto 2018]

[13] “Informe sobre el Desarrollo Humano 2016”, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Nueva York. [En línea]. Disponible en: http://hdr.undp.org/sites/default/files/HDR2016_SP_Overview_Web.pdf [Accesado 10 de agosto 2018]

[14] “Grandes expectativas para usos directos de la geotermia en México” (2017) Boletín Energías Limpias, volumen 3 número 28, septiembre 2017, Subsecretaría de Planeación y Transición Energética, Secretaría de Energía. [En línea]. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/263208/Bolet_n_ENERGIAS_LIMPIAS_Veintiocho-final.pdf [Accesado 10 de agosto 2018]

[15] “Electricity production from nuclear sources”, (2014), World Bank. [En línea]. Disponible en: <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.NUCL.ZS> [Accesado 10 de agosto 2018]

Aklin, M. y J. Urpelainen (2013) “Political Competition, Path Dependence, and the Strategy of Sustainable Energy Transitions”, *American Journal of Political Science*, Vol. 57, No. 3, julio 2013, pp. 643–658. Wiley [En línea]. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ajps.12002/abstract> [Accesado 10 de agosto 2018]

Downie, C. (2017) “Business actors, political resistance, and strategies for policymakers”, en *Energy Policy*, volumen 108, pp. 583-592. Elsevier. [En línea]. Disponible en: <http://goo.gl/fu2Kgc> [Accesado el 2 de febrero 2018]

Frei, C. (2018) “Grand Transition, Digital Revolution and New Energy Realities” como parte del Ciclo de Conferencias “El futuro de la energía en México de la SENER”, impartida en el Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM) el 23 de agosto de 2018.

García, C. et. al. (2015) “Sustainable bioenergy options for Mexico: GHG mitigation and costs” Elsevier, Volume 43, marzo 2015, p. 545-552. Science Direct. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114010016> [Accesado el 10 de agosto 2018]

García, G. (2017) “México, energía solar para el futuro”, Gaceta de la Asociación Mexicana de Energía Solar Fotovoltáica. [En línea]. Disponible en: <http://www.asolmex.org/gaceta/guillermo-garcia.pdf> [Accesado el 10 de agosto 2018]

Heard, B. et.al. (2017) “Burden of proof: A comprehensive review of the feasibility of 100% renewable-electricity systems” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volumen 76 (2017) pp.1122–1133. Elsevier [En línea]. Disponible en:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117304495> [Accesado el 8 de agosto 2018]

Johnson, T. et. al. (2009) “México: Estudio sobre la disminución de emisiones de carbón (MEDEC)” en Publicaciones del Banco Mundial, Número de informe 52458. [En línea]. Disponible en: <http://documentos.bancomundial.org/curated/es/695641468050941688/Mexico-Estudio-sobre-la-disminucion-de-emisiones-de-carbono> [Accesado el 10 de agosto 2018]

Jones, N. (2017) “How the World Passed a Carbon Threshold and Why It Matters”, *Breaking Records*, Yale Environment 360, Published at the Yale School of Forestry and Environmental Studies, 26 de enero de 2017. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/M1wYQk> [Accesado el 8 de agosto 2018]

Letcher, T. (2013) “Future Energy. Improved, Sustainable and Clean Options for Our Planet”, 2a. edición, Elsevier, Londres. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780080994246/future-energy> [Accesado el 19 de diciembre de 2017].

Nace, T. (2017) “MIT Professor Predicts Earth's Next Mass Extinction to Begin By 2100”, *Science en Forbes*, 21 de septiembre de 2017. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/oPqXds> [Accesado el 8 de agosto 2018]

Ortega, M. y H. Diez, “Energía hidráulica en México y en el mundo” (2013) en *Geotermia*, Vol. 26, No.1, enero-junio de 2013. [En línea]. Disponible en: <http://geotermia.org.mx/geotermia/revistageotermia/Geotermia-Vol26-1.pdf> [Accesado el 8 de agosto 2018]

Smith, M (2016) “The number of cars worldwide is set to double by 2040”, en *Supply Chain and Transport, Growth, Global Agenda*, World Economic Forum, 22 de abril de 2016. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/BwYBaM> [Accesado el 8 de agosto 2018]

Steinberger, J. (2016) “Energising (sic) Human Development” en *Human Development Reports*, United Nations Development Programme. [En línea]. Disponible en: <http://hdr.undp.org/en/content/energising-human-development>. [Accesado el 10 de agosto 2018]

Terrell, M (2017) “The power of business advocacy to accelerate a clean economy”. Entrevista en Panel Verge 17, octubre 2017. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/NfTVfV> [Accesado el 8 de agosto 2018]

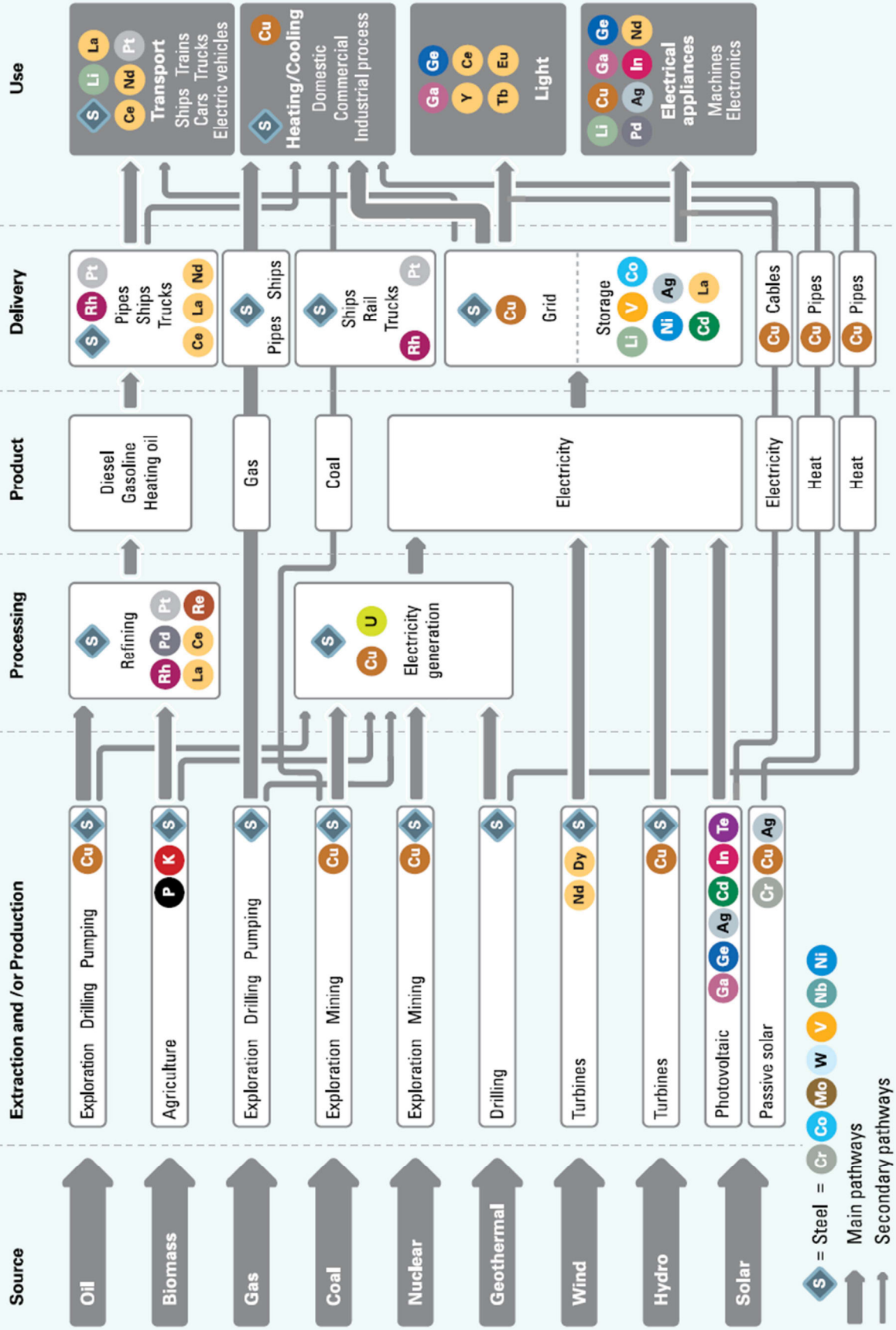
Van Staden, M. (2017) “Sustainable Energy Transition: Local Governments as Key Actors”, En: Uyar T. (eds) *Towards 100% Renewable Energy*, Springer Proceedings in Energy. Springer Publishing, Suiza. [En línea]. Disponible en: <https://www.springer.com/gp/book/9783319456584> [Accesado el 16 de agosto de 2018]

Wittmayer, J. (2017) “Actor roles in transition: Insights from sociological perspectives”, *Environmental Innovation and Societal Transitions*, volumen 24, septiembre 2017, p.45-56. ScienceDirect. [En línea]. Disponible en:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210422416301009> [Accesado el 8 de agosto 2018]

Zepf, V. et.al. (2014) “Materials critical to the energy industry. An introduction” Segunda Edición, University of Ausburg y BP, Londres. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/uhUpp5> [Accesado el 8 de agosto 2018]

Materials in energy pathways



Conclusiones finales

Tal como Zeus lo había pronosticado, el fuego hizo al hombre fuerte y sabio. Los poderes que adquirió al controlar una fuente de energía inanimada le traerían nuevas facultades que a largo plazo causarían consecuencias no previstas.

Es asombroso el impacto que tiene el uso de la energía en la historia del hombre, desde convertirlo en hombre, hasta acabar con él. Ha sido y seguirá siendo un componente esencial para el desarrollo de la humanidad. Hay una transformación social y económica impulsada por la energía. Una vez que el hombre logra extraer energía de su entorno para usarla en beneficio propio empieza la historia que dictaría el rumbo de la civilización.

En un principio sus fuentes de energía estarían limitadas a lo que pudiera recoger, entre hojas y varas, más tarde aprendería a obtener el mayor provecho posible de la energía solar capturada por las plantas en forma de carbón vegetal, en cada transición energética ha existido una coincidencia, el hombre se ha movido hacia fuentes con mayor densidad energética, obteniendo así mayor energía con menor masa y es quizás ahí donde radique una de las grandes limitantes hacia las energías limpias, la transición requerida implica un estado en el que la energía se convierte más en un flujo que en un bloque. Básicamente hablamos de energía eléctrica, que si bien en una de las formas más utilizadas en el mundo moderno, no alcanza a resolver las necesidades energéticas con las que vivimos en la actualidad. Las limitantes de almacenamiento y de intermitencia son dos de las grandes barreras hacia una era de energías renovables.

Las transiciones no son absolutas, el hecho de encontrar un energético con mayor densidad no supone el desuso de los anteriores, esto es más notable en países en vías de desarrollo, donde la biomasa sigue jugando un papel fundamental al energizar la población. En la actual era del petróleo, prácticamente todo bien creado por el hombre tiene en su proceso de elaboración involucrado al petróleo, muchos de los procesos bien podrían cambiar de fuente primaria de energía, pero existen aún algunos, sobre todo en el sector transporte de carga pesada, que requiere de hidrocarburos.

La era del petróleo ha dado pie a poderosas naciones, a empresas capaces de influenciar el rumbo de países y así como logró mejorar las condiciones de vida de diferentes civilizaciones, ha probado que, en exceso, también es capaz de demeritarlas. El petróleo, así como el carbón y el gas natural,

existen en cantidades, aunque vastas, limitadas; vivimos muy cerca de alcanzar el pico de producción y se pronostica que pase por lo menos un siglo más para que dejen de ser utilizados. Pareciera que tenemos suficiente tiempo para formular estrategias a futuro, sin embargo, de continuar generado más de tres cuartas partes de nuestra energía a partir de combustibles fósiles, nuestro hábitat se vería condenado a perder su equilibrio y con ello, sus habitantes a desaparecer.

El potencial que poseen las energías renovables es colosal, y si hay algo que la Tierra recibe en grandes cantidades es la radiación solar. Si fuéramos capaces de aprovechar tan sólo el 2% del potencial teórico de energía solar ($1,083 \times 10^6$ TWh/año) lograríamos satisfacer las necesidades energéticas mundiales (158,700 TWh/año), sin embargo, estamos limitados también a la tecnología que poseemos para capturar esa incidencia solar. Usando la tecnología fotovoltaica se requeriría de menos del 50% del potencial técnico (371,667 TWh/año). El potencial técnico está muy por debajo del potencial teórico ya que está limitado a la disponibilidad del recurso *in situ*, al uso de suelo, a la tecnología existente, a la disponibilidad de materiales necesarios, a la aceptación social e irremediablemente a los costos. El potencial del resto de las energías renovables, a pesar de ser mucho más reducido que su contraparte solar, ofrece una posibilidad de generación para los lugares que cuenten con el recurso, además la combinación de dos o más tipos de fuentes podría contrarrestar o al menos aminorar limitantes como la intermitencia.

El uso de las tecnologías renovables nos permite un gran margen de crecimiento aún para la alta demanda que se pronostica en el futuro. La investigación, junto con los avances tecnológicos, puede dar lugar a que los potenciales técnicos sean aún mayores.

La demanda energética es directamente proporcional al índice de desarrollo humano, un mejor nivel de vida está asociado a un mayor consumo energético, lo mismo se ve reflejado con el poder adquisitivo, al ser mayor existe una mayor demanda de fuentes fósiles las cuales nos permiten tener una gran cantidad de energía a un costo accesible con la que producimos más productos de los que necesitamos, fomentando una cultura de productos desechables. De cambiar esa mentalidad del uso de recursos para la producción de banalidades, los recursos renovables podrían satisfacer aún en mayor proporción las verdaderas necesidades de la población, al mismo tiempo que cuidaríamos del ecosistema. La población, aunque pudiera ver disminuido su índice de crecimiento en un futuro, lo que realmente le beneficiaría sería que éste fuera negativo. Si

pretendemos que la naturaleza recupere su capacidad de resiliencia los consumos requieren ser disminuidos de manera significativa.

Los mayores retos se encuentran en la energización de ciudades que es donde se da el mayor consumo dado que habita una mayor cantidad de personas quienes en general tienen mayor poder adquisitivo que la población rural. Los grandes parques eólicos, solares, plantas de generación geotérmicas, incluso gasoductos son instalados en zonas rurales, donde no se requiere de éstas grandes generaciones, pero que son afectados al cambiar el uso de suelo de las tierras. Existe una desproporción en cuanto al beneficio que repercute muchas veces en una percepción negativa de la energía a instalarse.

Los límites en la generación de energía van más allá de los avances tecnológicos. Podrían invertirse fuertes sumas de dinero en investigación y desarrollo de nuevas tecnologías que jamás serán puestas en marcha si no cuentan con el apoyo del gobierno, la sociedad y la industria privada. Se requiere que los gobiernos hagan una serie de normativas para favorecer la transición hacia energías limpias, que las personas cambien sus hábitos de consumo, que el crecimiento económico no comprometa al ambiente. La realidad es que la solución está en cada uno de nosotros, pero no de manera individual sino en conjunto. De nada servirá que existan nuevas tecnologías si nadie las quiere usar y si el gobierno no les da facilidad de entrada. Tampoco servirá una serie de normas que nadie pretende acatar, como también serían completamente inútiles los esfuerzos de la sociedad si no se tienen opciones a seguir. Los cambios tienen que darse de manera interdisciplinaria y de ahí la importancia de que las decisiones sean tomadas en conjunto con los diferentes actores. A fin de cuentas, los límites de la energía involucran temas económicos, sociales y políticos, un verdadero cambio en la manera en que producimos y consumimos energía implicaría necesariamente un involucramiento de estos cuatro rubros. Además de avances tecnológicos, se requiere de una sociedad involucrada, gobiernos comprometidos y empresas dispuestas a invertir en fuentes de energía que nos lleve a alcanzar la siguiente transición energética: la era de la energía limpia, que deje en el pasado la era del petróleo, que si bien no implica que los hidrocarburos queden en desuso, sí podría aspirarse a que se empleen únicamente en aquellas aplicaciones en las que no pudieran ser reemplazados como el caso del transporte de carga pesada o industrias como la del cemento.

Las compañías petroleras siguen teniendo un gran peso en las decisiones políticas de muchos países, el poder económico sigue moviendo al mundo a pesar de los daños ecológicos. Seguimos pensando como Biringuccio del siglo XVI, que la naturaleza tan generosa seguirá cubriendo todas nuestras necesidades, por superfluas que éstas sean. Lo verdaderamente importante en nuestro planeta no tiene una etiqueta de precio y eso hace más difícil protegerlo. Quizás aún antes de preocuparnos por cumplir las necesidades de energía del futuro habría que preguntarse si habrá suficiente agua para el consumo de los habitantes, si la respuesta es no, prácticamente el resto es irrelevante. La generación de energía involucra también el uso del vital líquido, en la mayor parte de los casos como método de enfriamiento, para la hidráulica para la propia generación y en casos como el fracking para el proceso de fractura de las rocas, el nivel de contaminación al que se comprometen los mantos acuíferos es alarmante, suficiente como para prohibir la técnica de extracción, sin embargo, sigue siendo una opción en muchos países, México incluido, no es de extrañarse que ocupemos el lugar 14º. a nivel mundial en emisiones de gases de efecto invernadero cuando no parecemos mostrar gran preocupación por nuestro hábitat.

Para el Consejo Mundial de la Energía existen básicamente dos posibles escenarios en los extremos de las posibilidades a futuro, uno motivado por las fuerzas del mercado (Jazz), donde el mayor peso se lo lleva el valor monetario y el otro (Sinfonía) donde el gobierno prioriza la sostenibilidad ambiental basados en información de organizaciones no gubernamentales, un gobierno que ha sido elegido por ciudadanos con conciencia ecológica. Dado que provenimos de varias generaciones atrás en las que los avances tecnológicos y la infraestructura han sido desarrollados basados en energía abundante y económica, quizás es aquí donde radica una de las mayores limitantes hacia energías limpias. Es también éste recuerdo de generaciones atrás el que frena a la energía nuclear, historias como las de Chernobyl y Fukushima no son fáciles de olvidar y nos obligan a que en esos temas nos veamos especialmente cautelosos, encareciendo la generación de este tipo de energía con los múltiples sistemas de seguridad requeridos.

Para el caso de los escenarios expuestos en el capítulo tres, el bueno, el malo y el feo, mucho tiene que ver qué tanto estamos dispuestos a poner al daño ambiental por sobre las ganancias de la generación energética. Vivimos en la opulencia energética sin darnos cuenta de que vamos adquiriendo una deuda, los recursos se acaban y gastamos más de lo que tenemos. Mas allá de cómo seguir obteniendo recursos para mantener nuestro estilo de vida, habría que pensar en adaptar

el estilo de vida a los recursos existentes. Habría que replantearse cuánta energía requerimos para poder vivir de manera salubre, digna, segura; para poder tener una buena calidad de vida que nos permita poder seguir desarrollándonos sin comprometer nuestros recursos naturales. La era del petróleo necesita terminar, la etapa de la energía abundante debe repensarse a un estilo de vida en el que la energía empiece a ser usada de manera más inteligente, más sustentable. El uso de gas no debe considerarse como la nueva etapa sino más bien como una transición hacia una nueva etapa de energía limpia con consumos mucho más medidos a lo que estamos acostumbrados, con un uso más inteligente de los bienes de consumo que reduzca la necesidad de reemplazarlos constantemente. Requerimos un sector de transporte mucho más inteligente, que nos permita mover al mayor número de personas en el menor tiempo, con el menor gasto de energía y no lo contrario. La educación de la nueva generación representa la pieza clave para lograr éstos cambios.

Resultaría interesante para el comparativo de las diferentes fuentes de energía, analizar las emisiones durante su ciclo de vida con el fin de evaluar cuál es la más inocua al ambiente.

Sería muy interesante también, un estudio como el que aquí presento para el caso exclusivo de México, un estudio que presente el verdadero potencial que tiene nuestra nación con respecto a los diferentes recursos energéticos de los que disponemos, que en realidad son todos. Aun cuando el gobierno mexicano se ha comprometido a hacer su parte en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y que ha destinado recursos para el desarrollo de energías renovables, no se espera en el futuro próximo que las energías limpias ocupen un papel preponderante en la generación de energía del país.