

Energía Ambiente y Sociedad

Libro de apoyo a la docencia

René D. Martínez Bravo

Carlos Alberto García Bustamante

Coordinadores



ESCUELA
NACIONAL
DE ESTUDIOS
SUPERIORES
UNIDAD MORELIA

10
años
(2011-2021)

Energía Ambiente y Sociedad

Libro de apoyo a la docencia

René D. Martínez Bravo

Carlos Alberto García Bustamante

Coordinadores



ESCUELA
NACIONAL
DE ESTUDIOS
SUPERIORES
UNAM
UNIDAD MORELIA

10
años
(2011-2021)

Contenido

Prefacio	5	
Agradecimientos	8	
Introducción	9	
Capítulo 1	Termodinámica	15
	MARCO A. MARTÍNEZ NEGRETE	
Capítulo 2	El sistema energético y el balance de energía	68
	CARLOS A. GARCÍA BUSTAMANTE	
	VÍCTOR M. RUIZ-GARCÍA	
Capítulo 3	Sector transporte	94
	ALFREDO F. FUENTES G	
Capítulo 4	El uso de energía en el sector residencial	115
	RENÉ D. MARTÍNEZ-BRAVO	
	MARCO A. MARTÍNEZ NEGRETE	
Capítulo 5	Sector industrial y Sistema eléctrico	133
	CARLOS A. GARCÍA BUSTAMANTE	
	RAÚL TAURO	
	RICARDO MUSULE	
Capítulo 6	El sistema alimentario	175
	QUETZALCÓATL OROZCO-RAMÍREZ	
	MARTA ASTIER	
	OMAR MASERA	

Capítulo 7	Recursos Energéticos	198
	CARLOS A. GARCÍA BUSTAMANTE	
	ALBERTO BELTRÁN MORALES	
	VÍCTOR M. RUIZ-GARCÍA	
	RENÉ D. MARTÍNEZ-BRAVO	
Capítulo 8	Impactos ambientales por el uso de energía	256
	RENÉ D. MARTÍNEZ-BRAVO	
Capítulo 9	Escenarios energéticos	296
	JORGE M. ISLAS SAMPERIO	
	GENICE K. GRANDE ACOSTA	
	PALOMA MACÍAS GUZMÁN	
Epílogo	Hacia un sistema energético sustentable	345
	RENÉ D. MARTÍNEZ-BRAVO	
	CARLOS A. GARCÍA BUSTAMANTE	
Glosario		352

Prefacio

La energía es fundamental para la satisfacción de necesidades humanas y para el desarrollo social y económico. La actual dependencia de los combustibles fósiles como principal fuente de energía ha ocasionado diversas problemáticas ambientales, sociales y económicas a nivel mundial. Ante estas consecuencias, se ha reconocido la necesidad de modificar el actual sistema energético para minimizar sus impactos y para contribuir al desarrollo sustentable. En este sentido, es fundamental estudiar la energía desde un enfoque integral que incluya desde los aspectos básicos de su naturaleza y transformación, hasta llegar a sus impactos en los entornos ambientales y socioeconómicos.

El estudio de la energía bajo un enfoque holístico debería integrar a todos los elementos que interactúan con ella. En la materia Energía, Ambiente y Sociedad de la Licenciatura en Ciencias Ambientales de la ENES Morelia de la UNAM, los docentes presentamos una cátedra en la que nuestra visión acerca de la energía reformula el enfoque de su enseñanza respecto de la física o de la ingeniería. Bajo nuestra concepción, la energía es inherente a la sociedad y forma parte del ambiente; esta visión de la enseñanza-aprendizaje de la energía es un intento de un enfoque amplio que consideramos debe contextualizar a la energía como parte del socio-tecnosistema.

En la enseñanza de la materia Energía, Ambiente y Sociedad (EAS) se aborda el trinomio que da nombre a la materia con el análisis energético *por usos finales*. El enfoque plantea un cambio de dirección del modelo tradicional del sistema energético “de arriba hacia abajo”; el nuevo modelo se construye “de abajo hacia arriba” [*botton-up*] para identificar cada una de las tareas energéticas que la sociedad requiere (calor, iluminación, cocción, movimiento, etc.) y cuáles son los combustibles que pueden proporcionar los tipos de energía que se necesitan para satisfacer cada

una de estas tareas. La integración de los elementos descritos permite al enfoque de usos finales, reconocer cuáles son los combustibles que con menores transformaciones producen el tipo de energía requerida, mejorando la eficiencia de uso y evitando impactos ambientales.

Consideramos que el método de aproximarse al estudio de la energía con el enfoque de usos finales que planteamos en la enseñanza de EAS permite una redimensión de análisis para el sistema energético, cuando el objetivo social es hacer un uso sustentable de los combustibles y de la energía, sin dejar de lado la eficiencia. En este diseño y a lo largo del libro también se replantea la urgencia de un cambio en el modelo de demanda de energía, lo que inherentemente disminuye los impactos ambientales que el sector energético produce.

Conscientes de la complejidad de la interacción entre ciencia, tecnología y sociedad, la materia EAS sitúa a la energía en el paradigma emergente sobre los problemas tecnológicos y ambientales directos e indirectos que la sociedad enfrenta durante todo el ciclo de procesamiento energético (extracción, transformación, transferencia, transporte y generación de residuos, por nombrar algunos). De esta manera, la materia propone una visión de la energía como pieza fundamental entre campos aparentemente inconexos, mostrando la existencia de vínculos estrechos entre la sociedad y el ambiente.

Al ser un libro de apoyo a la materia EAS, los alumnos y los docentes encontrarán en los nueve capítulos, pautas acerca del funcionamiento del sistema energético y su vínculo con las sociedades humanas. Desde una postura antropocéntrica, se ubica al usuario como parte del ecosistema para describir las reservas de energía, los tipos de combustibles y los dispositivos, los sectores demandantes de energía y los impactos ambientales que las sociedades ocasionan. En el desarrollo de los capítulos del libro, los contenidos son reforzados con ejemplos sencillos y claros, usando contextos cercanos a los alumnos y sobre todo con énfasis en la situación de México.

Se plantean escenarios energéticos “más de lo mismo” (o en inglés *bussines as usual*) y alternativos bajo enfoques de uso sustentable de la energía y de la reducción de sus impactos al ambiente por medio de diferentes escalas de espacio y tiempo. Los escenarios que se plantean –como el pico del petróleo, la controversia socioambiental del uso de la energía atómica, la falta de impulso al desarrollo tecnológico descentralizado para el aprovechamiento de las fuente renovables, así

como el escaso interés en los impactos ambientales ocasionados— se exponen para que de forma crítica y analítica se posicionen como elementos centrales para la toma de decisiones en la problemática energética global y de México en particular.

Se espera que con los elementos que construyen los capítulos del libro para la materia EAS, los estudiantes comprendan la visión alternativa de los autores acerca del por qué de la actual crisis planetaria y de los aspectos ligados a los debates sobre la producción y oferta de energía del petróleo, así como la pertinencia de aprovechamiento de algunas fuentes alternas de energía, sus aspectos físicos y sus implicaciones socio-eco-tecnológicas para poner en perspectiva la importancia de la reducción del consumo y la mitigación del cambio climático global.

En este volumen, cada capítulo materializa la experiencia docente frente al grupo. Los capítulos se nutren con la visión y la forma de enseñanza de cada uno de los autores como sello distintivo de su libertad de cátedra en las aulas. Ahora en el formato escrito, se respeta esta diversidad de los autores para mantener el contenido fiel a sus contribuciones. El producto obtenido es la huella en letras de la experiencia en el manejo de los temas que los apasionan, que como marca distintiva se imprime y desarrolla en cada capítulo de este libro.¹

Finalmente, confiamos en que los contenidos de la materia ahora presentados como libro, propicien el pensamiento reflexivo del lector, otorgando elementos para contrastar el modelo energético tradicional con el denominado de usos finales. Pretendemos motivar al lector a reconocer la urgencia de encontrar otros modelos de uso de energía que tomen en cuenta la conexión del socio-tecno-sistema y que además identifiquen las áreas de oportunidad para mejorar la relación inherente del ser humano y la energía. Por lo tanto, la puerta está abierta a alternativas para innovar en lo existente y también para lo completamente nuevo, reiterando que el socio-tecno-ecosistema debe encaminarse hacia escenarios donde el sistema energético sea mejor que el actual.

RENÉ D. MARTÍNEZ-BRAVO

¹ Los capítulos presentan organizaciones distintas, las cuales se respetan con base a lo acordado con los coordinadores de la obra.

Agradecimientos

El presente proyecto se pudo realizar gracias al apoyo financiero de la DGAPA UNAM, bajo el proyecto PE106115 del Programa PAPIME 2015.

Los autores además agradecemos a la M. en C. Ana Yesica Martínez Villalva y a la Dra. Yolanda Nava por la revisión y comentarios para mejorar este material. También agradecemos a Ana Bueno, Mitzi Contreras, Alejandra Saucedo, Karla Guzmán, Sofía Luna, Rocío León y Elisa Belmonte por su trabajo en las figuras del libro.

Los autores del capítulo 9 agradecen a la Lic. María de Jesús Pérez Orozco de la Coordinación de Planeación Energética del IER UNAM por el apoyo en la búsqueda bibliográfica realizada.

Introducción

Enseñar al joven para que aprenda a navegar en océanos de incertidumbre y para que aprenda a conducir su propia barca hacia la orilla.

EDGAR MORIN

La era de la energía barata y abundante se acabó: hemos entrado en la era del declive y de la energía cara. El cénit de la producción petrolera y los nuevos costos de la energía son las causas principales de la crisis económica. Hay que invertir masivamente en fuentes renovables para la transición energética hacia una economía post-petrolera. Sin embargo, esto presenta retos monumentales por la menor intensidad energética e intermitencia de las energías renovables. Es imposible sostener el ritmo de consumo actual. Se necesita un decrecimiento hacia un nivel sustentable por las fuentes renovables. Se necesitan nuevas políticas globales para una mejor distribución de la energía y evitar guerras por los recursos.

LUCA FERRARI

La situación energética y ambiental que vive el planeta en la actualidad requiere abordar el estudio de la energía, no sólo a partir de su manifestación física como tal, sino a partir de un contexto socioambiental amplio. De esta manera la energía es un tema de conocimiento básico que muestra su presencia e importancia en distintos campos entre los que se incluyen los procesos naturales y sociales. Esto implica que la enseñanza sobre la energía requiere incorporar contextos

amplios e incluyentes. Al hacerlo así se facilita el entendimiento de la vinculación del uso de la energía con varias de las problemáticas ambientales y socioeconómicas que se presentan a nivel mundial (su papel en nuestras vidas, dificultades asociadas a su obtención, el uso y a la disposición de sus desechos y de sus impactos al ecosistema).

LA ENERGÍA COMO CONCEPTO

La comprensión amplia del concepto de energía permite entender muchos fenómenos y objetos de estudio de la ciencia, así como tener una correcta interpretación de diversos eventos cotidianos. No obstante, la energía es difícil de definir con claridad sin una referencia o sin una interacción, ya que describirla tan solo como trabajo o calor limita un correcto entendimiento del concepto. La energía, en términos generales, está asociada a la interacción entre objetos (masa) por lo que tiene múltiples formas, o dicho de otro modo, tiene varias manifestaciones, como son: la energía potencial, la cinética o la química. Aunada a esta gama, también tiene más de una sola unidad de medida, puede así reportarse en Julio o Joule (J), kilocalorías (kcal) y kilowatts hora (kWh) dependiendo del contexto en el que se encuentre.

La energía puede producir trabajo, también tiene la facultad de transformarse, tal como lo postula la primera ley de la termodinámica, la cual puede enunciarse como “la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma”. Durante su transformación por diversas rutas, se divide en energía de entrada y de salida, o bien energía final y energía útil. La comprensión de la separación entre la útil o de uso final y la energía que pasa a ser parte del proceso es crucial en el entendimiento del concepto y refuerza el planteamiento de que la energía puede comprenderse mejor en un contexto de interacción de los objetos o sustancias.

¿POR QUÉ ES IMPORTANTE LA ENERGÍA PARA LOS SERES HUMANOS?

Una vez desmenuzada la definición de energía, podemos hablar sobre su uso en la evolución del hombre y de las culturas. El *Homo erectus* supo obtener beneficios de ella, por ejemplo, en el caso del fuego usó la energía para protección, fuente de calor, cocción de alimentos e iluminación. Posteriormente aprendió a

darle diferentes usos más allá de la satisfacción de necesidades básicas, hasta llegar a la época actual. Bajo este entendido, la manipulación que la humanidad supo hacer de la energía ha favorecido su supervivencia y facilitado la exploración y colonización de espacios que sin ella hubieran sido imposible.

Fue durante la revolución industrial del siglo XVIII cuando la energía modificó el destino de la humanidad. En ese momento de la historia se sumaron a la biomasa otros combustibles (otras fuentes de energía), principalmente el carbón mineral. Estas nuevas fuentes de energía tuvieron cabida en los procesos industriales y en las aplicaciones domésticas. Por ejemplo, la máquina de vapor creada por James Watt (1736-1819) requirió combustibles con mayor contenido energético (energía interna), por lo que el carbón mineral y la turba fueron los recursos energéticos que se aplicaron en esa tecnología. A inicios de 1900 se empezó a dar un uso energético a los derivados del petróleo al emplearlos como combustibles líquidos para iluminación y posteriormente para mover máquinas (como el automóvil).

En la actualidad el binomio energía y tecnología se encuentra envolviendo a la humanidad. Cada ser humano, independientemente de dónde provenga, tiene energía a su alcance, y con la tecnología necesaria, facilita su vida. El binomio que los humanos hemos perfeccionado nos permite transformar los recursos naturales para producir bienes y servicios para beneficio propio directa e indirectamente. Se podría decir que hemos aumentado nuestro confort gracias al uso de la energía, en su mayoría a partir de los combustibles fósiles. Paradójicamente, dicho confort nos ha llevado a producir, por un lado, impactos en la salud humana, pero por otro lado, graves daños en el ambiente natural y alteraciones a los ciclos naturales y al ecosistema mundial.

Respecto a la inercia que la humanidad ha trazado con la energía y la tecnología, B. Commoner en su libro *El círculo que se cierra* (1972) señaló que hemos sido muy rápidos en buscar sus beneficios y muy lentos en calcular los impactos y otros abusos en el uso de los recursos naturales. Tal ha sido el resultado que el panorama actual nos muestra los resultados negativos que hemos provocado con el modelo energético, baste nombrar el cambio climático global como ejemplo. El reto ahora es ser rápidos en la respuesta para mitigar y adaptarse los efectos del cambio climático y para ello debemos hacer ajustes inmediatos en el modo con el que consumimos energía y en general en cómo hacemos uso de los recursos naturales. Por lo anterior, este texto es un intento de brindar a los estudiantes los elementos

y las herramientas para el análisis del modelo energético, así como de las aristas que pueden ser modificadas en beneficio socioambiental. Para ello, sugerimos un enfoque holístico de la energía que abarque los recursos energéticos, tecnologías e impactos socioecológicos, para después crear y plantear modelos o sistemas alternativos que sean dinámicos, los cuales puedan reformularse constantemente de acuerdo con las necesidades energéticas de las diferentes sociedades y con bajos impactos al ambiente.

¿POR QUÉ ESTUDIAR LA ENERGÍA EN CONEXIÓN CON EL AMBIENTE Y LA SOCIEDAD?

La energía es indispensable para que ocurran todos los ciclos y procesos naturales en el planeta, por lo que es necesaria para la supervivencia de los seres vivos. Con aquella que proviene del sol, se origina el ciclo hidrológico y el sistema climático por medio de las corrientes de aire y del movimiento del agua oceánica. En la cadena o red trófica, la energía del sol se transfiere entre los organismos que conforman los eslabones o niveles en forma de energía metabólica, necesaria para el desarrollo de individuos, poblaciones y comunidades. El tránsito de la energía inicia con la fotosíntesis pasando por los herbívoros, los carnívoros y al final, los descomponedores de la materia obtienen su parte y realizan el reciclamiento de nutrientes para reincorporarlos al sistema y repetir el ciclo energético. En biología la regla del 10% de la transferencia de energía entre niveles tróficos establece que solo el 10% de la energía pasa al siguiente eslabón.

Desde el contexto de la sociedad moderna, la energía es la que “mueve” los principales procesos productivos, de tal forma que se requieren ingentes cantidades de esta para satisfacer una demanda mundial creciente. La oferta de energía actual está compuesta a partir de los hidrocarburos (petróleo y gas natural), el carbón mineral, la energía nuclear y las fuentes renovables de energía. A pesar de ser un amplio abanico de opciones, la demanda no cesa.

En la época actual hemos formado sociedades extremadamente demandantes de energía. De forma directa la requerimos para satisfacer nuestras necesidades básicas como cocción, calefacción, iluminación, transporte y protección. De forma indirecta la consumimos en vestimenta, artículos industrializados, cobijo, ocio y otras necesidades indispensables para la sociedad. Estos consumos energéticos

han favorecido la estratificación social y desde hace unas décadas el tipo de energía consumida y el acceso a ella han configurado al mundo.

En el contexto social, el efecto del consumo de energía ha llegado a los excesos por la necesidad de poseer y consumir más bienes, a tal grado que se ha rebasado la satisfacción del conjunto total de necesidades, por lo que ahora se consume más energía como justificación del crecimiento y desarrollo económico, enfatizando el mejoramiento de la calidad de vida. Es el abuso en el consumo energético lo que ha ocasionado en gran medida la crisis ambiental actual, porque se demandan cada vez mayores cantidades de recursos naturales, ocasionando afectaciones y mayores flujos de residuos al aire, al agua y al suelo.

Otro gran problema que percibimos en esta relación entre la energía y el ambiente es el sistema energético que se ha creado, el cual es complejo y centralizado. En este modelo hay afecciones ambientales en cada una de sus partes o etapas, incluso en los usuarios finales que utilizan la energía en la vivienda, el comercio y la industria, entre otras. Es por todo esto que el planteamiento para abordar el análisis de la energía como parte inherente de la sociedad y el ambiente, requiere enfoques sistémicos en su análisis y enseñanza.

Este texto está basado en nuestra experiencia frente a grupos de la Licenciatura en Ciencias Ambientales, donde hemos impartido la asignatura Energía, ambiente y sociedad en la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia de la UNAM. En el curso tratamos de exponer a la energía como parte inherente de nuestra cotidianidad, abordando otros aspectos más allá de un concepto físico. Resaltamos sus implicaciones termodinámicas en la transformación y calidad de la energía, su importancia para la satisfacción de necesidades en el sistema económico, así como los impactos que provoca en el ecosistema, desde la extracción de la materia prima hasta su uso y disposición final, visión equivalente a un ciclo de vida. De forma recurrente inducimos reflexiones que propicien la búsqueda de alternativas y propuestas sobre el cambio de modelo energético basados en la satisfacción de necesidades, la eficiencia en el uso y los dispositivos para el aprovechamiento sustentable de la energía.

Como en una escalera de complejidad energética, comenzamos analizando la importancia de la termodinámica y el concepto de exergía; ascendemos al siguiente escalón para analizar el patrón de consumo de los recursos energéticos en los diferentes sectores de la economía, donde analizamos las principales tecnologías

de transformación, así como sus fuentes y dinámicas de uso de energía. Después de reconocer cada componente del sistema energético, pasamos a evaluar sus efectos e impactos socioambientales. Finalmente planteamos la importancia de crear escenarios y analizar políticas públicas para explorar la manera de obtener y usar sustentablemente la energía.

Si bien existen libros que abordan el tema de la energía desde la perspectiva de sus impactos en el ambiente, este libro tiene como uno de sus propósitos explorar con más detalle el caso del sistema energético mexicano, sus condiciones particulares, retos específicos y oportunidades para el futuro. El texto aborda también alternativas de mitigación y adaptación al cambio climático global y explora opciones de mitigación de gases de efecto invernadero desde el sector energético.

Finalmente, esperamos que los contenidos de este libro sean un apoyo también para los profesores de asignaturas con las temáticas de la energía y su relación con el ambiente y la sociedad. El fin último es acercar a los estudiantes y al público en general al panorama energético actual en México y en el mundo a partir de una perspectiva crítica e integrada. También esperamos que el libro brinde las bases para entender y proponer alternativas de diseño del sector energético, en las que alcance la máxima eficiencia posible bajo un marco de sostenibilidad.

RENÉ D. MARTÍNEZ-BRAVO

Capítulo 1

Termodinámica

MARCO A. MARTÍNEZ NEGRETE

INTRODUCCIÓN

¿Por qué es básico comprender en profundidad las relaciones entre la energía, el ambiente y la sociedad?

En este capítulo se explica el concepto de energía desde una acepción útil para el estudiante de la asignatura Energía, Ambiente y Sociedad. Es decir, el concepto de energía no se presenta como en una licenciatura de física, sino como el vínculo de acción entre los ámbitos naturales y humanos, sobre todo para mostrar las repercusiones de las personas organizadas en sociedad sobre el entorno ambiental que las rodea.

“Sin energía nada se mueve” suele decirse. Esto es válido tanto en lo humano como en lo ambiental; por esto, el capítulo inicia con una discusión general del concepto de energía y cómo se presenta en el universo. Se muestra así que el concepto es tan rico que no lo puede agotar una definición de diccionario; tanto es así que ni siquiera los físicos de hoy en día conocen plenamente todas las aristas que componen la imagen completa, exacta y precisa del término. La noción de “energía oscura” es una prueba en positivo de lo anterior.

Para llegar al rol que la energía juega en lo social, es necesario que el estudiante se familiarice con el papel que ella desempeña en una esfera de acción más cercana, como es la del hogar, así irá adquiriendo los elementos teóricos que le capacitarán para brincar de lo más simple a lo más complejo.

Los seres humanos se alimentan en lo personal y en lo social de energías existentes en el ambiente que requieren de instrumentos técnicos para ser procesadas. Este procesamiento enfrenta límites en varios aspectos, tanto en su naturaleza

como en la eficiencia de su utilización, en aras de satisfacer las necesidades humanas. Esto corresponde temáticamente a la discusión sobre la conveniencia de emplear los energéticos agotables o los inagotables, y si es o no lícito modificar las tareas para la supervivencia que no impliquen conflictos insustentables con el ambiente. La ciencia de la termodinámica hace aquí acto de presencia como una herramienta útil para acceder a las respuestas apropiadas.

Todo lo anterior constituye el objetivo temático del presente capítulo: el suministro de los conocimientos termodinámicos suficientes para que el estudiante pueda analizar el papel de la energía en la satisfacción de las necesidades humanas, desde un punto de vista social y ambientalmente sustentable. Y una posible respuesta a la pregunta inicial acerca de las relaciones entre energía, el ambiente y la sociedad es que, de acuerdo con la definición de la Comisión Bruntland de la ONU sobre desarrollo sustentable, la satisfacción de las necesidades de la sociedad actual debe hacerse sin comprometer las necesidades de las sociedades venideras. De aquí que sea necesario analizar la relación entre energía, ambiente y sociedad, para definir las estrategias de los usos energéticos, que no afecten la salud de los ecosistemas, en términos de su equilibrio.

Desde una perspectiva didáctica, en la exposición de los temas se intercalan preguntas que pueden considerarse como tales, o bien como ejercicios y tareas, o aún como problemas de respuesta directa o “abiertos” (en el sentido de requerir efectuar alguna investigación). Mediante estas cuestiones se pretende que el estudiante profundice en los temas expuestos, al tiempo que mínimamente se autoevalúa en el aprendizaje de ellos.

1.1. ENERGÍA EN EL UNIVERSO

¿Qué es la energía? ¿Cómo se manifiesta la energía en el universo? ¿Es posible dar una definición “cerrada” de energía?

Energía es un concepto que aparece en física en todos sus campos y subcampos, así como en todos los niveles de la vida diaria, desde el hogar hasta la sociedad en su conjunto y el universo entero.

Actividad. Escribe una lista de ramas de la física en donde aparezca el concepto de energía (sólo utiliza tu memoria, sin consultar libros ni internet). ¿Qué formas de energía identificas en tu hogar y en la sociedad?

La energía surge asociada a la interacción entre los objetos fundamentales —y los objetos que se componen de estos— que conforman nuestro universo: quarks, electrones, neutrinos, protones, neutrones, mesones, átomos, moléculas, objetos sólidos, líquidos y gaseosos, y así en adelante hasta llegar a los objetos planetarios, estrellas, galaxias, cúmulos, etcétera.

Todos los objetos mencionados interactúan mediante fuerzas de cuatro tipos: gravitatoria, electromagnética, nuclear débil y nuclear fuerte, según el modelo más aceptado por los físicos (por ejemplo, consultar en *Wikipedia* la entrada “el modelo estándar de la física de partículas” (https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_est%C3%A1ndar_de_la_f%C3%ADsica_de_part%C3%ADculas)).

Las interacciones gravitatoria y electromagnética son de un alcance de amplio espectro, desde las distancias microscópicas, hasta las macroscópicas. Dos manifestaciones mesoscópicas familiares son: la caída de un llavero al suelo por la atracción gravitatoria de la Tierra; la desviación eléctrica de la vertical de un delgado chorro de agua al acercarle un globo inflado frotado en el pelo. Menos cotidianas son la puesta en el espacio exterior de naves interplanetarias, la construcción de plantas generadoras de electricidad mediante caídas de agua o la quema de combustibles fósiles.

En el caso del llavero que cae, la energía asociada con la interacción con la Tierra es su energía potencial gravitatoria, la que depende de la distancia relativa entre ambos objetos. Si m es la masa del llavero y h su distancia al suelo (de donde se empieza a contar la altura), el valor de la energía potencial (EP) es:

$$EP = mgh$$

Si se deja caer al llavero de la altura h , adquirirá una velocidad v y, por tanto, una energía de movimiento o cinética (EC), que en cada punto de la caída tiene el valor:

$$EC = \frac{1}{2}mv^2$$

Las interacciones gravitatorias y electromagnéticas se emplean en la generación de electricidad en plantas hidroeléctricas, las que convierten en electricidad la caída del agua almacenada en las presas.

Las interacciones débil y fuerte entre partículas subnucleares son las responsables de la energía nuclear, la cual se asocia con la energía de las estrellas, las bombas nucleares y las plantas nucleoeeléctricas.

La aglomeración de partículas fundamentales, a escala mesoscópica, da origen a interacciones y formas de energía derivadas de ellas, como la energía interna (U) de un gas encerrado en el cilindro de un motor térmico, o la energía química de un pedazo de carbón mineral, resultante de las fuerzas de amarre (de naturaleza eléctrica) de sus moléculas.

De acuerdo con la teoría especial de la relatividad, todo objeto de cualquier tamaño tiene una energía intrínseca dada por la famosa fórmula de Einstein, $E = m_0 C^2$, siendo m_0 su masa en reposo y C la velocidad de la luz (que tiene un valor único, sin consideración de la velocidad de la fuente emisora).

Las interacciones entre todos los objetos, simples o compuestos, micro o macroscópicos, se rigen por el principio de conservación de la energía, el que establece que la energía total inicial de los objetos interactuando es la misma que la energía total final de los objetos resultantes de esa interacción.

En principio, las cuatro interacciones fundamentales son las responsables del comportamiento del universo conocido, el que contiene no menos de cien mil millones de galaxias, cada una con cerca de cien mil millones de estrellas. La antigüedad del universo, que está en expansión acelerada, se calcula en unos 13 800 millones de años a partir de la Gran Explosión [*Big Bang*], de acuerdo con el modelo del origen del universo más aceptado por los científicos hoy en día (ver en *Wikipedia* https://es.wikipedia.org/wiki/Big_Bang).

Sin embargo, como consecuencia de que los movimientos intergalácticos no pueden explicarse debido a la materia observada del universo, se ha formulado como hipótesis causativa la existencia de materia y energía “oscuras”, aunque de naturaleza aún desconocida. Estas darían cuenta de dichos movimientos. De acuerdo con las más recientes mediciones, la composición del universo sería la siguiente: 73% de la energía sería oscura, 22.5% sería materia oscura y el 4.5% restante sería la materia ordinaria observada (0.5%: estrellas, planetas, etc., y 4%: gas caliente). (Consultar en *Wikipedia* con la entrada “energía oscura”).

Aunque no se conoce la naturaleza de la materia oscura, se sabe que sus partículas están presentes en nuestro entorno; por ejemplo, puede haber una de ellas en el espacio de una taza de té. En el Gran Colisionador de Hadrones de Ginebra se intenta producir y detectar partículas de materia oscura. Sin embargo, la energía oscura representa un enigma aún mayor.

Determinar la consistencia de la materia y la energía oscuras constituye un tema actual de la investigación científica de frontera.

Pregunta. ¿Tiene sentido dar una definición “cerrada”, o de diccionario, de energía cuando se desconoce la naturaleza del 73% de la energía del universo? Tratemos de obtener la respuesta tras revisar las siguientes secciones.

Actividad. Explica, recurriendo solamente a tu conocimiento actual de física, la conexión entre los conceptos de “fuerza” y “energía”.

Actividad. Repasa en tus textos de física o en internet la manera como se genera electricidad mediante una caída de agua.

1.2. ENERGÍA EN LA TIERRA

¿Cómo ha afectado el procesamiento humano de la energía a la Tierra en su conjunto? ¿Es verdad que vivimos en un período geológico, el Antropoceno, señalado por la acción disruptiva de los seres humanos sobre el ambiente terráqueo? ¿Cuándo aparecen la ciencia y la técnica en la historia del planeta?

Nuestro planeta se formó hace unos 4 500 millones de años. En el seno de las interacciones energéticas terrestres surgió la vida hace unos 3 400 millones de años, lo que modificó radicalmente el ambiente terrestre para convertirlo (según la hipótesis Gaia) en un gran organismo con propiedades vitales de tal forma que al planeta se le refiere como Gaia. Para saber más acerca de la hipótesis Gaia, consultar Kirchner (2002).

Muchos años después se precipitaron cambios que empezaron a alterar el equilibrio dinámico de la hipótesis Gaia. Hace entre 6 y 7 millones de años se separaron las líneas evolutivas del hombre y el chimpancé. En el año 2000 se des-

cubrieron en Etiopía los restos de la primera especie pseudohumana, el *Ardipithecus ramiduskadabba*, con antigüedad de entre 5.2 y 5.8 millones de años. El *Homo habilis* se desarrolló a partir del *Australopithecus* en África hace unos 2 millones de años. De él surgió hace unos 1.6 millones de años el *Homo erectus*, que se diseminó por otras regiones de la Tierra. Después, unos 400 mil años atrás, apareció en Europa el *Homo heidelbergensis* y, finalmente 160 mil años en el pasado se presentó el *Homo sapiens* que, hace unos 50 mil años dio el gran salto hacia el hombre actual (Ganten *et al.*, 2004).

Desde sus inicios y durante las transformaciones mencionadas, el ser humano fue creando maneras cada vez más incisivas de influir en su ambiente, a través de actividades técnicas y científicas progresivamente más elaboradas, sobre todo las relacionadas con cambios sociales y políticos sustentadas en el procesamiento de los materiales energéticos. Se llega así hasta el período actual en el que, por causa de la intromisión de las extensas e intensas actividades humanas en el ecosistema, puede caracterizarse como el *Antropoceno*, pues pone severamente en duda la validez de que nuestra Tierra pueda seguir subsistiendo de acuerdo con la hipótesis Gaia.

Una forma de percatarnos de estos cambios tan radicales consiste en analizar lo que ocurre a nuestro alrededor en distintos niveles espaciales, empezando por el hogar, el pueblo, la región, el país, hasta llegar al planeta entero, en distintas escalas temporales (corto, mediano y largo plazo).

En la sociedad mexicana el procesamiento de energéticos y materiales, aunque nos referiremos primordialmente a los primeros, se presenta como un componente básico de todas las actividades esenciales de su funcionamiento.

Pregunta. ¿Qué opinas de la afirmación de que la ciencia y la técnica son coetáneas a la presencia de los seres humanos en la Tierra? ¿O crees que la ciencia sólo aparece a partir de la Europa renacentista?

Pregunta. ¿De qué manera influye el procesamiento de energéticos del nivel inferior (hogar, corto plazo) en el nivel superior (Tierra, largo plazo)?

Pregunta. ¿Qué pasaría con la sociedad mexicana si súbitamente se suspendiera el suministro de petróleo y gas?

1.3. NOCIONES INTRODUCTORIAS DE ENERGÍA Y ENERGÉTICOS (PRIMARIOS Y SECUNDARIOS)

¿Qué hace que el movimiento en la naturaleza o en la sociedad sea posible: el consumo de energía o el de energéticos?

La energía está normalmente asociada a la interacción entre objetos. Es de naturaleza potencial si la distancia entre los objetos es determinante, como en el caso mencionado de la energía de atracción gravitatoria entre un llavero y la superficie de la Tierra. Algo semejante podría decirse de una molécula en interacción eléctrica con otra o con un conjunto de moléculas de la misma naturaleza, como las compactadas en un pedazo de carbón mineral.

Actividad. Indaga en los libros o en internet sobre el concepto de “energía y potencial químico”.

La energía potencial se puede transformar en energía de movimiento o cinética. Así ocurre por ejemplo al dejar caer la piedra hacia el suelo, o al quemar un pedazo de carbón en presencia del aire, en cuyo caso los gases de la combustión adquieren energía de movimiento.

Un energético es un objeto que tiene la capacidad de dotar de energía cinética a él y a otros objetos asociados con la destrucción de su energía potencial.

La energía cinética producida puede utilizarse para efectuar un trabajo, por ejemplo, el de la piedra al impactar la cabeza de un clavo situado de punta sobre un pedazo de madera en el suelo. Si la fuerza de oposición a la penetración del clavo en la madera es F y la distancia de penetración es d , entonces el trabajo W realizado por la piedra al caer es el producto de la fuerza por la distancia, o sea:

$$W = Fd$$

Si un pedazo de carbón mineral se quema dentro de un cilindro lleno de aire provisto de un pistón, los productos de la combustión pueden transformar parte de la energía cinética adquirida en trabajo contra el pistón. Si la presión que el pistón ejerce contra el gas encerrado en el cilindro es p , y el cambio de volumen es ΔV , el trabajo W efectuado es:

$$W = p \Delta V$$

Así pues, un energético es un objeto que, por su interacción con otros objetos, posee energía potencial capaz de efectuar trabajo. Una vez que la energía potencial del energético se destruye, lo mismo sucede con él. La piedra, como energético gravitatorio, deja de serlo (se destruye) al caer al nivel del suelo; algo semejante ocurre con el pedazo de carbón mineral, que literalmente se aniquila como energético químico al quemarse en presencia de aire.

En los procesos de interacción entre objetos rige el principio de conservación de la energía, pero los energéticos no se conservan, se destruyen. Por ejemplo, en la caída del objeto de masa m al suelo la energía total se conserva, pues la energía total, que es igual a la energía potencial inicial, mgh , cambia al valor $mgh = mgh' + \frac{1}{2}mv^2$ cuando el objeto al caer se halla a la altura h' menor que h y ha adquirido una velocidad v (en ausencia de fricción con el aire). Entonces, la ley de la conservación de la energía mecánica total establece que:

$$mgh = mgh' + \frac{1}{2}mv^2$$

Pero una vez que el objeto llega al suelo, su energía potencial se anula (porque se ha tomado como nivel 0 de referencia precisamente el suelo) y adquiere su máxima velocidad de caída, por lo que:

$$mgh = \frac{1}{2}mv_{\max}^2$$

El impacto con el suelo a la velocidad v_{\max} normalmente ocasiona que toda la energía cinética del móvil de masa m se disipe en energía de las moléculas del suelo y del objeto mismo. En ese punto, la energía potencial ha desaparecido y, por tanto, el objeto de masa m pierde su capacidad para hacer trabajo, desapareciendo así su cualidad de ser energético. La energía se conserva, pero el energético se destruye.

Pregunta. ¿Cuánto energético gravitatorio se consume (o se destruye) al caer al suelo una piedra de 1 kg de masa de una altura de 2 m? ¿En cuántos julios aumentan las energías internas del suelo y la piedra después del impacto?

Son energéticos primarios los que existen de manera natural, como el carbón mineral, el petróleo, el gas natural, una masa de agua localizada a una altura por encima del nivel del mar, una masa de aire en una región de alta presión, con respecto a la masa de aire a presión normal. En cambio, los energéticos secundarios son los que requieren de la intervención humana para ser elaborados a partir de los primarios (gasolina, gas LP, electricidad, biodiesel, etcétera).

La electricidad es uno de los principales energéticos secundarios que se obtiene del consumo de otros energéticos primarios, como las caídas de agua (hidroelectricidad), los vientos (aerogeneradores), vapor de agua del subsuelo (geotermia), radiación solar (celdas fotovoltaicas o concentradores solares), los combustibles fósiles (carbón, gas y líquidos del petróleo, quemados en termoeléctricas), el uranio (“quemado” en plantas nucleares), la biomasa (por ejemplo el bagazo de caña, quemado en una termoeléctrica), etcétera.

Actividad. Haz una lista de usos de la electricidad en el hogar y en otras partes de la sociedad.

Preguntas. ¿Qué energético primario se consume más en México en la generación de electricidad? ¿Qué tan conveniente es lo anterior en cuanto a contaminación ambiental y seguridad en las condiciones de vida de nuestro país?

1.4. ENERGÉTICOS (AGOTABLES E INAGOTABLES)

Y NECESIDADES HUMANAS PERSONALES Y SOCIALES

¿Cómo se satisfacen las necesidades energéticas de los seres humanos? ¿Qué tipos de energéticos hay? ¿Por qué unos energéticos son agotables y otros inagotables?

Prácticamente, la satisfacción de todas las necesidades humanas requiere del consumo de energéticos. Si no es a pie el traslado de un lugar a otro, de nuestro hogar a la escuela o al lugar de trabajo requiere de un vehículo de transporte que consume energéticos (gasolina si es un auto o una camioneta, diésel si es un autobús, electricidad si es el metro), que se transforman en la energía cinética del desplazamiento. En el hogar la cocción de alimentos se efectúa con estufas de gas o de leña y, en menor medida, con estufas eléctricas. El calentamiento de agua para el aseo

personal o de ropa se hace quemando gas y, en menor medida, mediante el consumo de electricidad. En nuestra casa son múltiples las necesidades que se satisfacen consumiendo electricidad, por ejemplo, la elevación de agua del aljibe al tinaco, el lavado de ropa con lavadora, la refrigeración de los alimentos y otros productos, el consumo de información (televisión, teléfono e internet), la diversión (radio, TV, aparatos de sonido, computadora), la iluminación de interiores y exteriores.

Una necesidad básica de los humanos es, desde luego, el alimento. Este es el energético secundario principal para el funcionamiento de cualquier sociedad del planeta. La agricultura es la actividad con la que se obtienen los alimentos, sea de manera personal como en un huerto familiar o en los grandes complejos agroindustriales. Estos últimos funcionan gracias al consumo intensivo y extensivo de energéticos químicos provenientes del petróleo y el gas.

Al nivel social, el transporte de personas y bienes de consumo se organiza en complejos sistemas tecnológicos que operan basados principalmente en el consumo de energéticos químicos (petróleo, gas y sus derivados).

En el sector industrial las necesidades son múltiples y variadas: transformación física y química de unos objetos en otros, traslado de objetos del lugar de producción al sitio de consumo y utilización, extracción de minerales, etc. En su mayoría las actividades industriales implican el consumo de energéticos provenientes de los combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón).

Los energéticos, aparte de clasificarlos como primarios y secundarios, también admiten la división en energéticos agotables e inagotables. Los agotables son el carbón, el petróleo, el gas y el uranio, ya que se trata de recursos finitos que se han generado una vez en la Tierra a lo largo de millones de años (por eso se los denomina también como energéticos no renovables). Los inagotables son los que, o bien sus reservas son grandes en comparación con su aprovechamiento, como la geotermia, o son regenerados por la radiación solar que diariamente incide sobre nuestro planeta: viento, caídas de agua, biomasa, la propia radiación solar (y por eso a estos se les designa como energéticos renovables). Los energéticos son aprovechados mediante una amplia variedad de dispositivos técnicos.

Una gran diferencia entre los energéticos agotables e inagotables es su potencial benevolencia con el ambiente. Mientras que los agotables tienen un uso centralizado e intensivo muy contaminante, los inagotables son susceptibles de un consumo menos intensivo, más descentralizado y capaz de ser integrados al am-

biente de maneras potencialmente sustentables. Actualmente, las necesidades sociales se solventan en su gran mayoría con el consumo de energéticos agotables, lo que plantea un problema de supervivencia para la humanidad, tanto porque las actividades sociales no pueden sostenerse basadas en materiales que se agotan, como por la intensa contaminación ambiental que conllevan. Otros problemas de supervivencia relacionados se derivan de los conflictos que suscitan la apropiación de los recursos energéticos agotables en un mundo equipado con armas nucleares.

Vale la pena enfatizar que el necesario tránsito de los energéticos empleados actualmente a los energéticos solamente inagotables plantea problemas estructurales muy serios de naturaleza social, política y económica. Por un lado, la tendencia actual urbanizante y centralista de las sociedades en casi todo el mundo privilegia el consumo extensivo e intensivo de los energéticos agotables, mientras que el desarrollo sustentable socioambiental parece ser compatible con una reestructuración social en sentido contrario y, por tanto, con el consumo descentralizado y poco intensivo de los energéticos inagotables. Por otra parte, la construcción de la infraestructura técnica de los sistemas de aprovechamiento de los recursos inagotables demanda, a su vez, el consumo de recursos energéticos agotables lo que, se espera, no resulte en un impedimento al alcance de la sustentabilidad de la sociedad y el ambiente planetarios.

En resumen, la energía, como propiedad de objetos y asociada a procesos, es un recurso indispensable para la satisfacción de las necesidades básicas de una persona o de la sociedad. Entre las necesidades básicas destacan, por ejemplo: alimentación, hidratación, salud, cobijo (contra sol, viento, lluvia, calor, frío, etc.), iluminación, movilidad, trabajo o empleo, sentido de pertenencia o de identidad. Si para el cumplimiento de cada una de estas necesidades se hiciera un balance nacional, los balances nacionales de energía serían muy diferentes a los que el gobierno o las empresas reportan anualmente.

La satisfacción de cada necesidad requiere de acciones o tareas que conllevan el uso de una u otra forma de energía de proceso (calor, trabajo, electricidad o combinaciones de ellas), generada por el uso de energéticos específicos. Por eso a las tareas se les llama *tareas energéticas*.

Las tareas energéticas se llevan a cabo mediante instrumentos o aparatos técnicos accionados por energéticos, lo que da lugar a que se les caracterice asimismo como dispositivos energéticos.

Pregunta. ¿Cómo es más apropiado satisfacer la tarea energética del calentamiento de agua para bañarse: quemando gas en un boiler o utilizando la radiación proveniente del Sol en un calentador solar?

Pregunta. ¿Crees posible la realización de todas las tareas energéticas personales y sociales con puros energéticos inagotables?

Te recomendamos qué para tener argumentos sólidos en tus respuestas, debes revisar la sección siguiente.

1.5. ENERGÉTICOS EN EL HOGAR

¿Cuáles son las principales necesidades energéticas de un hogar? ¿Con qué energéticos y con qué dispositivos técnicos son satisfechas? ¿Qué formas de energía se manifiestan en el procesamiento de los energéticos? ¿Qué ley de la termodinámica gobierna las transformaciones de unas energías en otras?

Ni la energía ni los energéticos son un fin en sí mismos. Ambos aparecen como elementos básicos en la satisfacción de necesidades humanas y ahora, debe de reconocerse, también del ambiente. Por ello es importante analizar los usos a los que se destinan los energéticos, las formas de energía que aparecen en el proceso de utilización y la eficiencia de los dispositivos técnicos que los consumen. Empezaremos por lo que sucede en el hogar, que es el soporte de nuestra persona y con lo que estamos más familiarizados. El cuadro 1.1 puede plantearse para cada uso final de los energéticos, es decir, una tabla semejante podría describirse para el sector transporte, el agrícola, el industrial, etcétera.

El cuadro 1.1 tiene la conveniencia de que nos permite reflexionar sobre el mejor uso de los energéticos, por un lado y, por otro, nos permite ver que las tareas necesarias a desarrollar en cada uso final tienen que ver con el tipo de sociedad que se desea.

Algunos ejemplos de energéticos son los descritos en la caja 1.0.

CAJA 1.0. ALGUNOS ENERGÉTICOS NOTABLES

Un energético es una sustancia con energía de alguna forma, capaz de producir calor, trabajo mecánico o electricidad. El energético, para poder generar energía en tránsito en cualquiera de las tres formas anotadas, debe estar en un estado de desequilibrio con otros objetos del entorno. Una vez que el energético alcanza el equilibrio con los otros cuerpos, desaparece o se destruye.

- i) Una masa de agua, a cierta altura, h , sobre el nivel del suelo, como en una represa. La masa de agua tiene energía potencial gravitatoria y está en desequilibrio con la Tierra debido a su altura sobre la superficie promedio del mar de esta. Si se deja correr el agua hacia abajo, puede generar trabajo mecánico (por ejemplo, en molinos y telares) o electricidad (en una hidroeléctrica).
- ii) Una masa de aire a alta presión, con respecto a la presión atmosférica normal del aire circundante. El desequilibrio de la masa de aire es en presión, que tiende a desaparecer al circular el aire como viento. Este puede utilizarse para efectuar trabajo mecánico (en molinos), o generar electricidad (aerogeneradores eléctricos). Una vez que la presión entre las masas de aire se iguala, el recurso energético eólico desaparece o se destruye.
- iii) Una masa de vapor a alta temperatura respecto del ambiente, por ejemplo, en un yacimiento geotérmico, tiene energía interna que puede utilizarse para generar electricidad o calentar interiores. Una vez que la temperatura de la masa de vapor y la del ambiente son la misma, este recurso geotérmico desaparece.
- iv) Una masa de leña, bagazo de caña, residuos de la madera, residuos de siembras, etc., contiene energía acumulada por la fotosíntesis solar en vegetales, con potenciales químicos diferentes de la atmósfera o el entorno terráqueo.
- v) La radiación solar directa.
- vi) Una masa de carbón mineral, petróleo o gas, contiene energía química. La diferencia de composición química, o desequilibrio químico con el ambiente, capacita a estos recursos fósiles a generar trabajo, calor o electricidad al quemarlos. Una vez que se los quema, se destruyen como energéticos y dejan productos de esa descomposición como contaminantes del ambiente.

De los energéticos mencionados, solamente los del último inciso son no renovables (y, por tanto, son agotables). Los primeros, si se los utiliza a ritmos adecuados, son potencialmente renovables (y, por tanto, inagotables).

La destrucción de los energéticos provoca cambios energéticos, entre los varios objetos que interactúan a causa de ello, pero de tal forma que se cumple el principio de conservación de la energía. Es decir, la energía total de los objetos involucrados, antes y después de las transformaciones energéticas, se conserva, aunque como energéticos se destruyen.

En lo sucesivo se emplearán los conceptos de energía y energéticos como sinónimos, aunque el lector debe mantener claras las diferencias. La energía es propiedad de un objeto, en tanto que como energético es propiedad de al menos otro objeto con el cual se halla en desequilibrio.

CUADRO 1.1. LA ENERGÍA EN EL HOGAR

NECESIDADES (TAREAS ENERGÉTICAS) BÁSICAS	FORMAS DE ENERGÍA (ENERGÍA ÚTIL)	DISPOSITIVOS TÉCNICOS	ENERGÉTICOS
Cocción de alimentos.	Calor, trabajo eléctrico.	Estufas de gas, de leña y eléctricas; hornos de gas, eléctricos y microondas.	Gas, leña, Sol, electricidad.
Calentamiento de agua.	Calor, energía interna.	Calentador de gas, solar, eléctrico, leña, virutas.	Gas, leña, Sol, electricidad.
Subida de agua de la cisterna al tinaco.	Trabajo mecánico, energía gravitatoria.	Bombas eléctricas, solares, de viento, de gasolina, de diésel.	Electricidad, Sol, viento, gasolina, diésel.
Illuminación.	Energía radiante.	Focos, ocote, petróleo diáfano, velas.	Electricidad, leña, petróleo.
Lavado de ropa.	Trabajo mecánico de agitación de agua y ropa.	Lavadora eléctrica o de pedales.	Electricidad, trabajo humano.
Refrigeración.	Calor, energía interna.	Refrigerador.	Electricidad, Sol.
Información.	Energía radiante.	PC, televisión.	Electricidad, Sol.
Música	Energía mecánica ondulatoria.	Tocadiscos, PC, TV.	Electricidad, Sol.

Fuente: elaboración propia.

Pregunta. Revisa con cuidado el cuadro 1.1. ¿Con qué otras necesidades energéticas o dispositivos puedes complementarlo?

Cocción de alimentos

La tarea termodinámica consiste en la elevación de la temperatura de la sustancia, mediante el aumento de su energía interna, con el fin cocerla o guisarla y así transformarla en comestible. Si el utensilio de preparación es una olla o una sartén, el aumento de energía interna de la sustancia ahí contenida se consigue mediante la energización por calor, aprovechando la diferencia de temperatura entre la parrilla y el utensilio. La parrilla, a su vez, se energiza y su temperatura aumenta por la flama, si se trata de estufas de gas o leña, o bien por el soporte caliente de una estufa eléctrica. En una estufa solar la radiación incide directamente sobre la sustancia a cocer una vez que se la concentra mediante espejos o lentes ópticas.

El cocimiento en horno de microondas es un poco más complejo de analizar, pero si nos damos cuenta de que en el horno no hay diferencia de temperatura entre la sustancia a cocer y el dispositivo, entonces el proceso de aumento de su energía interna (y, por consiguiente, de su temperatura) no es por calor, sino por trabajo eléctrico del horno.

Los energéticos consumidos en la tarea de cocción son gas, leña, radiación solar, y, si se emplean dispositivos que consumen electricidad, entonces los energéticos primarios consumidos son los que se emplean para producir esa electricidad (en porcentajes decrecientes, en el año 2017 para México: energéticos agotables 84.4%, energéticos inagotables: 15.6%).

Pregunta. ¿Qué aspectos intervienen en la selección de ciertos energéticos y dispositivos técnicos, en la cocción de algunos alimentos como las tortillas? Si las pizzas se pueden cocer en un horno de gas, ¿por qué muchas personas prefieren las pizzas “a la leña”?

CAJA 1.1. CALOR, TRABAJO Y ENERGÍA INTERNA. PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

Con el fin de precisar los tres conceptos anteriores y la primera ley de la termodinámica que los relaciona, veamos el ejemplo de un gas encerrado en un cilindro provisto de un émbolo en su parte superior, donde se sitúa un objeto de cierta masa. Ver la figura 1.1

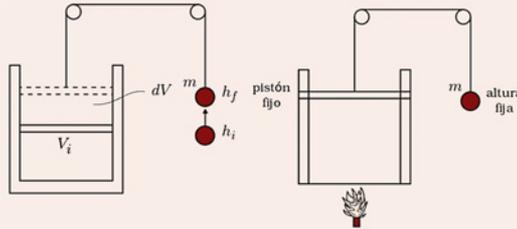


Figura 1.1. Gas encerrado en un cilindro con embolo o pistón

(A las paredes, como las hechas de metal que dejan pasar energía por calor, las representamos por una línea simple y se las denomina diatérmicas; las que lo impiden, como el asbesto, las dibujamos con líneas dobles y se llaman adiabáticas).

Hay dos maneras de afectar la energía interna (U) del gas encerrado en el cilindro: por calor (Q) o por trabajo (W). Si el gas está rodeado de paredes adiabáticas, la compresión del volumen del gas por la elevación del objeto de masa m situado en el brazo derecho de las poleas, provoca que aumente la energía interna del gas por trabajo,

$$\Delta U = \Delta U_W = W$$

Si la pared superior se fija y la inferior se convierte en diatérmica y se conecta con una flama, la energía interna aumenta solamente por calor,

$$\Delta U = \Delta U_Q = Q$$

Si el pistón se deja libre y la pared inferior se somete a una flama, los efectos combinados son por calor y por trabajo, de suerte que el principio de la conservación de la energía estipularía que el cambio en la energía interna del gas sería

$$\Delta U = \Delta U_Q - \Delta U_W = Q - W$$

(El signo negativo enfrente de W indica que, por convención, el trabajo es negativo si este se hace sobre el gas, en tanto que es positivo si el gas hace trabajo sobre el exterior. El signo positivo enfrente de Q , por convención, indica que la energía interna del gas aumenta por calor si la temperatura del objeto externo, la flama, es mayor que la del gas, y negativo en caso contrario, por ejemplo, cuando en vez de flama se tuviera un bloque de hielo. La ecuación anterior es la primera ley de la termodinámica).

Una aplicación inmediata de la primera ley a la expansión libre de un gas nos permite criticar la definición generalizada de que “la energía es la capacidad para hacer trabajo”. Inicialmente, el gas está encerrado en la mitad izquierda de un cilindro aislado adiabáticamente del exterior; en la mitad derecha hay vacío. Al removerse la pared de separación el gas se precipita sobre el vacío y finalmente ocupa todo el interior del cilindro. La aplicación de la primera ley al proceso de expansión libre del gas nos indica que la energía interna permanece constante, pues tanto Q como W son nulos, es decir: $\Delta U = U_f - U_i = Q - W = 0$, o sea $U_f = U_i$. Pero, a pesar de que la energía no ha cambiado, en la situación inicial el gas puede efectuar trabajo, mientras que al final esa capacidad se ha destruido.

Es importante darse cuenta de que la ecuación $\Delta U = Q - W$ se aplica a un sistema u objeto bien definido y acotado y que, dependiendo de dónde se sitúen sus fronteras, los intercambios de energía por calor o por trabajo pueden ser nulos o diferentes de cero. Considérese, por ejemplo, el calentamiento de agua contenida dentro de un recipiente de paredes adiabáticas, mediante una resistencia eléctrica conectada por alambres (que atraviesan las paredes) a la red. Si se considera como sistema todo lo contenido dentro de las paredes adiabáticas, entonces $Q = 0$ y $\Delta U = -W$, siendo W el trabajo eléctrico de la red, que es negativo por convención, de modo que la energía interna del agua y la resistencia aumentan. Pero si el sistema es solamente el agua, en cambio $Q \neq 0$, siendo $\Delta U = Q$, representando Q la transferencia de energía por calor de la resistencia al agua.

Conviene recalcar que los procesos de calor y trabajo solamente pueden ocurrir entre dos o más objetos cuando hay un desequilibrio entre ellos. El calor sólo se presenta cuando hay una diferencia de temperatura entre dos o más objetos (como entre una olla con agua y la flama en una estufa), y el trabajo, sólo cuando hay alguna fuerza desequilibrada entre dos o más objetos (como la fuerza de atracción gravitatoria entre una piedra situada a una altura finita del suelo, y la Tierra).

Pregunta. Analiza nuevamente la cocción de un pedazo de carne en un horno de microondas y responde: ¿Se cuece la carne por calor o por trabajo? ¿Cómo cambia tu respuesta si la primera ley se aplica a todo lo que está dentro del horno, o si se aplica sólo al tejido de la carne?

Calentamiento de agua

Esta tarea termodinámica se requiere para el aseo personal y en el lavado de ropa y trastes. La temperatura del agua se eleva aumentando su energía interna, ya sea por calor o por trabajo eléctrico. Los dispositivos técnicos comunes son calentadores de gas, leña o eléctricos, o mejor, calentadores solares. Los energéticos consumidos son gas, leña y aquellos destruidos al generar electricidad y radiación solar.

Pregunta. Los datos de una familia mexicana, compuesta de 7 adultos, registran el consumo de 12 tanques de 30 kg de gas LP al año, que se reduce a solo 2 tanques después de la instalación de un calentador solar de agua. ¿Cuál es la proporción de gas consumido en el calentamiento de agua (aseo personal y lavado de trastes y ropa), y cuál es la proporción de gas consumido en la cocción de alimentos? ¿Cuál es el porcentaje de ahorro de gas al introducir el calentador solar de agua?

Si el calentador solar costó \$14,000 pesos y un tanque de gas \$300 pesos, ¿en cuánto tiempo se recupera la inversión? ¿Cómo se compara este tiempo con los 15 años que es la vida útil del calentador, según el vendedor?

Subida de agua de la cisterna al tinaco

Tanto en los hogares urbanos como en los rurales es necesario elevar el agua de pozos, cisternas y demás depósitos, hasta las tomas de agua o los tinacos. En zonas rurales deprimidas a veces hay que transportar el agua desde lugares muy lejanos a la vivienda. La elevación de agua corresponde a la creación de energía potencial gravitatoria, mgh , siendo m la masa de agua y h la altura. Las bombas de elevación pueden ser accionadas quemando gasolina o consumiendo electricidad de la red y, en menor medida en nuestro país, empleando viento y radiación solar.

Lavado de ropa

La forma de energía involucrada es energía mecánica cinética de agitación y tallado, que se puede obtener empleando aparatos eléctricos. En el sector rural es común el empleo de las manos solamente, pero, tanto en los sectores urbanos como

en los rurales, es posible el uso de lavadoras a pedales. Los energéticos consumidos son los asociados a la generación de electricidad.

La suma de todos los hogares del país del cuadro 1.1, nos daría el consumo nacional de energéticos del sector doméstico, por tareas, dispositivos y formas de energía involucradas. Y si en las encuestas estadísticas se anotaran las características socioeconómicas del hogar, se dispondría de un panorama social diferenciado de los datos registrados. En general, la calidad de vida suele estar asociada al nivel de consumo de los energéticos procesados en el hogar. Pero, hoy en día, ya no puede descartarse que la calidad de vida tenga que ver con el tipo de energéticos consumidos y la intensidad con que se los emplean. Las opciones extremas diferenciadas parecen ser: energéticos inagotables con usos desconcentrados de baja intensidad en las zonas rurales marginadas vs. energéticos agotables con usos muy concentrados de alta intensidad en las áreas urbanas. Ambas opciones muestran, mirando solamente los hogares, cómo lo local a corto plazo es muy capaz de afectar lo global a largo plazo.

Cuadros análogos al cuadro 1.1 pueden elaborarse en la satisfacción de otras necesidades correspondientes a otros sectores de la sociedad, como el transporte, la agricultura, la industria, etc. En realidad, un planteamiento alternativo a las estadísticas oficiales y de las empresas consiste en la enumeración de las necesidades humanas básicas a satisfacer, elaborando un cuadro especial correspondiente a cada una de ellas; así habría que disponer de los cuadros de alimentación, aseo, recreación, vivienda, educación, transporte, etcétera.

Pregunta. Si las estadísticas nacionales reportaran el consumo de los energéticos destinados directamente a la satisfacción de las necesidades humanas básicas, ¿Qué necesidad se llevaría el principal consumo? ¿Cuál necesidad el último?

CAJA 1.2. FORMAS DE ENERGÍA

Aparte de las formas de energía ya mencionadas (potencial gravitatoria, cinética, etc.) tenemos otras dos formas importantes.

Energía química

Siempre que hay una fuerza atractiva entre dos objetos, como entre la piedra y la Tierra, existe una forma de energía potencial entre ambos objetos, que depende de la distancia de separación entre ellos. De hecho, se puede demostrar que la energía potencial entre la piedra y la Tierra depende de la distancia entre sus centros de gravedad (cuando los objetos son homogéneos, el centro de gravedad coincide con su centro geométrico).

En el sistema planetario, la energía potencial total es aproximadamente igual a la suma de las energías potenciales de los objetos planetarios, de unos con respecto a los otros.

Entre las moléculas de los objetos materiales hay también fuerzas atractivas, de modo que se puede asociar una energía potencial (o energía de amarre), que dependerá de la distancia de separación entre ellas. La suma de todas las energías de amarre de un objeto ordinario, compuesto de muchas moléculas, al menos en una descripción clásica (no cuántica), compone lo que se puede llamar la energía química del objeto.

Cuando, por ejemplo, un pedazo de carbón mineral se “quema”, ocurren reacciones químicas capaces de “liberar” la energía de amarre del carbón. Los productos de la reacción química, por ejemplo, el dióxido de carbono, adquieren energías cinéticas elevadas, de modo que la temperatura aumenta muy por encima del valor que tenía antes de que las reacciones ocurrieran y, por eso, se intercambia energía por calor con los objetos circundantes (el aire entre ellos), que están a menor temperatura. Si este carbón se quema en una caldera, será capaz de calentar el agua en contacto con ella.

Energía eléctrica

Los buenos conductores de electricidad, como los metales, están compuestos de átomos en donde sus electrones pueden moverse fácilmente de un núcleo a otro cuando a la pieza de metal se la somete a una diferencia de potencial eléctrico (como el generado por una pila). Esto no sucede con los materiales considerados aislantes (madera, cartón, plástico), donde los electrones están fuertemente ligados a los núcleos de sus átomos.

Los electrones, cargados negativamente, se mueven en el sentido en que el potencial eléctrico disminuye, de manera parecida al agua que desciende espontáneamente de la región de mayor a menor energía potencial gravitatoria. Los electrones forman así una corriente dentro del metal conductor, que transporta energía; a esta forma de energía se le denomina energía eléctrica.

La energía eléctrica se puede generar en plantas termoeléctricas operadas mediante la quema de combustibles fósiles; en plantas hidroeléctricas que aprovechan las caídas de agua; en aerogeneradores, que utilizan el viento; en grandes torres solares, donde la radiación solar calienta un fluido que a su vez mueve una turbina y un generador eléctrico; etcétera.

En todas las plantas mencionadas la corriente eléctrica se produce de manera gigante y muy centralizada por la transformación del movimiento de pesadas turbinas, mediante un generador.

Después de generar la corriente eléctrica en la planta productora, se la transporta por líneas metálicas de alto potencial hasta la toma eléctrica de uso final que puede estar en los hogares, las industrias, los sistemas de transporte (como el Metro), etcétera.

Existe, sin embargo, la opción pequeña y descentralizada, mediante microcentrales hidroeléctricas y aerogeneradores, celdas fotovoltaicas, concentradores solares que acercan el sitio de producción al de consumo y que en general son mucho más benignas con el ambiente y la toma democrática de decisiones que las opciones gigantes y centralizadas.

Refrigeración

Esta tarea termodinámica consiste en la reducción de la temperatura de la sustancia disminuyendo su energía interna por calor, generalmente empleando el trabajo eléctrico de un refrigerador, aunque también los hay solares. Los energéticos consumidos son los involucrados en la generación de electricidad y la radiación solar.

1.6. UNIDADES DE ENERGÍA, ESCALAS Y RAPIDEZ DE UTILIZACIÓN (POTENCIA)

¿Por qué es necesario considerar la rapidez de utilización de los energéticos? ¿Qué relación guarda esta rapidez con el concepto de potencia en física? ¿Cuáles son las unidades de potencia?

La cuantificación de los casilleros de las tablas necesita de la especificación de las unidades con que se expresan la energía y los energéticos. Las unidades provienen de la mecánica, quizá por razones históricas, dado que la mecánica fue la primera de las subramas de la física en aparecer y cuantificarse. Así, un julio de energía (abreviado $1J$) corresponde al trabajo que una fuerza de un newton ($1N$) realiza al aplicarse durante un metro ($1m$).

$$1J = 1N \times 1m$$

Subir un objeto de un kilogramo de masa a una altura de un metro comporta realizar un trabajo de:

$$W = mgh = 1\text{kg} \times 9.8\text{m/s}^2 \times 1\text{m} = 9.8\text{ kg} \times \text{m}^2/\text{s}^2 = 9.8\text{ J}$$

En tareas termodinámicas en las que se eleva la temperatura de una sustancia, inicialmente fue inventada otra unidad: la caloría. Esta unidad fue definida como la energía necesaria para elevar la temperatura de un gramo de agua de 14.5 °C a 15.5 °C, a la presión normal de una atmósfera. Las mediciones experimentales arrojan la siguiente equivalencia entre calorías y julios:

$$1\text{ cal} = 4.185\text{ J}$$

Otra unidad de energía, muy usada en la medición del consumo de electricidad, es el *kWh* (kilowatt hora). Su equivalencia en *J* es:

$$1\text{ kWh} = 1,000\text{ W} \times 3,600\text{ s} = 3.6 \times 10^6\text{ J} = 3.6\text{ MJ}$$

En la satisfacción de una tarea, un factor importante es la rapidez con que ella se realiza. Al cocinar una sustancia es necesario no tardarse demasiado, tanto por la prisa de quien lo requiere como por la sazón del alimento. Enfriar un alimento debe hacerse en un tiempo mucho menor al de descomposición de las sustancias. Al subir el agua del aljibe al tinaco, o al extraer agua del fondo de una mina de carbón, debe superarse la rapidez con que el requerimiento de agua se precisa. Por tanto, la cantidad a definir es la energía procesada entre el tiempo, o sea la Potencia.

La unidad de Potencia es el watt (*W*) que, por definición, es el procesamiento de *1J* de energía en la unidad de tiempo (*1s*):

$$1\text{ W} = 1\text{ J}/1\text{ s}$$

Si, por ejemplo, un objeto de un kilogramo de masa se sube a la altura de un metro en un segundo, la potencia necesaria desarrollada es de:

$$9.8\text{ J}/\text{s} = 9.8\text{ W}$$

Las escalas en que los procesamientos de energía y potencia ocurren pueden ser muy variadas, según la magnitud de los procesos. Por ejemplo, la potencia que

una termoeléctrica puede desarrollar suele ser de unos 300 millones de W, lo que se abrevia 300 MW. Otras escalas, en potencias de diez, son como se observa en el cuadro 1.2.

CUADRO 1.2 MÚLTIPLOS Y SUBMÚLTIPLOS

FACTOR	PREFIJO	SÍMBOLO	FACTOR	PREFIJO	SÍMBOLO
10^{15}	Peta	P	$1/10 = 10^{-1} = 0.1$	Deci	d
10^{12}	Tera	T	$1/10^2 = 10^{-2} = 0.01$	Centi	c
10^9	Giga	G	$1/10^3 = 10^{-3} = 0.001$	Mili	m
$10^6 = 1,000,000$	Mega	M	$1/10^6 = 10^{-6} = 0.000001$	Micro	μ
$10^3 = 1,000$	Kilo	K	$1/10^9 = 10^{-9}$	Nano	n
$10^2 = 100$	Hecto	H	$1/10^{12} = 10^{-12}$	Pico	p
$10 = 10$	Deca	Da	$1/10^{15} = 10^{-15}$	Femto	f
1 = (Unidad básica o compleja sin prefijo)					

Preguntas. ¿Qué potencial solar incide en promedio sobre un metro cuadrado de superficie terrestre? ¿Cuánto vale la energía total solar que incide sobre la superficie terrestre en un año? ¿Cuánto vale la energía total procesada mundialmente por los humanos? ¿Cuántas veces es superior aquella a esta?

Preguntas. ¿Cuántas veces puede la energía solar incidente en un año sobre el territorio nacional satisfacer sus necesidades totales de energía, en caso de existir la infraestructura técnica para aprovecharla? ¿Sería factible aprovechar toda esa energía solar incidente?

1.7. EL EMBARGO PETROLERO DE 1973 Y EL CUADRO 1.1.

¿Por qué es importante el mejoramiento de la eficiencia de los dispositivos técnicos que procesan los energéticos para satisfacer necesidades humanas? ¿Qué relación guarda la pregunta anterior con el embargo petrolero de la Organización de Países Exportadores de Petróleo de 1973?

Los miembros de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) decretaron en 1973 un embargo en contra de los países que habían apoyado a Israel en la Guerra de los Seis Días. El resultado fue una elevación excepcional de los precios del petróleo y una escasez temporal, aunque muy perniciosa, de este energético. Como consecuencia, los países altamente industrializados fueron obligados a reflexionar sobre estrategias de ahorro de petróleo. De gran relevancia fue el mejoramiento de las eficiencias de los dispositivos con que se procesaban los energéticos (tercera columna del cuadro 1.1) y la eficiencia con que se llevaban a cabo las tareas termodinámicas y mecánicas en el seno de sus sociedades (primera columna del cuadro 1.1). A las eficiencias de dispositivos se les llamó eficiencias de primera ley de la termodinámica, y a las eficiencias de tarea, eficiencias de segunda ley de la termodinámica (por razones que veremos enseguida).

La reflexión, continuada más allá del embargo petrolero, hacia la sostenibilidad de la civilización actual, demanda cuestionar el tipo de tareas y energéticos compatibles con el establecimiento de relaciones de armonía entre los seres humanos y el ambiente, así como la naturaleza de los dispositivos mejor capacitados para ser empleados con tal fin.

Las primeras preguntas sobre la eficiencia teórica máxima de los motores térmicos (de funcionamiento parecido a una termoeléctrica actual), ya habían sido formuladas a principios del siglo XIX por Sadi Carnot, y respondidas de manera básicamente correcta. Para responder a la cuestión, Sadi Carnot tuvo que establecer los antecedentes de la ciencia de la termodinámica. Es claro que si se sabe la eficiencia teórica máxima de un dispositivo, la comparación con los dispositivos reales permite determinar el intervalo potencial de mejoramiento técnico de ellos y, por tanto, el ahorro de los energéticos que procesan.

Las disquisiciones sobre las eficiencias de tarea pertenecen al siglo XX, aunque uno de los conceptos clave en su definición, el de “trabajo disponible” (o “exer-

gía”, como se le llama actualmente) ya había aparecido en la segunda mitad del siglo XIX, en los trabajos de Clausius.

Eficiencias de dispositivo o de primera ley, simples y compuestas

Para fijar ideas pensemos en un motor térmico cualquiera, el cual consta de un objeto (la caldera) que se mantiene a alta temperatura (T_1 , en la escala absoluta o de Kelvin), un condensador que está a una temperatura T_2 menor (el cual puede ser la atmósfera o un gran vaso de agua) y, funcionando entre ambos objetos, una sustancia que opera en ciclos generando trabajo W hacia el exterior (figura 1.2). Q_1 es el calor que en un ciclo procesa la sustancia de trabajo con la caldera, y Q_2 es el calor que la sustancia que trabaja procesa con el condensador.

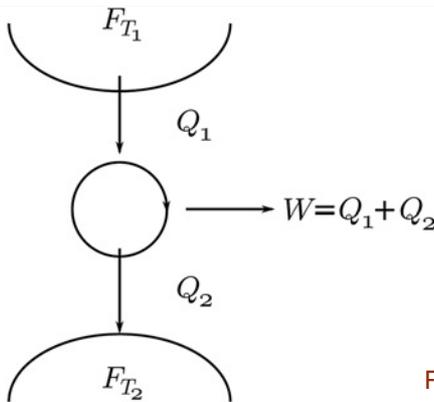


Figura 1.2. Esquema universal de un motor térmico.

El esquema del motor térmico se puede dibujar de manera aún más abstracta mediante una “caja negra”, en la que se procesan tres energías: E_e (energía de entrada); E_s (energía de salida o útil), y E_d (energía desperdiciada). La eficiencia del motor, representada por la letra griega eta (η), es el cociente de la energía útil o de salida y la energía de entrada:

$$\eta = E_s / E_e$$

La energía de entrada generalmente viene del consumo de un energético (por ejemplo, en el motor térmico es el calor procesado de la caldera, obtenido de la combustión de algún hidrocarburo o del carbón) y, por esta razón, una mayor eficiencia de primera ley implica un consumo menor de dicho energético para una energía de salida dada.

El principio de conservación de la energía establece que:

$$E_e = E_s + E_d$$

Con esto,

$$\eta = E_s/E_e = \frac{E_e - E_d}{E_e} = 1 - E_d/E_e$$

La eficiencia máxima es de 1 o 100%, en caso de que no haya energía desperdiciada, pero, como veremos pronto, esto no es posible en los motores térmicos en virtud de la segunda ley de la termodinámica.

En el motor térmico: $Q_1 = E_e$; $Q_2 = E_d$; $W = E_s$.

La aplicación de la primera ley a la sustancia que trabaja, en un ciclo (con $U_f = U_i$, $\Delta U = 0$), conduce a:

$$\Delta U = Q - W = Q_1 - Q_2 - W = 0$$

O sea:

$$W = Q_1 - Q_2$$

Así que la eficiencia del motor térmico es:

$$\eta = W/Q_1 = 1 - Q_2/Q_1$$

Lo común en las aplicaciones energéticas son los sistemas compuestos de más de dos cajas negras. Por ejemplo, un motor térmico, a carbón o a gas, está precedido de una caja que como energía de salida tiene precisamente el carbón o el gas, y como energía de entrada, la energía invertida en el proceso de obtención de esos energéticos. La eficiencia combinada de las dos cajas (ver figura 1.3) es el producto de las eficiencias de cada caja.

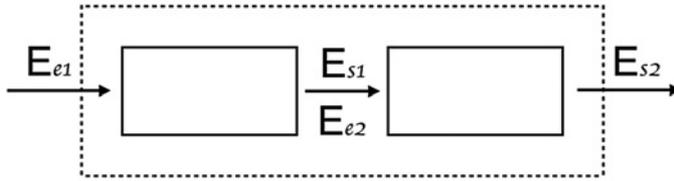


Figura 1.3. Sistema compuesto de dos subsistemas.

La eficiencia compuesta es la de la caja definida por la línea quebrada, con energía de salida E_{s2} y energía de entrada E_{s1} :

$$\eta = \frac{E_{s2}}{E_{e1}} = \frac{E_{s2}/E_{s1}}{E_{e1}/E_{s1}} = \frac{E_{s2}/E_{e2}}{E_{e1}/E_{s1}} = \frac{\eta_2}{1/\eta_1} = \eta_1 \eta_2$$

Se utilizó el hecho de que $E_{s1} = E_{s2}$ y que el primer quebrado no se altera al dividir el numerador y el denominador por la misma cantidad E_{s1} . El mismo resultado se obtiene al sustituir en η : $E_{s2} = \eta_2 \times E_{e2} = \eta_2 \times E_{s1} = \eta_2 \times \eta_1 \times E_{e1}$; la energía E_{e1} queda entonces en el numerador y en el denominador, cancelándose.

Si se tiene un sistema compuesto de N cajas interconectadas, como en el caso de las dos anteriores, del mismo modo se podría demostrar que la eficiencia compuesta vale:

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \dots \eta_{N-1} \eta_N$$

En el caso de la termoeléctrica, la eficiencia de primera ley compuesta de la propia termoeléctrica ($\eta_2 = 0.3$) y el sistema de transporte del gas ($\eta_1 = 0.8$) sería $\eta = 0.8 \times 0.3 = 0.24$. Cuantas más cajas se consideren, la eficiencia compuesta disminuye.

Actividad. Demostrar la fórmula anterior.

1.8. EFICIENCIA MÁXIMA DE MOTORES TÉRMICOS

¿Qué relación hay entre la búsqueda de la eficiencia máxima de los motores térmicos en el siglo XIX, y el desarrollo de la termodinámica como ciencia? ¿Cuáles fueron las aportaciones de Sadi Carnot?

Casi desde la utilización inicial de los motores térmicos, hacia finales del siglo XVIII en Europa los científicos e ingenieros se dedicaron a buscar la eficiencia máxima de operación. Esto con el fin de ahorrar energéticos, el carbón mineral y los costes de operación, pues para entonces una gran proporción de motores operaban con carbón que se transportaba de las minas. Hoy en día esta búsqueda prosigue en todo el mundo, bajo los mismos términos, pero con el importante añadido de disminuir la contaminación y el impacto ambiental, que son de dimensiones planetarias. En 1824 el científico francés Sadi Carnot (1796-1832) calculó la eficiencia teórica máxima de los motores térmicos en su libro titulado *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas aptas para desarrollar esta potencia*.

En la figura 1.4 se muestra el motor térmico del científico inglés Thomas Newcomen (1663-1729), diseñador de uno de los primeros motores térmicos a carbón mineral. En el esquema se pueden reconocer los tres elementos universales de todo motor térmico, según Carnot. Estos motores tenían amplia aplicación en las minas y las industrias.

Pero la quema de los energéticos fósiles envía residuos a la atmósfera que se convierten en ácidos perniciosos para los seres vivos, como el sulfúrico y el nítrico, además de gases de efecto invernadero, como el bióxido de carbono. Por esto, cuanto más eficiente sea la termoeléctrica, menos energéticos requerirá quemar para producir una determinada cantidad de electricidad.

Hay que tomar en cuenta que, según datos del 2007 de la Agencia Internacional de Energía, los combustibles fósiles aportaban el 81% del bióxido de carbono total emitido a la atmósfera (del cual un 32% correspondía a termoeléctricas) y el 19% restante era producido por la deforestación (consultar en la red con la entrada "Agencia Internacional de Energía").

En la búsqueda de motores térmicos más eficientes destacan los inventores ingleses Newcomen, Watt, y varios más. Sadi Carnot observó que la eficiencia de cada modelo sucesivo era mayor que la del anterior, pero que, al parecer, era cada vez más difícil elevar dicha eficiencia. Parecía haber un límite superior a la eficien-

cia dado por alguna ley desconocida de la naturaleza, según el mismo Carnot. El estudio de esa máxima eficiencia condujo a la fundamentación de la ciencia de la termodinámica sobre bases firmes.

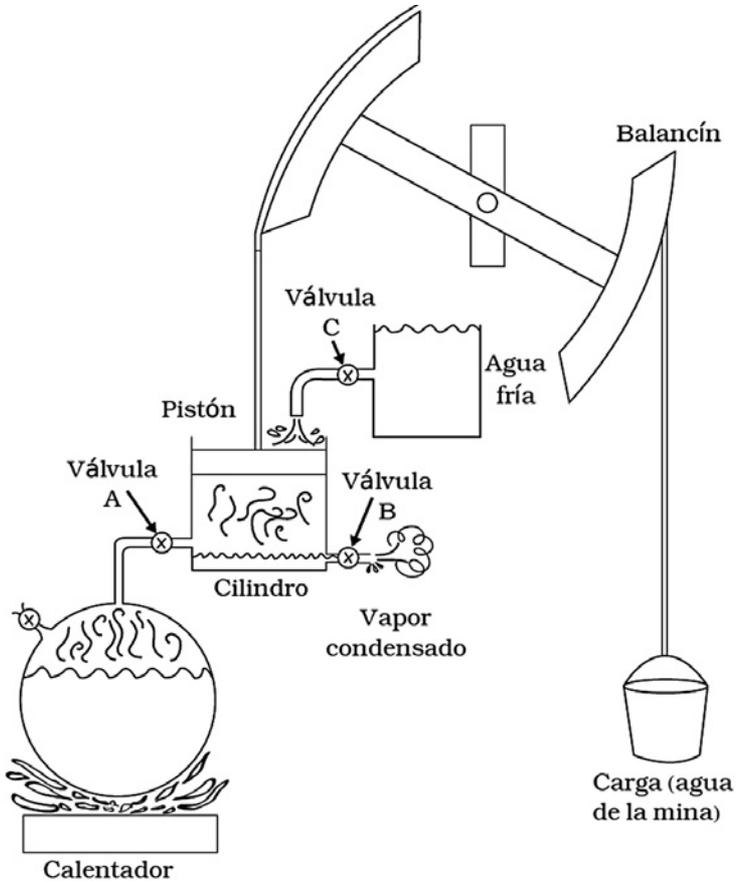


Figura 1.4. El motor térmico de Newcomen.

En la figura 1.5 aparece el motor térmico de Watt, quien logró multiplicar por un factor de casi 3 la eficiencia del motor de Newcomen mediante varias modificaciones, entre las que resalta la separación del condensador.

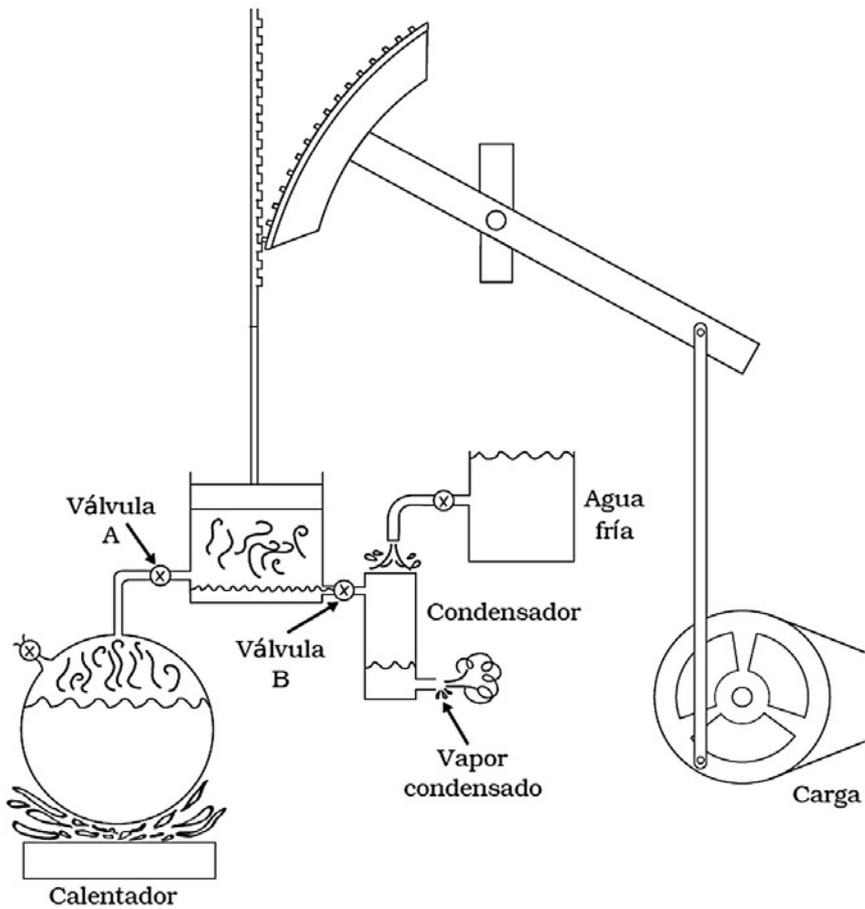


Figura 1.5. El motor térmico de Watt con el condensador separado.

CAJA 1.3. MAQUINARIA Y REVOLUCIÓN INDUSTRIAL

Es creencia general que el motor de Watt fue el factor más importante en la revolución industrial. Sin embargo, el economista Carlos Marx anota en su libro *El Capital*, que tal no es el caso, apoyando su crítica en la observación de que el objeto “máquina” en realidad consta de tres partes: el motor, el mecanismo de transmisión y el mecanismo de aplicación. De estos tres mecanismos, el más revolucionario es el de aplicación porque se presenta dentro de la invención social de la fábrica y, por tanto, en la constitución de las dos clases sociales antagónicas de la burguesía y el proletariado (unos como dueños y otros como asalariados).

Sadi Carnot se basó en los estudios previos de su padre, Lázaro Carnot (1753-1823), quien había estudiado las condiciones bajo las cuales se alcanzaba la eficiencia máxima de los motores gravitatorios o ruedas hidráulicas. Lázaro Carnot estableció el teorema de que la máxima eficiencia de una rueda de agua vertical la alcanzaba una que funcionase bajo condiciones de reversibilidad, es decir, cuando la rueda girase cuasi estáticamente y sin fricción entre sus partes ni con el aire atmosférico. Sadi Carnot formuló un teorema semejante para los motores térmicos.

Teorema de Lázaro Carnot

En la figura 1.6 se representa una rueda de agua vertical en que el agua cae a los cangilones por la parte de arriba.

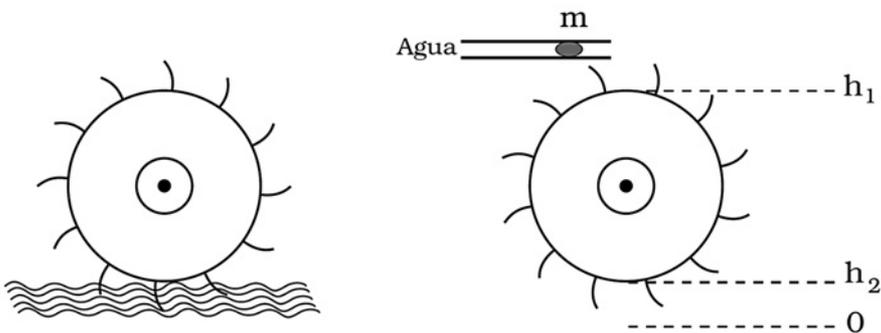


Figura 1.6. La rueda de agua vertical.

Cuando la masa m de agua se deposita en el cangilón a la altura h_1 y avanza a la menor altura h , el principio de conservación de la energía mecánica establece que la energía total del momento inicial mgh_1 , es igual a la energía total de momento subsiguiente:

$$mgh_1 = mgh + E_r + E_f$$

E_r y E_f son las energías de rotación y fricción, respectivamente. La energía de fricción se debe a la interacción del cangilón con el aire, al movimiento del agua en el cangilón, a la fricción del eje de giro de la rueda con el soporte, etcétera.

El trabajo que la rueda puede efectuar sobre el exterior es precisamente la energía de su movimiento, que es la energía de rotación, la cual se obtiene de la ecuación anterior:

$$W = E_r = mgh_1 - mgh - E_f = mgh_1 - (mgh + E_f)$$

La eficiencia de la rueda es el cociente del trabajo, o energía de salida, y la energía invertida o energía de entrada:

$$\eta = \frac{W}{mgh_1} = \frac{mgh_1 - mgh - E_f}{mgh_1}$$

La máxima eficiencia se alcanza cuando $E_f = 0$, en cuyo caso:

$$\eta_{max} = \frac{h_1 - h}{h_1}$$

El valor de η_{max} va aumentando conforme h va decreciendo desde el valor 0 cuando la altura es máxima (h_1), hasta el máximo valor posible cuando la altura llega a su mínimo valor h_2 . Vamos a seguir designando con la misma expresión el valor más alto de la eficiencia, con el fin de no complicar la notación. Entonces:

$$\eta_{max} = 1 - \frac{h_2}{h_1}$$

Este resultado se puede obtener empleando el esquema de la caja negra. Si definimos a la energía de salida como la de rotación:

$$E_s = E_r = E_e - E_d$$

Entonces:

$$E_e = mgh_1 \quad \text{y} \quad E_d = mgh + E_f$$

Así que:

$$\eta = \frac{E_r}{E_e} = \frac{E_e - E_d}{E_e} = 1 - \frac{E_d}{E_e} = 1 - \frac{mgh + E_f}{mgh_1}$$

Obviamente la eficiencia es máxima cuando la rueda opera sin fricción, $E_f = 0$ (teorema de Lázaro Carnot).

El valor numérico mayor para la eficiencia máxima se obtiene cuando h toma su mínimo valor, h_2 :

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{mgh_2}{mgh_1} = 1 - \frac{h_2}{h_1}$$

La eficiencia máxima exhibe un comportamiento notable: su valor solamente depende de la altura máxima y mínima, y no de las particularidades del diseño de la rueda ni de la sustancia que trabaja.

La eficiencia máxima se puede expresar en términos del trabajo máximo como:

$$\eta_{\max} = \frac{W_{\max}}{mgh_1}$$

Por tanto:

$$W_{\max} = \eta_{\max} mgh_1 = \left(1 - \frac{h_2}{h_1}\right) mgh_1 = mg(h_1 - h_2)$$

Pregunta. Demuestra que la eficiencia máxima es directamente proporcional al diámetro de la rueda e inversamente proporcional a la altura h_1 . ¿Quiere esto decir que la eficiencia máxima es mayor en Acapulco que en la Ciudad de México?

Teorema de Sadi Carnot

Sadi Carnot observó el tratamiento de su padre y notó la analogía entre el motor térmico y el hidráulico si se consideraba al calor como un fluido, y a la temperatura como la altura o caída del fluido.

El teorema correspondiente de Sadi Carnot diría que la eficiencia máxima de un motor térmico, trabajando entre una caldera a temperatura de gas ideal o perfecto (que luego sería la temperatura absoluta o de Kelvin) T_1 , y un condensador a temperatura T_2 , es la de un motor reversible.

Por tanto, en analogía con $\eta_{\max} = 1 - \frac{h_2}{h_1}$:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Como en el caso de la rueda hidráulica reversible, el valor máximo de la eficiencia solamente depende del cociente de las temperaturas mínima y máxima, pero no del diseño del motor ni de la sustancia que trabaja.

La expresión correspondiente al trabajo máximo del motor térmico reversible es:

$$W_{\max} = \eta_{\max} Q_1 = Q_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = \frac{Q_1}{T_1} (T_1 - T_2)$$

Nótese que del valor máximo de la eficiencia de un motor reversible se puede deducir una importante relación entre calores y temperaturas absolutas. Por un lado:

$$\eta_{\max} = \frac{W_{\max}}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Y por otro:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Comparando ambas expresiones, se obtiene el resultado sólo válido para motores térmicos reversibles:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

Esta expresión es básica en la obtención de la eficiencia máxima de otros dispositivos térmicos.

Pregunta. Si $h_1 - h_2$ es el diámetro de la rueda, ¿a qué corresponde $T_1 - T_2$?

1.9. SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA Y CONTAMINACIÓN TÉRMICA MÍNIMA

¿Por qué de todas maneras contamina térmicamente un motor térmico, aunque funcione reversiblemente? ¿A qué se debe? ¿Cuánto vale esa contaminación mínima?

En el caso térmico, aunque la fricción se logre anular, de todos modos habrá una energía disipada en forma de calor al condensador. Esto es una consecuencia de la segunda ley de la termodinámica la que afirma, en la formulación de Planck, que:

Es imposible construir un motor térmico que, trabajando en un ciclo, convierta íntegramente en trabajo el calor procesado desde la caldera.

Es decir, no se puede evitar contaminar mínimamente el ambiente con una cantidad mínima de calor Q_2 .

La figura 1.7 muestra el motor que no puede construirse, según la versión de Planck de la segunda ley de la termodinámica.

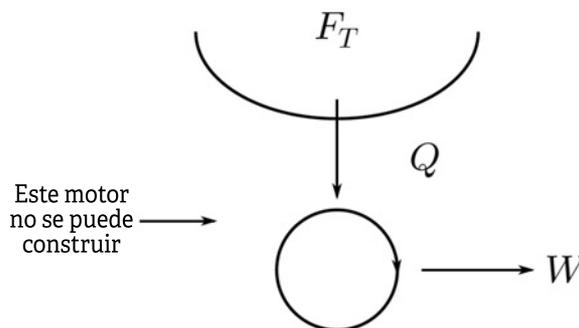


Figura 1.7. Enunciado de Planck de la segunda ley de la termodinámica. La construcción de este motor es imposible.

Para una energía de entrada fija Q_1 , el valor máximo del trabajo obtenible en un ciclo es $W_{\max} = Q_1 - Q_{2,\min}$, siendo $Q_{2,\min}$ el mínimo valor alcanzable, que es en las condiciones de reversibilidad o de máxima eficiencia.

$Q_{2,\min}$ se puede calcular de la ecuación anterior, pues:

$$Q_{2,\min} = Q_1 - W_{\max} = Q_1 - Q_1 \eta_{\max} = Q_1 (1 - \eta_{\max}) = \frac{T_2}{T_1} Q_1$$

Pregunta. Un lago circular de 10 km de diámetro y 10 m de profundidad, actuando como condensador de una planta nuclear de 600 MW, es energizado cada segundo con $Q_2 = 1,400$ MW. Suponiendo que la energización del agua es uniforme y que no hay pérdidas de energía a la tierra y el aire circundantes, ¿En cuánto tiempo empieza a hervir el agua del lago?

Ahora bien, de la segunda ley de la termodinámica, como la concibe Planck, se puede deducir que la entropía es una propiedad física de todo sistema termodinámico. O, a la inversa, la segunda ley puede formularse en términos de la entropía: En todo sistema termodinámico aislado, en cuyo interior ocurre un proceso espontáneo que lo aleja del estado inicial de equilibrio, el sistema evolucionará al estado de máxima entropía. Ejemplo: en el caso visto de la expansión libre de un gas confinado en la mitad de un recipiente aislado, al quitar o desaparecer la pared de separación entre el gas y el vacío, el gas ocupará irreversiblemente como estado final todo el interior del recipiente, estado que corresponde al de máxima entropía. Por esto, a la segunda ley también se la suele denominar como “principio del incremento de la entropía”. De aquí puede demostrarse también que todos los procesos termodinámicos en la naturaleza son irreversibles y que en todos ellos la entropía aumenta sin remedio (para más detalles, ver Martínez, 2011).

1.10. EFICIENCIAS MÁXIMAS DE OTROS DISPOSITIVOS TÉRMICOS

¿Qué otros dispositivos térmicos, aparte de los motores térmicos, se utilizan con profusión actualmente? ¿Cuáles son sus eficiencias máximas teóricamente posibles? ¿Por qué es necesario conocerlas para ahorrar energéticos, sobre todo petróleo y gas?

En tiempos de Carnot, su teorema pudo dar cuenta del potencial de ahorro de energéticos al comparar el funcionamiento real de un motor térmico con uno reversible. Hoy en día hay otros dispositivos térmicos que también requieren del conocimiento de su máximo rendimiento para saber las posibilidades de un consumo más eficiente de recursos energéticos, y así maximizar el ahorro.

CAJA 1.4. POTENCIAL DE AHORRO DE ENERGÉTICOS DE UN MOTOR TÉRMICO

El potencial ahorro de energéticos para un motor térmico real que opera entre una caldera a T_1 y un condensador a T_2 se obtiene así: Supongamos que el motor real utiliza una cantidad de calor Q_1 de la caldera, generando un trabajo W , que se requiere como condición de operación. Si se emplea en vez un motor reversible en estas condiciones, utilizará una cantidad de calor mínima (sea $Q_{1\min}$) para generar el mismo W (pues el motor reversible es el de máxima eficiencia). Entonces:

$\eta = \frac{W}{Q_1}$ es la eficiencia del motor real, en tanto que $\eta_{\max} = \frac{W}{Q_{1\min}}$ es la eficiencia del motor reversible.

De ellas se obtienen los valores:

$$Q_1 = \frac{W}{\eta} \quad \text{y} \quad Q_{1\min} = \frac{W}{\eta_{\max}}$$

El potencial de ahorro es la diferencia entre el calor real y el mínimo posible:

$$\Delta Q = Q_1 - Q_{1\min} = Q_1 \left(1 - \frac{Q_{1\min}}{Q_1} \right) = Q_1 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_{\max}} \right)$$

La segunda igualdad es una identidad algebraica y la tercera se obtiene del cociente de los calores en función de las eficiencias. Como Q_1 es proporcional al energético, la expresión anterior nos dice que su potencial de ahorro aumenta al acercarse el funcionamiento del motor a la reversibilidad. Si un motor real alcanzara la eficiencia de un motor reversible, ya no podría ahorrar más combustible y el potencial de ahorro sería de cero.

Pregunta. Una carboeléctrica de 300 MW que quema lignito (con poder calorífico de 10 MJ/kg), opera con eficiencia de $1/3$, quemando por tanto 90 kg en cada segundo de operación. Estima ¿cuánto carbón se puede ahorrar como máximo en un segundo si la temperatura del condensador (el ambiente) es de 20°C y la temperatura de la caldera es de 600°C ? ¿A cuántas toneladas de lignito (carbón marrón) equivale el ahorro en un día?

Refrigerador térmico

Un refrigerador térmico opera en ciclos de manera inversa a un motor térmico (figura 1.8).

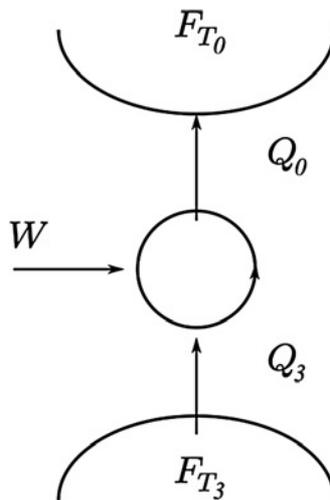


Figura 1.8. Refrigerador térmico.

Se tiene que invertir trabajo W para extraer energía por calor Q_3 del objeto frío a temperatura T_3 .

Un refrigerador reversible es el que, para un Q_3 dado, opera con el mínimo trabajo posible, W_{\min} . También, al invertir el sentido de operación de un refrigerador, se invierten las entradas energéticas en el motor reversible correspondiente.

La segunda ley de la termodinámica también se puede formular, como hizo Clausius, en términos de refrigeradores:

Es imposible construir un refrigerador que, funcionando en un ciclo, pase energía por calor de un objeto frío a uno caliente sin que se invierta trabajo para ello.

En otras palabras, no hay refrigeradores que funcionen gratuitamente. Lo análogo de la formulación de Clausius para motores hidráulicos sería: es imposible construir una rueda de agua vertical que, funcionando en un ciclo, pase agua de la parte inferior a la superior sin que se invierta trabajo para ello.

En los textos de termodinámica se demuestra que los enunciados de Planck y Clausius de la segunda ley de la termodinámica son equivalentes. También, de tales enunciados se puede deducir el teorema de Sadi Carnot, es decir, el motor de máxima eficiencia es el motor reversible funcionando entre la misma caldera y el mismo condensador.

Ahora bien, en un refrigerador la energía útil es el calor Q_3 , en tanto que la energía de entrada es el trabajo W , mientras que Q_0 es la energía que por calor pasa al ambiente que está a la temperatura T_0 (figura 1.9). Al cociente de las dos primeras energías se le llama coeficiente de desempeño (COP, por las siglas en inglés de *coefficient of performance*). El máximo COP corresponde a un refrigerador reversible que se puede calcular en términos de las temperaturas, como sigue:

$$COP_{\max} = \frac{Q_2}{W_{\min}} = \frac{Q_2}{Q_2 - Q_0} = \frac{1}{\frac{Q_0}{Q_2} - 1} = \frac{1}{\frac{T_0}{T_2} - 1}$$

La última igualdad se deduce de la ecuación demostrada que conecta calores con temperaturas para un motor reversible:

$$\frac{Q_0}{Q_2} = \frac{T_0}{T_2}$$

Esta ecuación se obtiene al invertir la operación del refrigerador que lo convierte en un motor térmico reversible y al aplicarle el teorema de Sadi Carnot:

$$\eta_{\max} = \frac{Q_3}{Q_0} = 1 - \frac{T_3}{T_0}$$

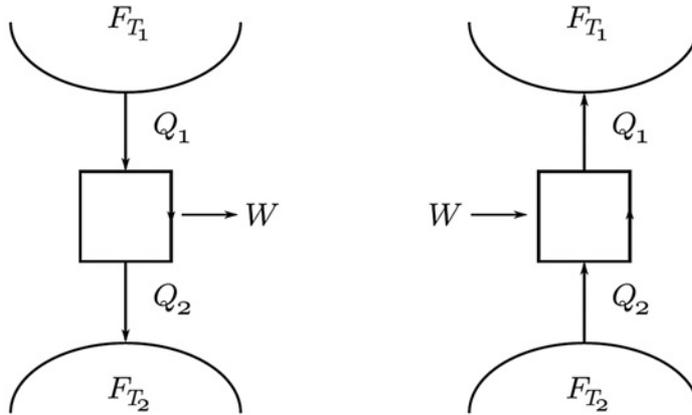


Figura 1.9. Refrigerador y motor reversible correspondiente.

Bomba de calor eléctrica

Una bomba de calor extrae energía del ambiente y la pasa por calor a una habitación, de acuerdo al esquema de la figura 1.10.

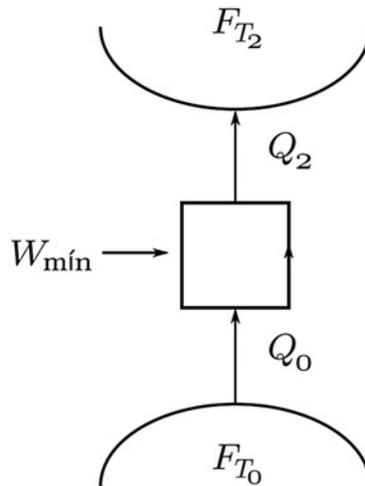


Figura 1.10. Bomba de calor.

La bomba de calor reversible es la de COP máximo, es decir, la que ocupa el trabajo eléctrico mínimo. Por esto:

$$COP_{\max} = \frac{Q_2}{W_{\min}} = \frac{Q_2}{Q_2 - Q_0} = \frac{1}{1 - \frac{Q_0}{Q_2}} = \frac{1}{1 - \frac{T_0}{T_3}}$$

La última igualdad se obtiene, como en el refrigerador reversible, poniendo a funcionar la bomba como motor reversible, por lo que

$$\frac{Q_0}{Q_2} = \frac{T_0}{T_2}$$

Calentador por calor

Un calentador por calor energiza por calor un recinto a T_2 mediante calor Q_1 procesado de un quemador de combustible fósil o biomásico a T_1 (o por calor procesado de una planta geotérmica o proveniente de calentadores solares). En la figura 1.11 se describe el esquema de operación de un calentador por calor reversible.

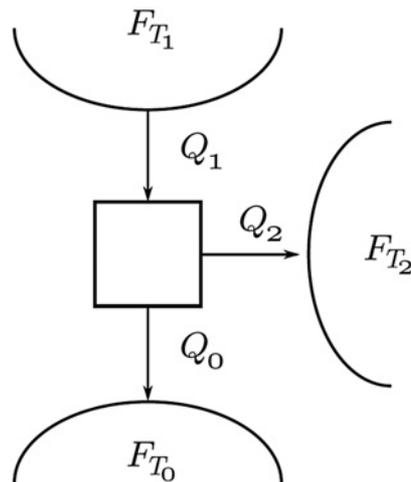


Figura 1.11. Calentador por calor.

Aunque no es trivial, se puede demostrar que:

$$COP_{\max} = \frac{1 - T_0/T_1}{1 - T_0/T_1}$$

Este resultado se alcanza descomponiendo el calentador por calor en un motor y una bomba acoplados, como en la figura 1.12.

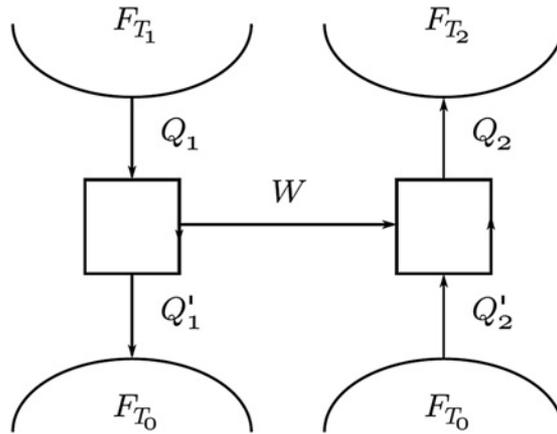


Figura 1.12. Calentador a calor equivalente a motor y bomba acoplados.

El COP_{\max} se deduce de la identidad algebraica para el cociente de calores:

$$\frac{Q_{2\max}}{Q_{1\min}} = \frac{Q_{2\max}W}{WQ_{1\min}} = \frac{Q_{2\max}}{W} \frac{W}{Q_{1\min}} = COP_{\max} \eta_{\max}$$

Resta nada más sustituir los valores ya deducidos de COP_{\max} de la bomba y η_{\max} del motor para llegar al resultado a demostrar.

Refrigerador a calor

Finalmente, un refrigerador funcionando por calor sería en su operación como en la figura 1.13.

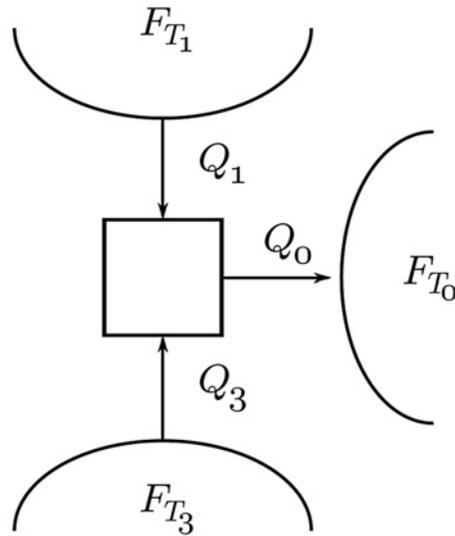


Figura 1.13. Refrigerador por calor.

Utilizando un truco de descomposición, como en el caso del calentador a calor, se obtiene en este caso que:

$$COP_{\max} = \frac{1 - T_0/T_1}{T_0/T_3 - 1}$$

Varios de los dispositivos descritos no habrían sido anticipados en los tiempos de Sadi Carnot, aunque hoy en día son ampliamente utilizados. Prácticamente todos ellos pueden operar con energéticos renovables, lo que constituye una ventaja indudable frente al dilema ambiental que plantea el consumo de los energéticos agotables.

Ejercicio. Deducir la expresión para el COP_{\max} del refrigerador a calor.

CAJA 1.5. AHORRO DE PETRÓLEO AL SUSTITUIR CALENTADORES DE RESISTENCIA POR BOMBAS DE CALOR

Estados Unidos de Norteamérica, un país altamente industrializado, en 1973 consumía aproximadamente 18 millones de barriles de petróleo equivalentes al día, en la satisfacción de todas sus necesidades energéticas. De esta cantidad, el 11% (unos 2 millones de barriles de petróleo diarios) era para el calentamiento de espacios interiores, empleando mayoritariamente calentadores de resistencia eléctrica que operan de modo que cada J eléctrico procesado en el calentador de calor es un J que se queda como energía interna del espacio a calentar. Pero una bomba de calor con un COP de 5 aumenta la energía interna de ese mismo espacio con 5J, usando un J eléctrico. Es decir, la tarea de calefacción se podría obtener con tan solo una quinta parte del petróleo quemado si todos los calentadores de resistencia fueran sustituidos por bombas de calor. Esto significaría quemar apenas 0.4 millones de barriles, en vez de los casi 2 millones, con un ahorro de 1.6 millones de barriles diarios. Si se toma en cuenta que en ese mismo año nuestro país consumía 1.5 millones de barriles diariamente en la satisfacción de todas sus necesidades energéticas, podemos darnos cuenta de la importancia de las reflexiones modernas sobre el potencial de ahorro de energéticos desde un punto de vista termodinámico.

1.11. ENERGÉTICOS, EXERGÍA Y EFICIENCIAS DE TAREA O DE SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

¿Por qué es necesario conocer, para el ahorro de energéticos (y por tanto de contaminación), no sólo las eficiencias máximas de los dispositivos técnicos térmicos, sino las eficiencias máximas de las tareas termodinámicas? ¿Qué relación guardan las eficiencias de tarea con los conceptos de exergía y sustentabilidad? ¿Vives sustentablemente en tu hogar? ¿Y en el planeta? ¿Qué opciones de sustentabilidad puedes definir termodinámicamente?

Se va a explicar en esta sección el concepto de exergía (capacidad de realización de trabajo de dos objetos en desequilibrio), la relación que guarda con los energéticos (en cuanto a que es la medida cuantitativa de ellos) y con la eficiencia de realización de tareas mecánicas y termodinámicas (que requieren de la creación y destrucción de exergía).

La exergía, medida cuantitativa de los energéticos

Recuerda que en secciones anteriores se han caracterizado a los energéticos como objetos que pueden desencadenar transformaciones en energías útiles (como trabajo, calor y electricidad), sólo a condición de que se aproximen al equilibrio con otros objetos con los que inicialmente estaban en desequilibrio.

Se vieron los casos comunes de energéticos mecánicos: Una masa de agua a una altura sobre la superficie terrestre y energéticos termodinámicos: una masa de aire a alta presión en un entorno a baja presión, una masa de vapor caliente rodeada de una masa de aire frío, y un objeto que tiene una composición química diferente del ambiente que le rodea.

Se afirmó que cuando el desequilibrio entre un objeto y los demás objetos desaparece, el objeto pierde su característica de energético porque ya no puede desarrollar un trabajo.

Ahora bien, desde los inicios de la formulación de la termodinámica por Clausius, hacia la tercera parte del siglo XIX, se introdujo el concepto de “trabajo disponible” como aquel que se puede obtener de un desequilibrio entre uno o más objetos.

El máximo trabajo disponible es el que se puede efectuar cuando la acción se efectúa sin fricción y pasando por estados muy cercanos todo el tiempo al equilibrio, es decir, cuando el proceso es “reversible”.

Posteriormente, al máximo trabajo disponible se le llamó “exergía”. En otras palabras: Exergía (Ex) es la máxima cantidad de trabajo que se puede desarrollar por el proceso de equilibrio de dos o más cuerpos cuando parten inicialmente del desequilibrio.

La exergía acumulada en los objetos en desequilibrio desaparece, o se vuelve cero, cuando los objetos llegan al equilibrio.

Recapitulando las definiciones de energético y de exergía, se concluye que esta es la medida cuantitativa de aquél. Así:

La exergía gravitatoria (recurso hidráulico) acumulada entre una masa m de agua, a una altura h sobre la superficie terrestre vale $Ex = mgh$. Es claro que ambos, el energético y la exergía gravitatorios, desaparecen cuando se alcanza el equilibrio entre la masa de agua y la superficie de la Tierra, $Ex = 0$ cuando $h = 0$.

La exergía térmica de una caldera a alta temperatura T_1 y un condensador a temperatura menor T_2 es igual al máximo trabajo obtenible por un motor reversible.

Como se vio, $Ex = \frac{Q_1}{T_1} (T_1 - T_2)$. Obviamente, $Ex = 0$ si no hay diferencia de temperaturas entre los dos objetos y $T_1 = T_2$. Es también el caso del recurso geotérmico.

La exergía o energético bórico (o recurso eólico) disponible entre una masa de aire a alta presión p_1 y una masa de aire a baja presión p_2 , es:

$$Ex = \frac{W_1}{p_1} (p_1 - p_2)$$

Aquí W_1 representa el trabajo reversible efectuado sobre la masa de aire a alta presión para llevarla al motor bórico. Como se aprecia, $Ex = 0$ si hay equilibrio bórico.

Finalmente, la exergía (o recurso químico) existente entre una masa de carbón, petróleo o gas es aproximadamente el calor de combustión de dichas sustancias en presencia de la atmósfera. El calor de combustión depende de la diferencia en los potenciales químicos de las sustancias involucradas.

La exergía es una cantidad que depende de las propiedades de al menos dos cuerpos, aunque en los ejemplos se hayan considerado solamente dos objetos.

Pregunta. La exergía acumulada entre una caldera a T_1 y un condensador a T_2 depende de la cantidad de energía procesada Q_1 . Para una diferencia $T_1 - T_2$ dada, ¿es la exergía mayor a $T_1 = 500^\circ\text{K}$ que a $T_1 = 700^\circ\text{K}$?

Tareas mecánicas, termodinámicas y su cuantificación exérgica

Se ha recalcado que la satisfacción de las necesidades individuales y sociales requiere del consumo de energéticos. En vista de lo dicho en la sección anterior, se concluye que habrá que destruir exergía en la satisfacción de las necesidades, puesto que ella es la medida cuantitativa de un energético.

Con más detalle, la satisfacción de las necesidades individuales y sociales requiere efectuar tareas mecánicas y termodinámicas, cada una de las cuales consume exergía. Pero, al mismo tiempo, al efectuar la tarea se crea exergía, por ejemplo, al subir agua del aljibe al tinaco o al calentar agua. La eficiencia de tarea es entonces el cociente de la exergía creada y la exergía consumida o destruida; se la denota universalmente por la letra griega epsilon, ϵ .

$$\varepsilon = \frac{Ex_{tarea}}{Ex_{consumida}} = \frac{Ex_{creada}}{Ex_{consumida}}$$

A esta eficiencia de tarea se la llama eficiencia de segunda ley de la termodinámica porque toma en cuenta los aspectos cualitativos de la energía y no nada más los aspectos cuantitativos de conservación (como se hace con la eficiencia de dispositivo o de primera ley).

En el ejemplo siguiente de una tarea mecánica gravitatoria se puede apreciar con más precisión lo afirmado en el párrafo anterior.

Sea la tarea la de elevar un objeto a cierta altura h , bien desde el nivel del suelo (como al levantar objetos pesados en algunas industrias) o aun del subsuelo (como en el regadío agrícola o el llenado de agua del tinaco desde el aljibe en una casa). Estas tareas se adscriben directamente a la satisfacción de necesidades básicas.

Al subir el objeto se crea exergía gravitatoria que, como se vio, vale mgh , siendo m la masa del objeto. Para crearla, algún dispositivo mecánico (o termodinámico) tiene que efectuar el trabajo de elevación, destruyendo para ello la exergía de otros objetos.

Si, por ejemplo, se emplea un motor eléctrico para subir el objeto, se estará consumiendo la exergía eléctrica de la red. Esta, a su vez, se crea a partir de la exergía de los energéticos agotables y de los inagotables en las proporciones antes vistas.

Además, hay consumos de exergía que se desperdician desde la planta donde se la genera hasta la toma de la red eléctrica. El resultado neto es que la exergía total consumida para crear la exergía mgh , es mucho mayor que esta y la eficiencia ε de la tarea es mucho menor que 1.

Hipotéticamente la elevación de objetos pesados se puede realizar con una eficiencia de tarea cercana a la unidad si se recurre a un dispositivo mecánico que utilice o consuma exergía gravitatoria para crear exergía del mismo tipo y cantidad. En la figura 1.14 se expresa esta idea: la masa m se sube a la altura h mediante una palanca sin fricción que consume la exergía de otro objeto de la misma masa en el otro extremo de la palanca, bajando de la misma altura h .

La conclusión es que el valor máximo posible para la eficiencia de tarea, $\varepsilon_{\max} = 1$, se puede alcanzar si se cumplen al menos dos condiciones: que el proceso ocurra reversiblemente, por un lado y, por otro, que la exergía que se emplea sea de la misma naturaleza físico química que la que se requiere directamente crear para cumplir con la tarea, sin procesos intermedios.

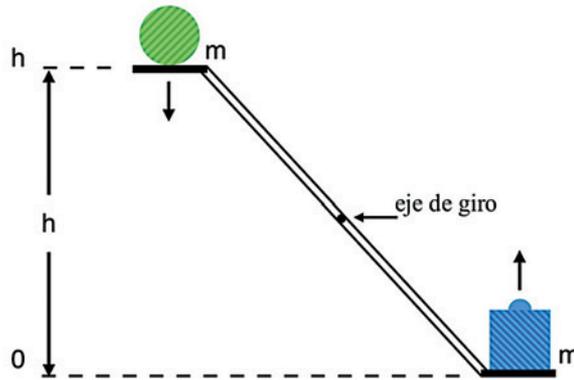


Figura 1.14. Subida de un objeto de masa m a una altura h , bajando un objeto de igual masa y altura en el otro extremo de la balanza.

Los mejoramientos en las eficiencias de segunda ley de las tareas revelan muy explícitamente el ahorro en energéticos y, por tanto, las ventajas económicas y ambientales que conllevan.

El ahorro potencial de exergía (y de energéticos) en cada tarea (necesidad) sería la diferencia entre la exergía consumida y la mínima requerida:

$$\Delta Ex = Ex_{consumida} - Ex_{min}$$

Recuerda, el acontecimiento histórico y político que condujo a la reformulación de las preguntas de Sadi Carnot con el fin de aumentar las eficiencias de primera ley, y a la definición de las eficiencias de segunda ley, fue el embargo petrolero de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP). Esta organización decretó el embargo de petróleo a varios países muy industrializados de Occidente en 1973 debido al apoyo que habían prestado a Israel en la guerra del Yom Kippur, en contra de Egipto y otros países del Medio Oriente.

Los países afectados respondieron diversificando la oferta del suministro de hidrocarburos, por un lado y, por otro, investigando sobre el consumo más eficiente de los recursos agotables.

Pregunta. Los filósofos y los sociólogos de la ciencia suelen decir que “ni la ciencia ni la técnica son neutras”, ¿Crees que esta afirmación es corroborada por la conexión histórica entre el citado embargo petrolero y el desarrollo subsiguiente de la termodinámica en cuanto a los conceptos de exergía y eficiencia de segunda ley?

Tareas, fuentes y eficiencias de segunda ley de la termodinámica

Se ha visto que, en sistemas energéticos relativamente sencillos, como un hogar y un pueblo pequeño, el análisis de tareas termodinámicas relacionadas con necesidades energéticas requiere de una o dos cajas energéticas, las cajas 1 y 2, como se muestra en la figura 1.15. Las entradas y las salidas en los dispositivos energéticos representados por las cajas se pueden caracterizar tanto en energías como en exergías.

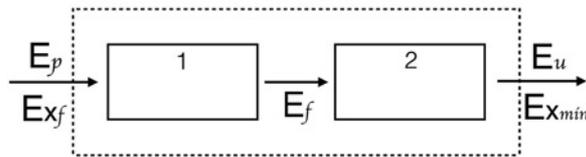


Figura 1.15. Sistema compuesto de dos cajas o subsistemas energéticos.

Por el lado izquierdo del sistema compuesto por las cajas 1 y 2 (descrito por la línea quebrada que las engloba) ingresa el “energético primario” (también designado comúnmente como “energía primaria”), E_p . En la salida de la caja compuesta se tiene la energía útil, E_u .

La energía primaria coincide generalmente con la denominada exergía final que entra al sistema complejo, Ex_f , de modo que:

$$E_p = Ex_f$$

Ex_f y Ex_{\min} son las exergías de entrada y salida de la caja compuesta. Ex_{\min} denota la mínima exergía necesaria de consumir para realizar la tarea que la caja compuesta está destinada realizar, en tanto que Ex_f representa la exergía actualmente

consumida en dicha tarea. Su cociente es la eficiencia de segunda ley de la termodinámica, ε .

La eficiencia “externa” de primera ley de la caja 1, η_{ext} , es:

$$\eta_{ext} = \frac{E_f}{E_p} = \frac{E_f}{EX_f}$$

E_f es la energía final que llega al dispositivo 2.

Para la caja 2:

$$\eta = \frac{E_u}{E_f}$$

E_u es la energía implicada en la consecución del efecto útil, asociado a la satisfacción de alguna necesidad específica.

Veamos ahora la realización de algunas tareas mecánicas y termodinámicas muy comunes en distintos ámbitos de la sociedad según los energéticos más empleados. Las tareas son efectuadas por dispositivos técnicos que, además de caracterizarse en su funcionamiento por una eficiencia de primera ley, también admiten una eficiencia de segunda ley, puesto que en sí mismos desempeñan una tarea, como podrá verse en seguida.

- a) Tareas que requieren efectuar un trabajo útil, W_u , empleando para ello también un cierto trabajo de entrada, W_e .

Ejemplos: Subida de agua de la cisterna al tinaco mediante una bomba eléctrica; generación de electricidad mediante una caída de agua; molienda de granos con rueda hidráulica.

Se tienen las siguientes igualdades (figura 1.15):

$$E_u = W_u = EX_{\min}$$

(Esta ecuación es válida porque conceptualmente el trabajo es exergía, de modo que el trabajo útil de la tarea es la exergía mínima requerida para su realización).

$$EX_f = E_e = W_e$$

Por tanto:

$$\varepsilon = \frac{EX_{\min}}{EX_f} = \frac{W_u}{W_e} = \frac{W_e}{EX_f} = \frac{W_e}{E_f/\eta_{\text{ext}}} = \eta_{\text{ext}} \frac{W_e}{E_f} = \eta_{\text{ext}}\eta$$

- b) Tareas que precisan de trabajo empleando para ello combustible químico

Ejemplos: subida de agua de la cisterna al tinaco con una bomba de gasolina; inflado de llanta con bomba de gasolina.

Como en el caso anterior:

$$E_u = W_u = EX_{\min}$$

Pero ahora

$$EX_f = E_p = Q_c = |\Delta H|$$

Así que:

$$\varepsilon = \frac{W_u}{|\Delta H|} = \frac{W_u}{E_f/\eta_{\text{ext}}} = \eta_{\text{ext}}\eta$$

- c) Tareas que utilizan calor con consumo de combustibles fósiles

Ejemplos: calentamiento de interiores con quemador de gas; cocción de alimentos con estufa de gas.

$$\varepsilon = \frac{EX_{\min}}{EX_f} = \frac{Q_2 q}{|\Delta H|} = \frac{Q_2 q}{E_f/\eta_{\text{ext}}} = \eta_{\text{ext}}\eta$$

Aquí q denota el “factor de Carnot”, dado por $1 - \frac{T_0}{T_2}$

- d) Tareas que utilizan calor mediante trabajo

Ejemplos: calentamiento de interiores con calentador eléctrico de resistencia.

$$EX_{\min} = Q_2 q$$

$$EX_f = W_e$$

$$\varepsilon = \frac{EX_{\min}}{EX_f} = \frac{Q_2 q}{W_e} = \frac{Q_2 q}{E_f / \eta_{\text{ext}}} = \eta_{\text{ext}} q$$

Pueden ocurrir otras tareas, como enfriamiento por trabajo, enfriamiento por calor, calefacción por calor, etc. Las eficiencias de segunda ley correspondientes se podrían calcular como en los casos descritos, como ejercicios para el estudiante.

Los resultados anteriores se pueden resumir en una matriz de tres tareas y tres fuentes de exergía como se muestra en el cuadro 1.3.

CUADRO 1.3. MATRIZ DE TAREAS Y RECURSOS ENERGÉTICOS

Fuentes → Tareas ↓	A ($EX_A = W_e$)	B ($EX_B \simeq Q_c$)	C ($EX_c = q_1 \left[1 - \frac{T_0}{T_1}\right]$)
L ($EX_{L \min} = W_s$)	$\eta = \frac{W_s}{W_e}$ $\varepsilon = \eta$ Ej. motor eléctrico.	$\eta = \frac{W_s}{Q_c}$ $\varepsilon \simeq \eta$ Ej. termoeléctrica.	$\eta = \frac{W_s}{q_1}$ $\varepsilon = \frac{\eta}{1 - \frac{T_0}{T_1}}$ Ej. geotermoeléctrica.
M ($EX_{M \min} = Q_2 \left[1 - \frac{T_0}{T_1}\right]$)	$COP = \frac{Q_2}{W_e}$ $\varepsilon = COP \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right)$ Ej. bomba de calor eléctrica.	$COP = \frac{Q_2}{Q_c}$ $\varepsilon = COP \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right)$ Ej. bomba de calor a gasolina.	$COP = \frac{Q_2}{q_1}$ $\varepsilon = COP \frac{1 - \frac{T_0}{T_2}}{1 - \frac{T_0}{T_1}}$ Ej. calentador de agua por sol, o por geotermia.

<p>N</p> <p>$\left(EX_{N\min} = Q_3 \left[\frac{T_0}{T_3} - 1 \right] \right)$</p>	<p>$COP = \frac{Q_3}{W_e}$</p> <p>$\varepsilon = COP \left(\frac{T_0}{T_3} - 1 \right)$</p> <p>Ej. refrigerador eléctrico.</p>	<p>$COP = \frac{Q_3}{Q_c}$</p> <p>$\varepsilon = COP \left(\frac{T_0}{T_3} - 1 \right)$</p> <p>Ej. acondicionador de aire a gasolina.</p>	<p>$COP = \frac{Q_3}{Q_1}$</p> <p>$\varepsilon = COP \frac{\frac{T_0}{T_3} - 1}{1 - \frac{T_0}{T_1}}$</p> <p>Ej. refrigerador solar.</p>
---	---	--	--

Ejercicio. Construye la tabla termodinámica de tu hogar en forma semejante al cuadro 1.3, en cuanto a tareas, exergías mínimas requeridas, exergías consumidas, eficiencias de segunda ley, dispositivos simples y compuestos con que las tareas se ejecutan y sus eficiencias de primera ley. Agrupa las exergías en agotables e inagotables.

Pregunta. ¿Cómo definirías la eficiencia global de primera ley de tu hogar?

Pregunta. ¿Cómo definirías la eficiencia global de segunda ley de tu hogar?

Pregunta. ¿En qué sentido es o no sustentable energéticamente tu hogar?

BIBLIOGRAFÍA

- GANTEN, D., T. DEICHMANN y T. SPAHL. 2004. *Vida, Naturaleza y Ciencia*. Santillana. México.
- KIRCHNER, J. W. 2002. The Gaia hypothesis: fact, theory, and wishful thinking. *Climatic change*, 52(4), 391-408.
- MARTÍNEZ NEGRETE, M. A. 2011. *Termodinámica*. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Capítulo 2

El sistema energético y el balance de energía

CARLOS A. GARCÍA BUSTAMANTE

VÍCTOR M. RUIZ-GARCÍA

INTRODUCCIÓN

¿Por qué es importante la energía para la sociedad?

La vida humana y las civilizaciones requieren de la energía para su supervivencia. Entonces, ¿cuáles pensarías que son las necesidades energéticas básicas tangibles e intangibles que una persona necesita satisfacer, sin las que no sobreviviría más allá de un corto plazo de tiempo (días)?

Los seres humanos necesitamos de la energía contenida en los alimentos para poder llevar a cabo nuestras funciones vitales como mantener trabajando el corazón y el cerebro, regular nuestra temperatura y crecer. Las plantas de las cuales nos alimentamos reciben a su vez energía del Sol, la cual es convertida en biomasa por medio de la fotosíntesis. Los humanos también requerimos de la energía en los alimentos para movernos y para realizar tareas como arar la tierra o construir una cerca.

En los principios de la humanidad, la mayor fuente de potencia eran los músculos, los cuales se empleaban para recolectar semillas y frutos, fabricar cosas, cazar animales y buscar refugio. La posterior aparición de la agricultura, hace unos 10 mil años, permitió que se pudieran satisfacer las necesidades de poblaciones más grandes, lo que derivó en el surgimiento de ciudades y el desarrollo de las primeras culturas. Más tarde, se inventaron las ruedas de agua para irrigación y los molinos de viento.

Por otra parte, a partir del descubrimiento del fuego, el uso de la leña para satisfacer las necesidades de calefacción, cocción de alimentos y fabricación de

herramientas fue y ha sido muy importante en la historia, ya que en 1850 representaba el 95% del recurso energético en Europa (Malkina-Pykh y Pykh 2002). Este alto uso de la leña no estuvo exento de dificultades, pues desde la Edad Media se reportaba escasez de leña en Inglaterra y un aumento importante de su precio.

La dificultad para obtener los recursos leñosos fue una de las razones que llevaron a la búsqueda de nuevas formas de energía. De esta manera, el carbón mineral, descubierto en China hacia el año 1000 a. C. y en Europa en el siglo xv, fue el combustible que inició una paulatina sustitución de la leña como la principal fuente de energía (esto no quiere decir que la leña haya dejado de usarse). La invención de la máquina de Newcomen y su posterior mejora por James Watt dio origen a la máquina de vapor, cuyo primer uso consistió en la extracción de agua de las minas de carbón inglesas (para más detalle, ver sección 1.8. del capítulo 1). Con esta invención inició la revolución industrial y el carbón se posicionó como una fuente de energía muy importante, dando inicio a la era de los combustibles fósiles, pues en el periodo de 1870 a 1900, la leña perdió la mitad de su participación en el mercado y se desarrollaron fábricas y vehículos (incluyendo los botes de vapor y las locomotoras). Simultáneamente, aparecieron otros avances tecnológicos y descubrimientos, como la energía eléctrica, la telegrafía y el teléfono.

Las primeras extracciones comerciales de petróleo ocurrieron en 1859 en Pennsylvania, Estados Unidos. Con el descubrimiento de los usos energéticos del petróleo, este se empezó a usar en el transporte gracias a la invención de los motores de combustión interna. Desde los años sesenta del siglo pasado, el petróleo se convirtió en la principal fuente de energía en el mundo (GEA, 2012). De igual forma, la energía nuclear hizo su aparición con sus aplicaciones civiles después de la Segunda Guerra Mundial, en tanto que el gas natural fue cobrando cada vez mayor importancia en el suministro de energía, sobre todo desde la década de los setenta del siglo pasado.

Por otra parte, el consumo mundial de energía se incrementó de manera notable, especialmente a partir de la Segunda Guerra Mundial. En 1850 el consumo de energía primaria era de alrededor de 30 EJ, mismo que aumentó a cerca de 100 EJ en 1950 y 500 EJ en 2008. De esta última, la participación de los combustibles fósiles (carbón mineral, petróleo y gas natural) representa cerca del 80%. Cabe señalar que el uso de los combustibles fósiles no ha eliminado el uso de la leña, la cual se utiliza para calefacción y cocción de alimentos. Actualmente alrededor de

3 mil millones de personas dependen en gran medida de la leña para satisfacer sus necesidades energéticas, principalmente en las zonas rurales y periurbanas de los países en desarrollo, pero también en algunos países desarrollados que han implementado innovación tecnológica para el uso de biocombustibles sólidos.

2.1. EL SISTEMA ENERGÉTICO

El alto crecimiento del consumo de energía y los desarrollos científicos y tecnológicos permitieron que la población mundial se incrementara de manera muy importante. En 1800 la población era de alrededor de mil millones de personas, mientras que en nuestros días es de 7 mil millones de personas. La población requiere satisfacer sus necesidades básicas, y como hemos visto en el breve repaso histórico, la energía es fundamental para esto.

Las necesidades básicas que pueden ser satisfechas con la energía son: 1) alimentación, 2) cocción, 3) acondicionamiento de espacios, 4) iluminación, 5) refrigeración de alimentos, 6) transporte y, 7) calentamiento de agua con fines sanitarios (ver capítulo 1).

Pregunta. ¿Hay necesidades energéticas secundarias, sin cuya satisfacción una persona puede sobrevivir al corto, mediano y largo plazo?

Estas necesidades básicas pueden ser cubiertas con diferentes formas de energía secundaria a las que podemos llamar “transportadores energéticos” (*energy carriers* en inglés). Toman ese nombre porque pueden “transportar” la energía desde las fuentes de energía primaria hasta sus usos finales (los definiremos más adelante). El concepto de transportadores energéticos nos sugiere que existe una especie de camino que sigue la energía desde sus fuentes hasta la satisfacción de las necesidades básicas. Es aquí donde entra el concepto de “sistema energético” y surgen las interrogantes como: ¿cuáles son las tareas principales y secundarias del sector energético?, ¿con qué energéticos se satisfacen esas tareas?

El término “sistema energético” se usa para describir al conjunto total compuesto por elementos o subsistemas, como la búsqueda y extracción de recursos

de energía primaria, el desarrollo de dichos recursos, la refinación, conversión, transportación, almacenamiento, distribución y uso de la energía. Dicho de otra forma, el sistema energético es la manera en la que el ser humano obtiene, transforma, distribuye y utiliza la energía. En la figura 2.1 se muestra un esquema del sistema energético.

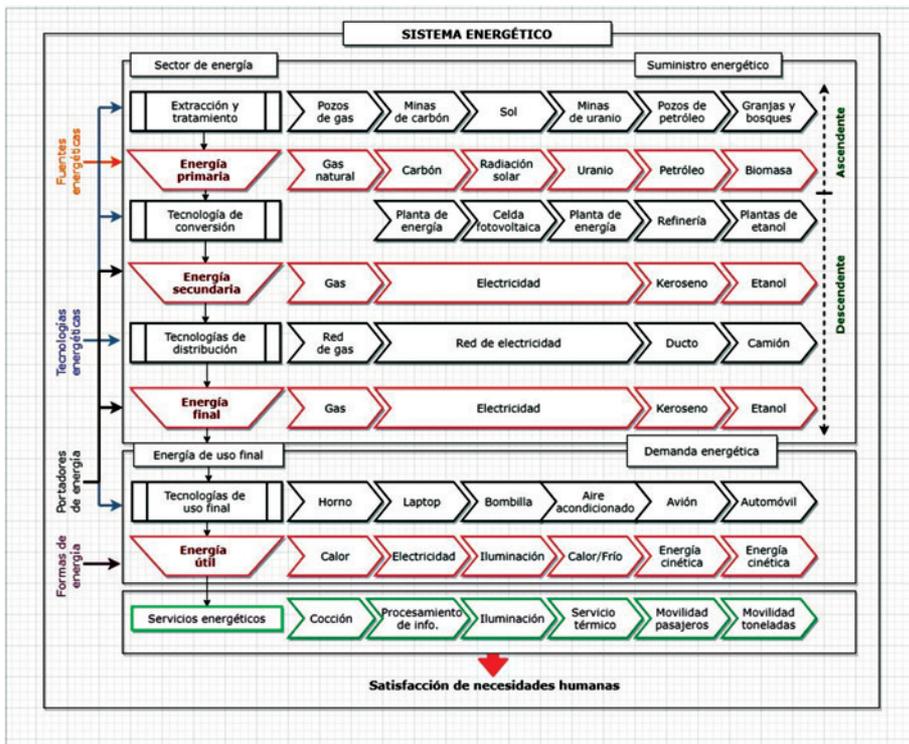


Figura 2.1. Esquema del sistema energético. Fuente: GEA (2012).

El sistema inicia con la extracción y tratamiento de los recursos naturales, como pueden ser los pozos de petróleo y gas, las minas de carbón y uranio, los bosques, entre otros. La energía primaria es la energía que encontramos en la naturaleza y que no ha sufrido ningún tipo de proceso de transformación. El petróleo, el gas natural, el carbón mineral, el uranio, la biomasa y la radiación solar son las principales formas de energía primaria. Esta energía es después transportada, almacenada (aunque no en todos los casos) y convertida en energía secundaria.

La energía secundaria es el resultado de la transformación de la energía primaria, ya que en muchos casos esta no puede ser usada directamente y requiere de un proceso de transformación para disponer de dicha energía (nos hemos referido a ella como “transportadores energéticos”). Ejemplos son la electricidad, la gasolina, el diésel, el hidrógeno, residuos leñosos, etanol, etc. En México la mayor parte de la electricidad se obtiene de combustibles fósiles como el gas natural, el combustible y el carbón mineral, en tanto que la gasolina se obtiene a partir de la refinación del petróleo. A su vez, la energía secundaria es transportada, almacenada y acondicionada en formas más convenientes para su uso. Por ejemplo, antes de poder utilizar la electricidad en nuestras casas, esta debe ser enviada por líneas de transmisión con un alto voltaje, para después ser distribuida en otras líneas con un menor voltaje.

Posterior a la distribución de energía tenemos lo que se conoce como energía final, aquella con la que funcionan los dispositivos de uso final. Los dispositivos de uso final son las tecnologías que empleamos para la satisfacción de nuestras necesidades básicas, como pueden ser calentadores de agua, refrigeradores, lámparas, estufas, vehículos, etc. Estos también pueden encontrarse en otros ámbitos, por ejemplo, en el sector industrial (como motores, sistemas de enfriamiento, compresión de aire), comercial y público (para iluminación de negocios, hospitales y escuelas) y agropecuario (tractores, bombeo de agua para riego, entre otros).

Al final del sistema encontramos a la energía útil, aquella que es realmente aprovechada para satisfacer las necesidades, también conocida como servicios energéticos. Entre estas formas de energía está el calor, la electricidad, la luz y la energía cinética. Estas formas de energía son las que nos proveen de cocción, iluminación, confort térmico, movilidad, entre otras.

Existe una herramienta que permite conocer de forma parcial cómo está compuesto el sistema energético de un país: los llamados Balances Nacionales de Energía (BNE). Estos se dividen de acuerdo con los principales sectores económicos. Los BE muestran los diferentes flujos de energía, desde la producción hasta el consumo, ocurridos en el transcurso de un año en concreto y se emplean para la planeación energética, es decir, para saber cuánta y qué tipo de energía se requerirá en el futuro. Estudiaremos los BE con más detalle a continuación.

2.2. BALANCE DE ENERGÍA

¿Cómo es un balance de energía en el cuerpo humano? ¿Cómo es un balance de energía en el planeta Tierra? ¿Siempre habrá entradas de energía en el planeta Tierra? ¿De dónde viene la energía que se utiliza en la Tierra?

Un balance se entiende como las entradas y salidas de un sistema, este sistema puede ser una persona, una casa, un país o el planeta Tierra (figura 2.2). Si hablamos de un balance de energía, las entradas y salidas del sistema deben ser en términos de energía. Si pensamos en el mundo como nuestro sistema, tenemos que imaginar las entradas de energía. Un ejemplo sería la energía solar que llega hasta la Tierra, en tanto que la salida de energía sería el calor que es radiado de la Tierra hacia el exterior.

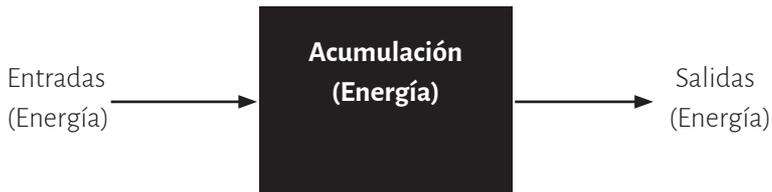


Figura 2.2. Balance de energía en términos generales.

Como parte del desarrollo económico y social de los países, la energía ocupa un papel medular. Los países buscan potencializar su productividad con el uso de la energía, así mismo, el desarrollo de un país está relacionado con consumo energético (ya que para lograr el desarrollo se necesita consumir energía). Sin embargo, hay que tener cuidado con esta interpretación, ya que se pueden lograr desarrollos humanos considerables sin hacer usos desproporcionados de la energía. Los países nórdicos son ejemplos de este tipo de sociedades.

Para poder entender la situación energética de un país o región, son necesarios documentos que puedan ofrecer una visión general de las fuentes de energía y de sus usos en la economía. En la próxima sección hablaremos de los balances de energía y su contribución.

2.2.1. Balances de energía

¿Cómo conoces la energía que consume y produce un país? ¿Siempre es la misma relación consumo/producción a través de los años?

Los balances de energía (BE) son documentos que presentan la información relativa a la oferta y demanda de energía para una zona geográfica específica, tanto a nivel nacional como regional, y están asociados a un periodo de tiempo determinado (por lo general un año). Estos contabilizan la energía que se produce (origen), la que se intercambia con el exterior, la que se transforma, la de consumo propio, la no aprovechada y la que se destina a los distintos sectores y agentes económicos (uso final). En el caso de los balances regionales, se consideran también los intercambios regionales netos.

Uno de los principales objetivos de los BE es ofrecer información útil y comparable a nivel nacional e internacional para el análisis del desempeño del sector energético, además del diseño, formulación e implementación de políticas públicas en materia de energía (Irastorza y Fernández, 2010). Además, proporcionan información que permite tanto estimar los impactos ambientales asociados a la generación y consumo de energía, como monitorear su mejor aprovechamiento. Los BE, como el mexicano, también pueden contener información sobre las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes del consumo de energía, así como los precios y tarifas energéticas, diagramas de flujos de energía desde su origen hasta su destino final y en algunas ocasiones, sub-balances.

Es importante señalar que la única forma de comparar los energéticos es en unidades de energía. La cuantificación de los energéticos puede ser: en masa para combustibles sólidos (toneladas, kilogramo), en volumen para líquidos y gases (barriles, metros cúbicos, litros) y en energía (kilowatt-hora, calorías, Joules) (cuadro 2.1).

La elaboración del balance de energía sigue una metodología particular que ofrece datos consistentes con unidades homogéneas de energía, esto permite la integración de las distintas fuentes de energía y la comparación entre ellas y en años anteriores.

CUADRO 2.1 ¿CUÁL COMBUSTIBLE TIENE MÁS ENERGÍA?

		MJ/KG	MJ/M ³
Madera verde, hierba		5-10	
Residuos de semillas, madera seca		12-15	
Carbón vegetal		28-32	
Turba		6-8	
Carbones	Antracitas	31-33	
	Carbones bituminosos	20-29	
	Lignitos	8-20	
Petróleo		42-44	
Gas natural		12-15	29-39

La densidad energética o poder calorífico de los distintos tipos de combustible se refiere a la cantidad de energía contenida en una unidad de masa o volumen.

De esta manera, el primer paso para la elaboración de los BE es la recopilación de las estadísticas por fuentes de energía en sus unidades originales, por ejemplo:

Siguiendo con lo establecido en el Sistema General de Unidades de Medida, el BE de México utiliza el Joule (J). La conversión de una cantidad de combustible expresada en sus unidades originales a Joules requiere de un poder calorífico que exprese la cantidad de calor que se libera en un proceso de combustión. El Balance Nacional de México (BNE) presenta las estadísticas en términos del poder calorífico neto (PCN), el cual excluye el calor requerido para evaporar el agua presente en el combustible o producido durante su combustión y equivale al calor del proceso de combustión que se aprovecha en la práctica. Cuando la unidad original es expresada en unidades de energía, como es el caso de la electricidad, sólo se aplica el factor de conversión apropiado (cuadro 1.2 del capítulo 1).

Como podemos ver, los balances son una herramienta fundamental para entender cómo un país o región consume y obtiene su energía y para hacer la planeación sobre la manera en que se satisfarán los requerimientos energéticos en el futuro.

A continuación, presentamos un panorama energético global para después abordar el caso de México.

2.2.2. Producción y consumo de energía en el mundo

¿Qué ha sucedido con la producción mundial de energía? ¿Es viable basar la producción de energía netamente en fuentes fósiles? ¿Qué va a suceder con la producción mundial cuando se agoten los combustibles fósiles?

La producción mundial de energía primaria se ha incrementa año con año. Los países con mayor producción en los últimos años son China, Estados Unidos, Rusia, Arabia Saudita e India con una participación de la generación global del 18.8%, 14.6%, 9.5%, 4.5% y 3.9% respectivamente (figura 2.3), en tanto que México se situó en 2010, 2011 y 2012, en el lugar duodécimo con participaciones 1.8%, 1.7% y 1.6% respectivamente, y en 2013 y 2014 en decimotercer lugar con 1.6 % y 1.5% respectivamente. Cabe señalar un decrecimiento en la producción de energía primaria de México en los últimos años.

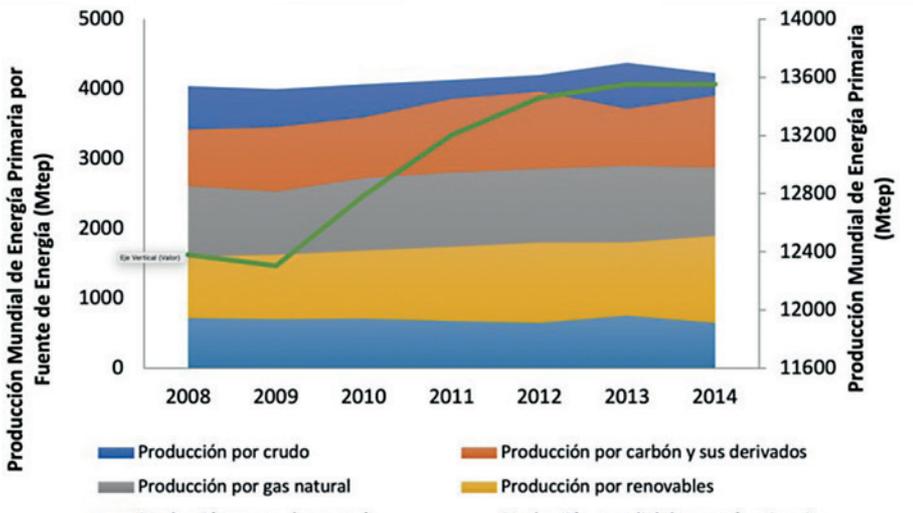


Figura 2.3. Producción de Energía Primaria (Mtep) y por Fuente de Energía (Mtep) en el mundo en los últimos años. Elaboración propia con datos del Balance Nacional de Energía (Sener 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014).

Poco más del 80% de la producción mundial de energía primaria proviene de combustibles fósiles (figura 2.4). Por su parte, las energías renovables totalizan el 13% (IEA, 2013 y IEA, 2014). Esta alta dependencia de los combustibles fósiles genera preocupación sobre el eventual agotamiento de los recursos fósiles. Así mismo, surge la interrogante para los principales países productores de energía si van a poder mantener o aumentar su producción.

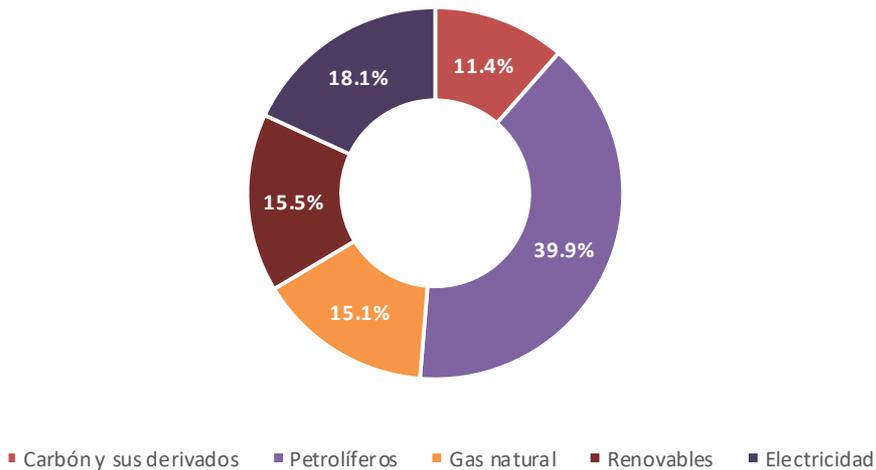


Figura 2.4. Desglose del Consumo Mundial de Energía por tipo de energético para 2015 (9,424.69 Mtep). Elaboración propia con datos del World Energy Outlook (IEA, 2016).

Pregunta. ¿Qué ha sucedido con el consumo mundial de energía?

Pregunta. ¿Por qué es importante para los países consumir esta energía?

Pregunta. ¿Los países podrán seguir consumiendo la misma cantidad de energía cuando se agoten los combustibles fósiles?

El consumo mundial de energía se ha incrementado en los últimos años: 2010 (4.3%), 2011 (1.7%), 2012 (0.7%), 2013 (2.5%) y 2014 (1.3%) respecto al año

anterior. En 2010 China se posicionó como el mayor consumidor de energía rebasando a Estados Unidos de América (EUA), quien históricamente había sido el principal consumidor. En este mismo año, China, EUA, India, Rusia y Japón produjeron en conjunto 47.4% del PIB mundial y consumieron 48.9% de la energía a nivel mundial, donde los valores se mantienen muy constantes en los últimos años. Históricamente, los principales sectores de consumo son: industrial, transporte y residencial (figura 2.5).

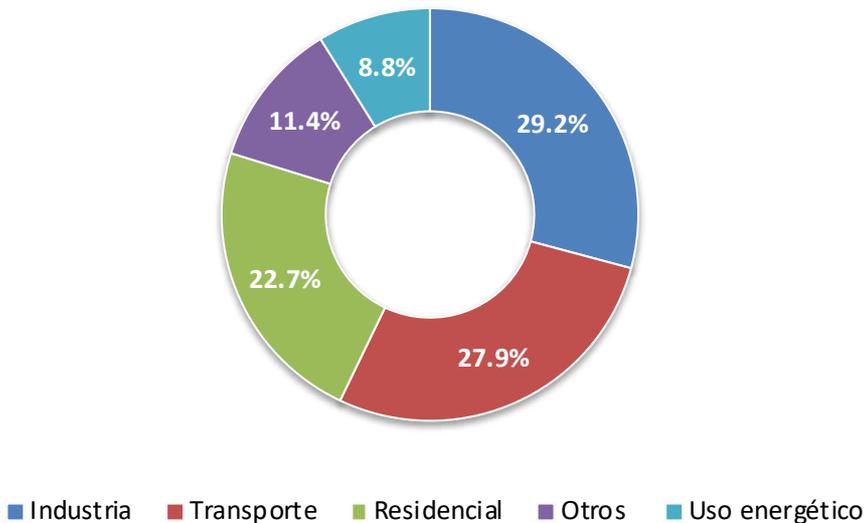


Figura 2.5. Consumo Mundial de Energía Primaria por Sector para 2015 (9,424.69 Mtep). Elaboración propia con datos del World Energy Outlook (IEA, 2016).

2.2.3. Balance Nacional de Energía de México

¿Energéticamente, qué tan independiente es México? ¿México será energéticamente independiente en los próximos 10 años?

En esta sección se presenta información sobre una serie de indicadores relevantes obtenidos del Balance Nacional de Energía de México (BNE) sobre cuestiones

clave, como es la independencia energética. En este caso, la independencia energética señala la relación entre energía producida en el país y la energía consumida. Lo ideal sería no consumir más energía de la que se puede producir en el país. En el transcurso del 2013, el consumo de energía en México por primera vez fue igual al nivel de la producción, y para 2015 el consumo sobrepasó al nivel de producción (ver figura 2.6). Ejemplos de otros indicadores relevantes se pueden encontrar en la caja 2.1.

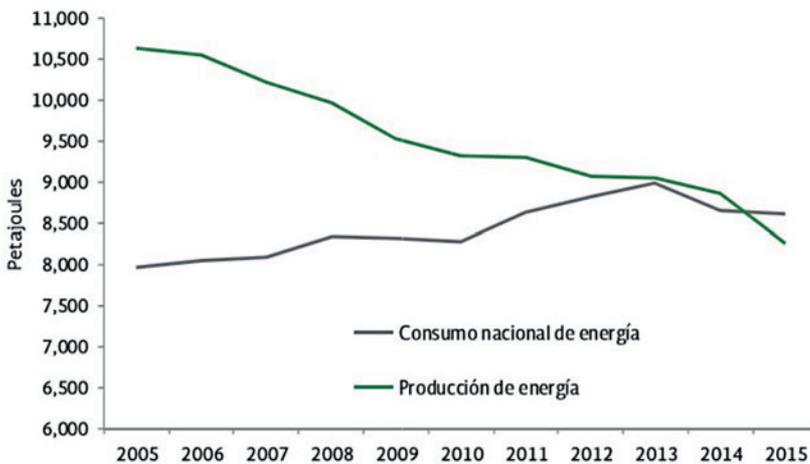


Figura 2.6. Producción y Consumo Nacional de Energía (Petajoules) Fuente: Sener 2015.

CAJA 2.1. OTROS INDICADORES NACIONALES DE ENERGÍA

¿Qué es el PIB? Es el valor total de los bienes y servicios finales producidos por un país, durante un tiempo definido. Cuando hablamos de bienes finales, nos referimos a aquellos bienes y servicios que el consumidor final compra.

Intensidad Energética: cantidad de energía requerida para producir un peso de PIB (Producto Interno Bruto).

Consumo per cápita: este consumo de energía expresa la energía consumida por persona en un periodo determinado, usualmente un año (GJ/habitante).

De acuerdo con la información del BNE, la producción de energía primaria de México alcanzó los 8,261 PJ en el año 2015, donde las principales fuentes de energía fueron los combustibles fósiles, con participaciones del petróleo del 61.3%, gas natural 24.7% y carbón 3.5%. Por su parte, las fuentes renovables de energía aportaron el 7.8%, donde la principal fuente fue la biomasa con un 4.4%, seguida de la geoenergía solar y eólica con 2.1%, la hidroelectricidad con el 1.3%. Finalmente, la energía nuclear aportó el 1.5% de la energía primaria y los condensados el 1.2%.

En cuanto a la demanda y producción de energía en México, de acuerdo con la información de los BNE de los últimos años, es importante notar que del 2000 al 2011, el consumo de energía en el país creció a un promedio anual de 2.08%, mientras que la producción de energía primaria disminuyó a una tasa anual de 0.3%. Lo anterior ha afectado al Índice de Independencia Energética de México en cual mide la autosuficiencia energética del país, y es el resultado del cociente del total de la producción de energía primaria y el total del consumo de energía (figura 2.7).

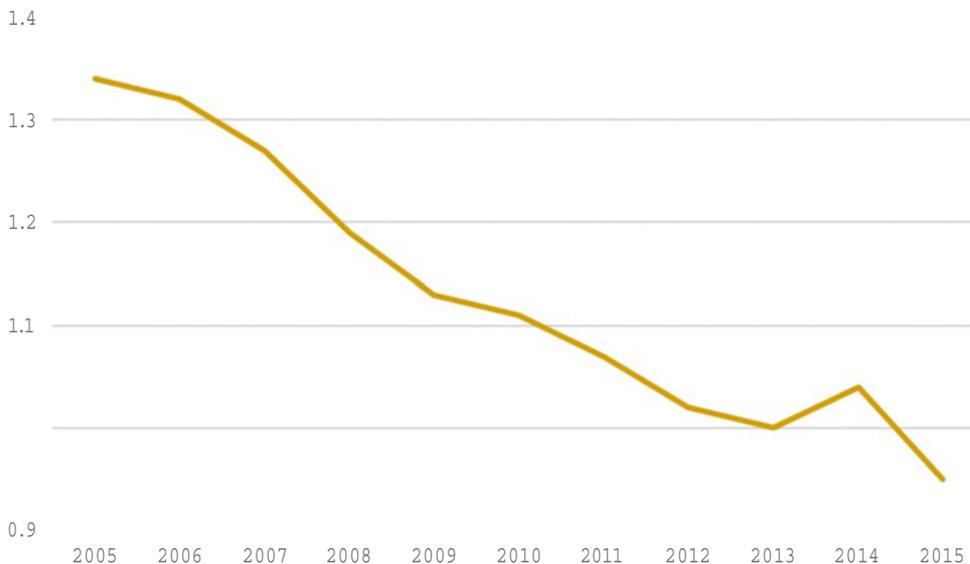


Figura 2.7. Evolución del Índice de Independencia Energética en México. Fuente: Sener 2015.

En lo que se refiere a la producción de petróleo, entre 2000 y 2004 alcanzó su máximo nivel, y a partir de ese momento comenzó a declinar hasta llegar a 2.5 millones de barriles diarios (MBD) en 2012, pese a que la inversión en actividades para exploración y producción de hidrocarburos se incrementó más de tres veces en los últimos 12 años, pasando de 77,860 millones de pesos a 251,900 millones en el periodo 2000 a 2012. De esta forma, mantener la producción a su actual nivel representará un importante reto técnico y económico, ya que la mayor parte de los campos productores en el país se encuentran en etapas maduras o en vías de declinación. Entre 2003 y 2012, a pesar de la mayor inversión en la historia, las reservas probadas de petróleo disminuyeron 31.2%, pasando de 20,077 millones de barriles de petróleo crudo equivalente (Mbpce) a 13,810 Mbpce. Esto resulta preocupante porque la mayor cantidad de producción de energía primaria en México está dada por el petróleo crudo (figura 2.8).

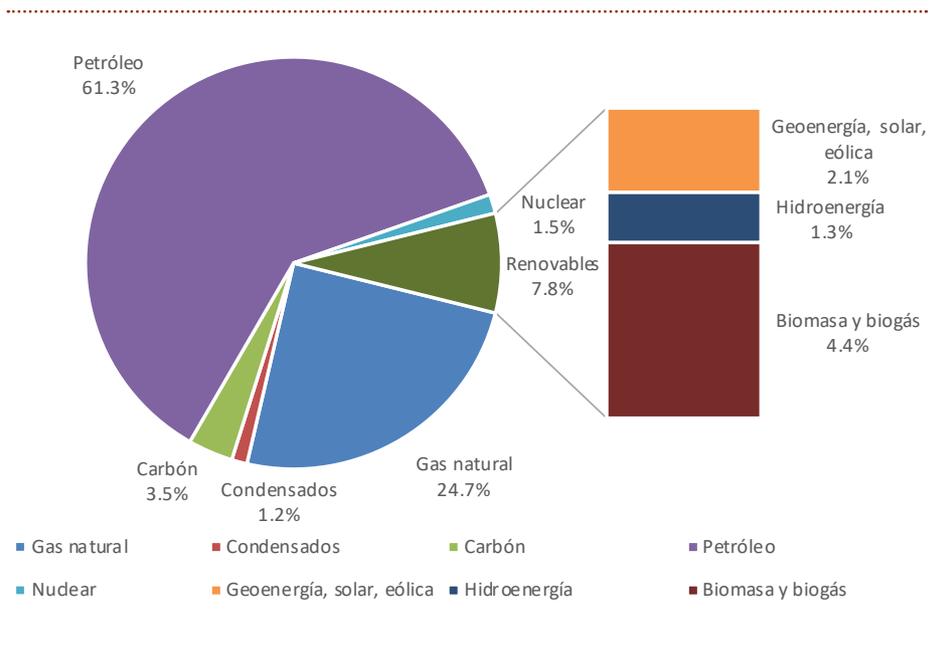


Figura 2.8. Estructura de la Producción de Energía Primaria por fuentes renovables y fósiles. Elaboración propia con datos del Balance Nacional de Energía 2015.

CAJA2.2. CRECIMIENTO POBLACIONAL... MAYOR DEMANDA DE ENERGÍA

Más energía para satisfacer necesidades o más necesidades para agotar la energía: boom demográfico gracias a la energía fósil. En el siglo xx se produjo un crecimiento demográfico como nunca antes en la historia de la humanidad. La población prácticamente se cuadruplicó en este periodo, pasando de 1,600 a 7,200 millones de habitantes. Para darnos una idea, los seres humanos tardaron más de 150,000 años en llegar a ser 1,000 millones hasta el año 1830, y poco menos de 200 años en añadir 6,200 millones más, concentrándose el grueso de ese crecimiento demográfico en el pasado siglo, en especial en su segunda mitad. Además, a lo largo de los siglos xix y xx los seres humanos han ido incrementado su longevidad y tamaño corporal.

De esta manera se puede hilar el incremento de la población con el estallido de la revolución industrial, la cual combinó el poder de los combustibles fósiles con el de las máquinas, y ambos, con el del capitalismo. Esto permitió un aumento descomunal en la energía disponible para el ser humano en forma de calor (a través del carbón) y de trabajo (la máquina de vapor), como ejemplos de la transformación de la energía en otros tipos. Sin duda, de todas las estrategias utilizadas para conseguir energía (fuego, recolección, caza, agricultura, control sobre su misma especie y otros animales, uso de energías renovables), los combustibles fósiles unidos con las máquinas eran lo que más potencia y versatilidad le habían proporcionado al ser humano, sin preocuparle en ese momento que era una fuente agotable de energía y que su uso debía ser racional y medido (Fernández y González, 2014).

CAJA2.3. DATOS CURIOSOS. EN MÉXICO...

- a) En 2015 se importaron 2,904.28 PJ; es decir, 34.1% de la energía disponible en el país se cubrió con energéticos provenientes del exterior.
- b) Por mandato nacional, para 2024 se generará el 35% de la electricidad a partir de energías no fósiles. Lo anterior es posible solo con fuentes renovables.
- c) El sector transporte representó en 2015 46.4% del Consumo Final Energético, del cual 63.5% está basado sólo en el consumo de gasolina.

La oferta interna bruta de energía se define como la disponibilidad de energía para consumo interno, lo cual contempla la producción, importaciones y variación de inventarios menos la exportación, la energía no aprovechada y la maquila-intercambio neto. Esta energía contabilizó 8,528.87 PJ en 2015. La cantidad de energía enviada al exterior representó 33.9% de la oferta interna bruta, con 3,100.93 PJ, lo que implica que el 40.2% de la producción de energía primaria fue enviada a otros países.

El consumo final de energía de México (la energía que llega a los dispositivos de uso final) alcanzó los 5,283.13 PJ. El sector con mayor consumo de energía fue el de transporte con 46.4%, seguido del sector industrial con 31.4%, y residencial, comercial y público con 18.7%. El sector agropecuario tuvo un consumo menor con el 3.5%. Destaca el consumo final de gasolinas para el sector transporte, tanto por la demanda como por la dependencia de importaciones de este combustible (figura 2.9).

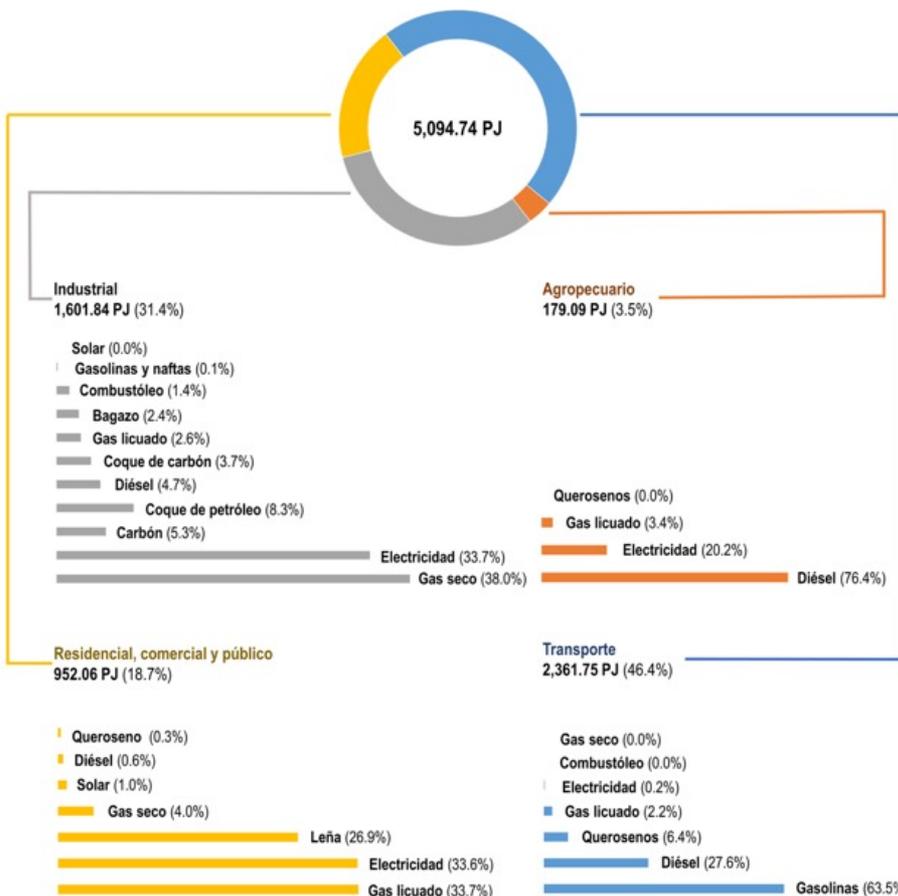


Figura 2.9. Consumo Final Energético por sector. Fuente: BNE, 2015.

2.3. LIMITACIONES DEL BALANCE NACIONAL DE ENERGÍA (BNE)

El BNE tiene algunas limitaciones en cuanto al uso de la energía dentro del sistema energético. En principio, el balance no ofrece ningún tipo de información sobre si se satisfacen las necesidades energéticas de la población. Esto ocurre porque, como vimos anteriormente, el balance sólo cubre hasta la energía final, por lo que no nos brinda información sobre los dispositivos de uso final, la energía útil y la satisfacción de las necesidades (o de si están brindando los servicios energéticos). Esta es una seria limitación, ya que no debemos olvidar que el fin último de la energía es satisfacer las necesidades.

En este sentido, el balance tampoco aporta información sobre si se está haciendo un uso eficiente de la energía en los dispositivos de uso final, lo que no permite identificar posibles oportunidades para el ahorro energético. Esto además es relevante porque a mayor uso de recursos, como veremos más adelante, los impactos ambientales pueden ser también mayores.

Otro aspecto importante que no considera el balance tiene que ver con la planeación energética, es decir, la manera y las fuentes con las que se deben satisfacer las necesidades de energía, ya que, debido a las dos limitaciones anteriormente señaladas, es probable que se hagan planes sobre el uso de energía haciendo un uso ineficiente de la misma forma. En la planeación energética tradicional, el crecimiento económico guarda una estrecha relación con el uso de la energía, por lo que a mayores usos de la energía se atribuyen, generalmente, un mayor crecimiento económico.

De esta manera, se hacen relaciones cuantitativas entre el crecimiento económico y los usos de energía en los sectores de la economía basados en los datos históricos. Posteriormente, se calcula cuál sería la cantidad de energía y de qué tipo, para un determinado crecimiento económico proyectado en el país en cuestión. Si históricamente el uso de la energía ha sido ineficiente, esto mismo se propagará para la nueva energía proyectada. A mayor uso de energía, aumentan los montos de las inversiones, y recordemos que el capital es un bien finito y no necesariamente poco costoso. Además, los impactos ambientales pueden crecer con el aumento del uso de energía.

Existen otras formas de hacer planeación energética con un enfoque hacia la satisfacción de necesidades y hacia el uso eficiente de la energía. Este tipo de planeación se enfoca en los usos finales de la energía y se discute más adelante.

Hemos revisado el BNE, así como su importancia. Si bien el BNE brinda información muy importante sobre el origen y uso de energía, este no nos dice nada sobre las razones que explican las demandas de energía observada. Para dar respuesta a esto, tenemos que poner atención a los llamados Patrones de Consumo Energético.

2.4. PATRONES DE CONSUMO ENERGÉTICO

¿Qué factores determinan la forma en que se consume energía?

Como vimos antes, la energía sirve para satisfacer necesidades como la cocción, iluminación, transporte, entre otras. Para que sea posible generar estos servicios energéticos, es necesario que la energía se encuentre en la forma de transportadores energéticos que pueden ser empleados por los dispositivos de uso final. Para esto es necesario realizar transformaciones de energía, ver caja 2.4.

CAJA 2.4. Principales transformaciones de la energía, así como las tecnologías con las que estas se realizan

	ELECTRO- MAGNÉTICA	QUÍMICA	TÉRMICA	CINÉTICA	ELÉCTRICA	NUCLEAR	GRAVITACIONAL
Eletro- magnética		Quimio- luminiscencia	Radiación térmica	Fósforo Carga acelerada	Radiación electromagnética Electroluminis- cencia	Reacciones gamma Bombas nucleares	
Química	Fotosíntesis Fotoquímica	Procesamiento químico	Hirviendo Disociación	Disociación por radiólisis	Electrólisis	Radiación Catálisis Ionización	
Térmica	Absorción solar	Combustión	Intercambio de calor	Fricción	Calentamiento por resistencia	Fisión Fusión	
Cinética	Radiómetros	Metabolismo Músculos	Expansión térmica Combustión interna	Engranajes	Motor Electrostricción	Radioacti- vidad Bombas nucleares	Objetos en caída

Eléctrica	Celdas solares Fotoelectricidad	Celdas de combustible Baterías	Termoelectricidad Termiónica	Generador convencional		Baterías nucleares	
Nuclear	Reacciones gamma-neutrón						
Gravitacional				Objetos en ascenso			

Fuente: Smil (2017).

Una vez que la energía se tiene en formas en las que puede ser utilizada por los dispositivos de uso final, es necesario estudiar con más detalle las razones que explican las ofertas y demandas de energía observadas en los BE. Para esto es importante el concepto de patrones energéticos.

El patrón energético es la forma en que se consume la energía a diferentes escalas geográficas (localidad, región, país, mundo), y toma en cuenta:

- Qué *recursos* energéticos (o combustibles) se utilizan (oferta energética).
- Las *tecnologías* que los transforman.
- Los *sectores* en los que se consumen.
- Los *usos finales* a los que se destina la energía (demanda energética, los cuales a su vez pueden depender de cuestiones como el clima).

Los recursos energéticos que se emplean en una zona geográfica, como un país, pueden estar influidos por los recursos propios de dicho país. Por ejemplo, en México la industria empleaba de manera muy importante el combustóleo para la generación de calor. Lo mismo ocurría con el sector eléctrico. Esto se debía a que México contaba con amplias reservas de petróleo (ver capítulo 7). Algo similar puede observarse en Brasil, donde al contar con amplios recursos hídricos, una parte importante de su suministro energético está dado por este recurso. Los países que no cuentan con suficientes recursos energéticos para satisfacer su demanda tienen que importarlos de otros.

Las tecnologías de transformación de energía también son relevantes, ya que estas cuentan con ciertas eficiencias que determinan el tipo y la cantidad de energía primaria que será requerida para transformarla en energía secundaria y, a su vez, para los usos finales, los cuales, de manera agregada, dan como resultado el consumo energético de un país o región. Por ejemplo, las plantas termoeléctricas tienen eficiencias en el rango de 30 al 40%, en tanto que las plantas de ciclo combinado (que funcionan con gas natural) pueden alcanzar eficiencias del 57%.

Por su parte, los sectores económicos también influyen ampliamente en el consumo energético. Los principales sectores son: residencia y comercial; transporte; industrial y agropecuario. Por lo general los países con una alta industrialización tienen altos consumos energéticos, mientras que los países con economías más dependientes del sector primario tienen menores consumos. Esto puede apreciarse si revisamos el consumo de energía en los distintos tipos de sociedades que han ocurrido en la historia (cuadro 2.2).

CUADRO 2.2.
CONSUMOS DE ENERGÍA Y MATERIALES DE DISTINTAS
SOCIEDADES EN LA HISTORIA

	SOCIEDADES FORRAJERAS	SOCIEDADES AGRÍCOLAS	SOCIEDADES INDUSTRIALES
Uso de energía per cápita (GJ/hab/año)	10-20	40-70	150-400
Uso materiales per cápita (t/hab/año)	0.5-1	3-6	15-25
Densidad de población (hab/km ²)	0.025-0.115	<40	<400
Población dedicada a labores agrícolas (%)	-	>80	<10
Uso de energía por ha (GJ/ha/año)	<0.01	<30	<600
Uso de materiales por ha (t/ha/año)	<0.001	<2	<50
Biomasa para usos energéticos (%)	>99	>95	10-30

Uso de materiales para fines no energéticos (%)	<5	<20	>50
Cantidad de materiales acumulados (t/hab)	<0.01	<10	100-1000

Fuente: Kraussman (2011) citado en Fernández y González (2014).

El consumo o demanda de energía es función de la población, la economía, los productos consumidos, producidos e importados, así como de las tecnologías empleadas. Lo anterior puede expresarse como una función:

$$E_{total} = f(\text{Población, Economía} - \text{Productos Consumidos/} \\ \text{Producidos/Importados}, \text{Tecnología utilizada})$$

A nivel general se ha visto que los patrones de consumo energético dependen mucho de:

- El nivel de desarrollo (entendido como el tipo y consumo de productos industriales, en tanto más industrializado está un país, mayor es su consumo energético).
- El lugar de consumo: urbano o rural. En general los habitantes de las ciudades presentan mayores consumos energéticos tanto por la cantidad de dispositivos de uso final, como de las distancias más largas de traslado para realizar sus actividades como trabajo o estudio, en comparación con los habitantes de zonas rurales. Las fuentes de energía también pueden ser diferentes. Por ejemplo, en muchas zonas rurales y periurbanas, el principal consumo energético está dado por la leña que se requiere para cocinar y para calentar espacios; en tanto que a nivel residencial los mayores consumos energéticos son de electricidad y gas licuado de petróleo.
- El nivel de ingreso de la población. En general, las personas con mayores ingresos, al tener importante poder de compra, pueden acceder a una mayor cantidad de dispositivos de uso final como automóviles, hornos de microondas, aires acondicionados, consolas de videojuegos, entre otros. Esto resulta en mayores consumos energéticos.

Para la planeación energética, es decir, cómo se van a satisfacer las necesidades energéticas en un horizonte de tiempo determinado, se utiliza mucho el concepto de *intensidad energética*, la cual se puede definir como la cantidad de energía necesaria para producir una unidad de PIB. La energía total consumida, desde este enfoque, estaría dada por:

$$E_{total} = P * (PIB/cap) * (Energía/PIB)$$

Es decir, el consumo de energía depende de la población total del país (P), su opulencia (PIB/cap) y su intensidad energética.

Este enfoque para las estimaciones de demandas energéticas ha sido criticado debido a que no captura avances en las eficiencias en las tecnologías de conversión o de uso final, lo que resulta en sobre estimaciones de consumo de energía (Goldemberg *et al.*, 1987).

Otra forma de estimar los consumos de energía es a partir de los usos finales:

$$E_{total} = \sum_{sectores} \sum_{usos\ finales} (saturación) * (consumo\ unitario)$$

Donde saturación (S) es el % de población/viviendas/industrias que tiene un determinado dispositivo, multiplicado por la población/viviendas totales, y el consumo unitario (CU), que es el consumo anual de energía promedio por dispositivo.

Este enfoque es importante porque permite resaltar el papel de la energía como un medio para satisfacer necesidades y, a la vez, apreciar el potencial del ahorro y eficiencia energética. En un trabajo de Goldemberg *et al.* (1987) se presenta un escenario global en el cual se definen una serie de necesidades energéticas básicas de la población, así como los dispositivos más eficientes en ese tiempo para lograr satisfacer dichas necesidades. Los resultados de dicho escenario presentan que para el 2020 (tomando en cuenta 1980 como el año de partida), el consumo de energía sólo se incrementaría en un 10%, considerando el aumento de la población. El escenario es contrastado por los autores con otros realizados por agencias e institutos internacionales a partir de proyecciones de tipo tradicional en la planeación energética (de arriba hacia abajo). Los resultados de estos escenarios muestran consumos energéticos en un rango del doble al triple en comparación con el consumo de 1980. De esta forma, es posible apreciar la importancia de los es-

tudios a partir de usos finales para hacer un uso racional de la energía. Este enfoque permite además analizar distintas opciones tecnológicas para satisfacer necesidades (ya sea a nivel residencial, comercial, industrial u otro); por ejemplo, se pueden contrastar los beneficios económicos y ambientales de calentar agua a nivel residencial haciendo uso de calentador de gas o bien de calentadores solares. De igual forma, esta perspectiva permite entender nuestras necesidades y las tecnologías de uso final como factores clave para determinar la demanda energética, tanto a nivel individual, como a nivel local, regional o nacional.

En los próximos capítulos se estudiarán con más detalle los sectores de consumo energético, así como sus implicaciones ambientales, y en algunos casos, sociales.

2.5. EJERCICIOS

Observa lo que sucede en tu ciudad y responde lo siguiente:

1. ¿Cuáles son los energéticos primarios y secundarios más empleados en tu ciudad?
2. Calcula el potencial energético (en PJ/año) de establecer 10 millones de hectáreas de plantaciones energéticas de distintos árboles en México si: el rendimiento de las plantaciones es de $15 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$, la densidad de la madera es $0.6 \text{ ton}/\text{m}^3$ y el equivalente energético de la biomasa es $15 \text{ MJ}/\text{kg}$.
3. La producción de energía primaria en el Balance Nacional de Energía de 2013 fue:

TOTAL	9,020.21
Carbón	316.27
Hidrocarburos	7,945.54
Petróleo	5,798.74
Condensados	101.20
Gas natural	2,045.61
Nucleoenergía	122.60

Renovables	635.80
Hidroenergía	100.66
Geoenergía	131.33
Solar Energía	7.52
eólica	15.07
Biogás	1.97
Biomasa	379.26
Bagazo de caña	123.83
Leña	255.42

Respecto a la producción de energía primaria, a) calcula el porcentaje aportado por los hidrocarburos y por los renovables, b) ¿cuántas veces es mayor la producción de hidrocarburos que la de renovables?

- Tomando datos del Sistema de Información Energética, grafica la venta de petróleo crudo (en millones de dólares) de México y las compras (importaciones) de gasolina y diésel. ¿Qué puedes comentar sobre la gráfica? ¿Qué puedes argumentar sobre la viabilidad económica de esta práctica para el país?

Reflexionando un poco más, piensa en las respuestas a las siguientes preguntas...

¿Cuáles son las necesidades energéticas básicas intangibles que una persona necesita satisfacer, sin las que no sobreviviría más allá de un corto plazo de tiempo (días)?

¿Cuáles son las necesidades energéticas básicas tangibles que una persona necesita satisfacer, sin las que no sobreviviría más allá de un mediano-largo plazo de tiempo (meses-años)?

¿Hay necesidades energéticas secundarias, sin cuya satisfacción una persona pueda sobrevivir al corto, mediano y largo plazo?

¿Cuáles son las tareas principales y secundarias del sector energético? ¿Con qué energéticos se satisfacen esas tareas?

¿Qué organismos e instituciones integran el sector energético?

Para saber más:

1. Balance Nacional de Energía 2019. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/414843/Balance_Nacional_de_Energ_a_2017.pdf
2. Balance Nacional de Emisiones y su Relación con el Inventario Nacional de Emisiones 2010. https://rde.inegi.org.mx/rde_01/doctos/rde_01_opt.pdf
3. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010. <https://www.gob.mx/inecc/documentos/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-con-cifras-1990-2010>
4. Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. <https://unfccc.int/resource/docs/natc/mexnc5s.pdf>

2.6. BIBLIOGRAFÍA

FERNÁNDEZ, R. y L. GONZÁLEZ. 2014. *En la Espiral de la Energía* Vol. 1. Libros en Acción. Madrid.

GOLDEMBERG, J., T. B. JOHANSSON, A. K. N. REDDY y R. H. WILLIAMS. 1987. *Energy for a Sustainable World*. World Resources Institute. New Delhi.

GEA (Global Energy Assessment). 2012. *Toward a Sustainable Future*. Cambridge University Press / International Institute for Applied Systems Analysis. Cambridge-New York-Laxenburg.

IEA (International Energy Agency). 2012. *Energy Balances of OECD Countries 2012*. OECD Publishing. Paris. https://doi.org/10.1787/energy_bal_oecd-2012-en

IEA (International Energy Agency). 2012. *Technology Roadmap - Bioenergy for Heat and Power*. IEA. Paris. <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-bioenergy-for-heat-and-power>

- IEA (International Energy Agency). 2014. *World Energy Outlook 2013*. OECD/IEA. Paris.
- IEA (International Energy Agency). 2016. *World Energy Outlook 2015*. OECD/IEA. Paris.
- IRASTORZA, V. y X. FERNÁNDEZ. 2010. Balance Nacional de Energía y su relación con el Inventario Nacional de Emisiones. *Revista internacional de estadística y geografía*. 1(1): 52-72.
- MALKINA-PYKH, I. G., y. A PYKH. 2002. *Sustainable Energy: Resources, Technology and Planning*. WIT Press. Southampton.
- SENER (Secretaría de Energía). 2008. Balance Nacional de Energía 2007. Sener. México.
- SENER (Secretaría de Energía). 2009. Balance Nacional de Energía 2008. Sener. México.
- SENER (Secretaría de Energía). 2010. Balance Nacional de Energía 2009. Sener. México.
- SENER (Secretaría de Energía). 2011. Balance Nacional de Energía 2010. Sener. México.
- SENER (Secretaría de Energía). 2012. Balance Nacional de Energía 2011. Sener. México.
- SENER (Secretaría de Energía). 2013. Balance Nacional de Energía 2012. Sener. México.
- SENER (Secretaría de Energía). 2014. Balance Nacional de Energía 2013. Sener. México.
- SENER (Secretaría de Energía). 2015. Balance Nacional de Energía 2014. Sener. México.
- SENER (Secretaría de Energía). 2021. *Sistema de Información Energética*. <https://sie.energia.gob.mx/>
- SMIL, V. 2017. *Energy: A beginner's guide*. Oneworld Publications. London.

Capítulo 3

Sector transporte

ALFREDO F. FUENTES G

3.0. INTRODUCCIÓN

El transporte, ¿necesidad o necesidad?

¿Cuál es el impacto de usarlo concienzudamente?

La movilidad es una necesidad humana esencial. La supervivencia humana y la interacción social dependen de la capacidad de mover personas y bienes (Ribeiro *et al.*, 2007).

El transporte fue concebido para facilitar y agilizar el traslado de un lugar a otro de materias primas, productos, animales y personas. Ha pasado de carretas a camionetas, de pangas o balsas a grandes barcos y de coches grandes y pesados a coches grandes y pesados (y no es un error de redacción). Sobre estos últimos, y a pesar de que lo grande, pesado e ineficiente es menos importante a verse bien o “poderoso”, ha habido algunas industrias automotrices que sí se han preocupado por fabricar coches eficientes. En este capítulo abordaremos la situación actual del sector transporte a nivel mundial y de México, además de las alternativas que existen.

La importancia del transporte para el ser humano ha estado presente desde la etapa primitiva. En el cuadro 3.1, se describen las etapas más importantes del transporte a través de la historia del ser humano.

El desarrollo económico y el transporte están inextricablemente vinculados. El desarrollo aumenta la demanda de transporte, mientras que la disponibilidad de transporte estimula aún más el desarrollo al permitir el comercio y la especialización económica. La industrialización y la creciente especialización han creado la necesidad de grandes envíos de bienes y materiales a grandes distancias; la aceleración de la globalización ha aumentado enormemente estos flujos. (Ribeiro *et al.*, 2007).

CUADRO 3.1
PRINCIPALES NECESIDADES DEL SER HUMANO
CUBIERTAS POR EL TRANSPORTE

ETAPA	TECNOLOGÍA	NECESIDAD CUBIERTA
Primitiva	<ul style="list-style-type: none"> • El ser humano hace uso de sí mismo como modo de transporte (piernas, brazos e imaginación). • Domesticación de animales para uso como tracción o modo de transporte. • Elaboración de las primeras embarcaciones (balsas) para aprovechar la fuerza de los ríos o de los vientos para desplazarse. 	<ul style="list-style-type: none"> • Moverse y acarrear lo necesario para su supervivencia.
Feudal*	<ul style="list-style-type: none"> • Egipcios: plataformas de madera con troncos deslizantes. • Romanos (tiempo después que los egipcios): caminos con alto grado de previsión y diseño, carretas tiradas por caballos. • Tenochtitlán: técnicas de navegación y construcción de vías acuáticas. • Grandes imperios: creación de técnicas para la construcción de vehículos, caminos, naves, etc. Grandes viajes transoceánicos y establecimiento de rutas comerciales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de civilizaciones, mayor cantidad de bienes por transportar y distancias más largas por recorrer.
Industrial	<ul style="list-style-type: none"> • Máquina de vapor (locomotora de vapor o primer tipo de ferrocarril). • Ubicación, diseño y construcción de vías, terminales y carros adecuados. • Invención del cemento portland. • Desarrollo del ferrocarril. • Inicio del desarrollo del transporte aéreo. • Diseño de los primeros planeadores (Lilienthal, origen de la aerodinámica). 	<ul style="list-style-type: none"> • Mover grandes volúmenes de productos y materia prima.

<p>Moderna (finales del siglo XIX)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Presión de las industrias del automóvil y petrolera para dar preferencia a la manufactura, perfeccionamiento e investigación de los vehículos de combustión interna dejando a un lado lo relacionado con los vehículos eléctricos. • Desarrollo de la industria de la aviación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dominar los mercados de venta. • Mover grandes cantidades de personas.
--	--	---

Fuente: Islas y Lelis, 2007.

*Sin fecha precisa del surgimiento de esta etapa. La solución que cada civilización dio al problema planteado fue dada de acuerdo a su nivel de desarrollo cultural.

Murrieta (2013) remarca la importancia de la infraestructura de transporte en México porque:

- Es un factor determinante para el desarrollo económico.
- Brinda comunicación permanente entre los centros de población con los polos regionales de desarrollo, centros de producción y consumo.
- Es un factor para elevar la competitividad: reduce costos y tiempos de transporte, facilita el acceso a mercados e integra cadenas productivas.
- Contribuye a fortalecer la paz social y la seguridad.
- El bienestar de las naciones está relacionado con el grado de desarrollo de su infraestructura.
- Facilita el acceso a servicios de educación y salud.
- Contribuye a eliminar desequilibrios regionales

Sin embargo, no todos los subsectores del transporte han evolucionado de la misma forma. El crecimiento acelerado de las grandes ciudades mexicanas se ha dado en un contexto de deficiencias y vacíos de la planeación urbana y su normatividad; de carencia de reservas territoriales y oferta de suelo adecuado; y de extensiones y zonas dispersas fragmentadas y excluyentes. La expansión territorial conlleva un desarrollo urbano de baja densidad con alta dependencia del automó-

vil y sin previsión de sistemas integrados de transporte público adecuados, a pesar de ser el medio más utilizado por la mayoría de la población, lo que ha agravado el problema de la movilidad urbana (ONU-Hábitat, 2015).

Algunas de las políticas que han incentivado el uso del automóvil son: el subsidio a la gasolina, la eliminación del impuesto a la tenencia vehicular, la falta de políticas nacionales de seguro de daños a terceros obligatorio, las políticas de apertura comercial que facilitan el ingreso al país de autos usados, las políticas financieras de hipoteca y crédito automotriz asociadas a la planeación urbana, así como la prioridad del gasto público en infraestructura para el transporte privado. Esta última ha sido esencial, pues al enfocarse en el desarrollo de infraestructura vial para los automóviles, deja de lado el mejoramiento y ampliación de la oferta de transporte público y no motorizado. Además, en lugar de solucionar el problema de congestiónamiento, más calles para más coches, sólo genera el fenómeno conocido como tráfico inducido (ITDP, 2012).

3.1. CONSUMO DE ENERGÍA Y EMISIONES EN EL SECTOR TRANSPORTE

*¿Cuánta energía se invierte en el transporte?, ¿es igual aquí que en China?,
¿y en México cómo andamos?*

A nivel mundial el consumo de energía para el sector transporte es muy similar al consumo de energía para el sector industrial (figura 3.1). En México, en cambio, el consumo energético en el sector transporte ocupa el primer lugar y es 47% mayor que el sector industrial (figura 3.2).

Aunque el sector transporte en México está conformado por cinco subsectores (autotransporte, aéreo, marítimo, ferroviario y eléctrico) nos centraremos en el subsector autotransporte porque es el que, por mucho, contribuye más en cuanto al consumo energético y, por ende, tiene mayores implicaciones ambientales. Una vez acotado esto, y como podrás ver en la figura 3.2, tenemos la contribución de los diferentes energéticos en este subsector, donde la gasolina y el diésel marcan la pauta; de los 2,101 PJ consumidos en el subsector autotransporte, 1,513 PJ se consumen en forma de gasolina y 546 PJ en forma de diésel.

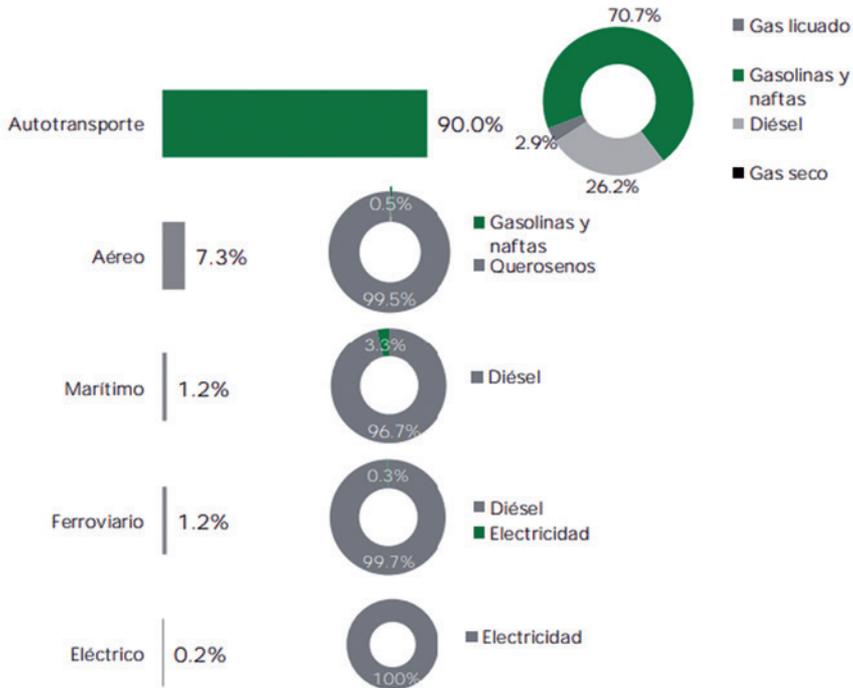


Figura 3.1. Consumo de energía del sector transporte.

Fuente: BNE, 2011.

¿Qué implicaciones ambientales tiene el sector transporte?
¿Cuánto se emite en CO₂? ¿Cuánto es una tonelada de CO₂?

En un país primordialmente petrolero como es el nuestro, y para la mayoría de las fuentes energéticas disponibles, el factor de emisión por unidad de energía usada es alto (inclusive para la electricidad porque no contamos con un porcentaje relevante de fuentes renovables). La ecuación sencilla, *mayor energía usada = mayor impacto ambiental*, desafortunadamente aplica en México.

En el año 2009, las emisiones nacionales de CO₂ per cápita, considerando únicamente las emisiones por consumo de combustibles fósiles, fueron de 3.75 toneladas, mientras que el promedio mundial fue de 4.1 toneladas de CO₂ per cápita (como se cita en Semarnat, 2013, XVIII). Para el año 2010, la contribución de emisiones de

gases de efecto invernadero del sector transporte fue de un poco más del 22% según el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010 (Semarnat, 2013). En este mismo documento se puede observar que las emisiones totales en 2010 mostraron un incremento del 33% respecto a las emisiones de 1990. Este aumento se debe al uso intensivo del automóvil (sobre todo en las zonas metropolitanas), el crecimiento del parque vehicular y la ampliación de la superficie urbana.

El reporte *Ecozonas, una propuesta para mejorar la calidad del aire y la movilidad en la Megalópolis*—realizado por el Centro Mario Molina—detalla que en la ZMVM (Zona Metropolitana del Valle de México) 31% de la contaminación por partículas suspendidas menores a 2.5 micras proviene de los vehículos automotores, generando serios problemas de salud pública principalmente en la población vulnerable como niños menores de seis años y adultos mayores.

Pero el impacto no es sólo por emisiones de CO_2 o de partículas suspendidas, también se emiten CO (monóxido de carbono, gas elevadamente tóxico), N_xO_y y SO_2 (óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre, gases formadores de lluvia ácida), entre otros (Semarnat, 2016).

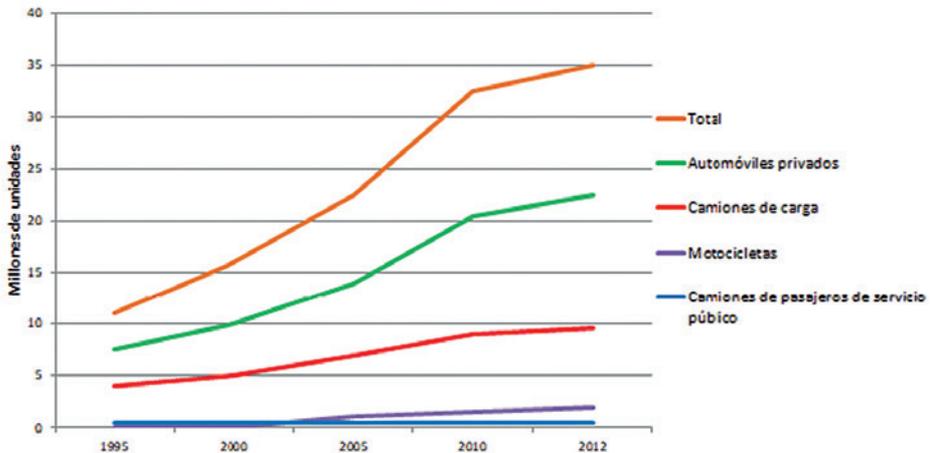
Actividad. Un automóvil a gasolina emite alrededor de una tonelada de CO_2e^1 cada 5,000 kilómetros recorridos. Compruébalo: si el factor de emisión de la gasolina según el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) es de 3172.31 gCO_2/kg de gasolina y la densidad de la gasolina es 0.735 kg/L , además, el rendimiento de un coche promedio es de 11.5 km/L .

Actividad. Si en la figura 2.9 se muestra que el sector transporte contribuye con el 46.4% del uso energético y más adelante se menciona que la contribución de emisiones de gases de efecto invernadero por el sector transporte fue de un poco más del 22%, ¿a qué se debe esta “diferencia” de magnitud?

Las implicaciones ambientales del uso de autotransporte aunado al aumento del parque vehicular, el cual se espera que mantenga su tendencia (figura 3.2), ha-

¹ Recuerda que las emisiones de CO_2e (CO_2 equivalente) se refiere al impacto ambiental generado por el CO_2 y otros gases como el CH_4 , los NO_x , etc., cuando se toma en cuenta el poder de calentamiento global de cada uno de los gases.

cen inminente la búsqueda de alternativas que disminuyan los impactos ambientales, sociales y a la salud por el autotransporte. En los capítulos siguientes se mostrarán algunas alternativas que buscan este fin.



Nota: incluyen el total de camiones de uso público
Incluye motocicletas de alquiler y de uso oficial y particular

Figura 3.2. Parque vehicular registrado en México 1995-2012.

Fuente: ONU-Habitat.

3.2. ALTERNATIVAS PARA EL SECTOR TRANSPORTE

¿Qué alternativas existen para consumir menos energía?, ¿cómo se podrían reducir las emisiones en el sector transporte?

Como se mencionó anteriormente, las mayores implicaciones ambientales del sector transporte recaen en el subsector autotransporte, es por ello que se plantean alternativas para este subsector.

3.2.1. Eficiencia y conservación de energía en el sector transporte

Para 2013 en México, el número de vehículos era de 36,742,180 (INEGI, 2016), un vehículo por cada tres personas. En la actualidad, un número muy alto de automóviles conlleva a un número muy alto de consumo de combustibles fósiles: gasolina y diésel.

Cuando hablamos de *eficiencia* como alternativa en el sector transporte, nos referimos a reducir el consumo de energía de los vehículos, y la *conservación de la energía* se refiere a reducir el uso mismo de los vehículos.

El tema de eficiencia lo podemos dividir en:

- Eficiencia del combustible.
- Eficiencia de los vehículos (diseño).

La *eficiencia del combustible* (o rendimiento del combustible) se puede medir como:

$$\frac{\text{km}}{\text{L}} = \frac{\text{metros recorridos}}{\text{Litros de combustible}} = \frac{\text{km}}{\text{L}}$$

y tiene que ver con varios factores: el tipo de motor (a gasolina o a diésel, por ejemplo), si los automóviles son de transmisión manual o automática (por lo regular los primeros tienen un rendimiento un poco mayor que los segundos) e inclusive si se usa en ciudad o en carretera. En el cuadro 3.2 se muestran ejemplos de rendimientos. Como puedes observar, actualmente es posible elegir cuánto quieres consumir de combustible (al menos aproximadamente) cuando te transportas. A nivel de países existen también datos de cómo han ido evolucionando en su búsqueda por tener vehículos cada vez más eficientes (figura 3.3).

CUADRO 3.2. RENDIMIENTOS DE COMBUSTIBLES

MODELO	TRANSMISIÓN	COMBUSTIBLE	RENDIMIENTO (KM/L)		
			CIUDAD	CARRETERA	COMBINADO
Jetta GP 2.0 115 HP AUT	Automática	Gasolina	11.81	20.66	15.79
Jetta GP 2.0 115 HP MAN	Manual	Gasolina	11.63	21.69	16.16

Jetta GP 1.9 100 HP MAN TDI	Manual	Diesel	14.29	21.74	17.64
CRV (Honda)	Automática	Gasolina	10.3	14.5	12.19

Fuente: Elaboración propia modificado de Conuee, 2011.

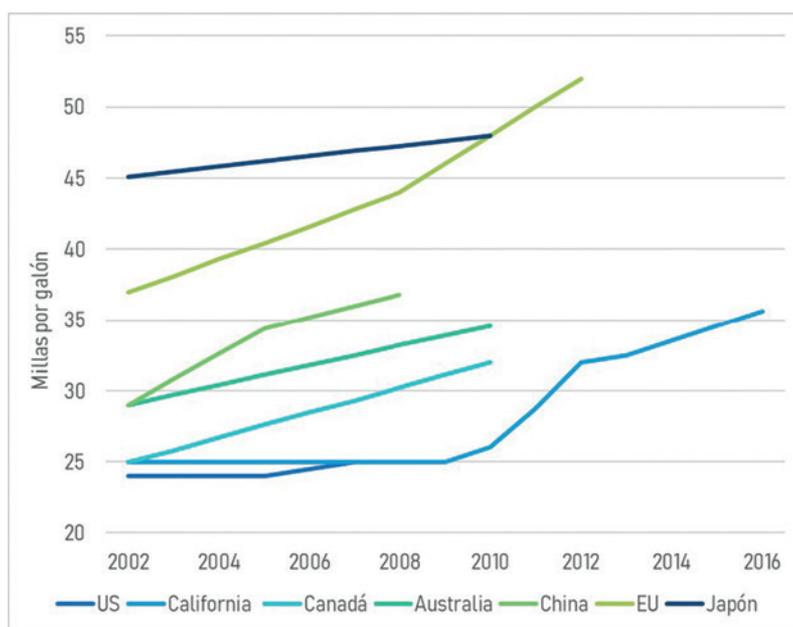


Figura 3.3. Ejemplos de evolución de la eficiencia energética de los automóviles por región-país.

Elaboración propia con datos de Tendradue y Carranza, 2014.

La *eficiencia de los vehículos* tiene que ver con el diseño propio de los vehículos donde la investigación sobre aerodinámica y materiales más ligeros entra al quite, por eso ya se sabe que los vehículos más pesados tienen una eficiencia menor que los ligeros. En la figura 3.4 se muestra un ejemplo de un automóvil diseñado con material ligero.



La sección del techo está hecha de fibras de kenaf y ramío junto con un bioplástico. El cuerpo está hecho de CFRP (polímero reforzado con fibra de carbono). Su rendimiento es de casi 46 km/L.

Figura 3.4. Ejemplo de un automóvil con material ligero.

Fuente: Johnson, 2017; Smith, 2007.

**CAJA3.1. CONTAMINAR MUCHO NO ES PARA CUALQUIERA.
CONTAMINAR CUESTA.**

Una Hummer puede llegar a contaminar 2.5 veces más que un coche pequeño. Ambos sirven para transportarnos, pero en el primero te ves más “cool”. Se le preguntó al Sr. Don Revillagigedo Sanz de la Peña qué opinaba de esto y dijo: “Me siento muy orgulloso, mi trabajo me ha costado, tengo dos Hummers y si contaminan más que otros vehículos, se compensa por lo que me costó”.

Actividad. Un automóvil que circula en la Ciudad de México tiene un rendimiento de 13 km/L y recorre 12,000 km al año. Calcula el consumo energético en un año (en Joules) y las emisiones de CO₂ si el 96% de la masa de la gasolina es carbono, del cual el 90% se convierte en CO₂. El poder calorífico de la gasolina es de 36 MJ/L y su densidad es de 0.77 kg/L.

Actividad. En 2017 se consumieron en México 2,125 PJ de gasolina. Calcula las emisiones de CO₂ de este volumen de gasolina. Compáralo con las emisiones totales del país por el Cambio en el Uso de Suelo.

Pregunta. Sobre los resultados obtenidos, ¿qué implicaciones ambientales crees que tengan ambos casos?

3.2.2. Nuevas tecnologías

Los automóviles más comúnmente usados en la actualidad son los de combustión interna (a gasolina o diésel), pero existen otras tecnologías tales como los automóviles híbridos (figura 3.5). Estos automóviles tienen acoplado un motor de combustión interna (MCI) con un motor eléctrico. Existen tres tipos básicos: en serie, en paralelo y combinado. En los tres casos, el motor eléctrico es alimentado desde un paquete de baterías que es recargada por el motor de combustión interna MCI (IEA/OECD, 2009). Por otro lado, están los automóviles conectados a la red (figura 3.6), los cuales son esencialmente similares a los híbridos excepto que también tienen la capacidad de obtener electricidad de la red para cargar sus baterías (IEA/OECD, 2009) y requieren motores eléctricos con suficiente potencia para conducir el vehículo por sí mismos hasta antes de cargarlos. También están disponibles los automóviles que funcionan al 100% con electricidad (sin la necesidad de un MCI) (figura 3.7), estos ofrecen la perspectiva de “vehículos cero emisiones”² y con niveles de ruido muy bajo. Una importante ventaja que presentan es su alta eficiencia y un costo del motor eléctrico relativamente bajo; la principal desventaja es la necesidad de depender exclusivamente de las baterías, que son medios de almacenamiento de energía costosos, pesados y complejos (IEA/OECD, 2009).

En el cuadro 3.3 se muestra una gama de materias primas y combustibles que se usan actualmente en los diferentes tipos de automóviles. Como ejemplo, ponemos el caso de los vehículos de gas natural comparados con los vehículos de combustible convencional. Según la Natural & bio Gas Vehicle Association (NGVA), los primeros pueden reducir las emisiones de gases de escape con respecto de los segundos de la siguiente forma (García *et al.*, 2010):

- Monóxido de carbono (CO) en un 70%.
- Gas orgánico que no sea metano en un 87%.
- Óxidos nitrosos (NO_x) en un 87%.
- Dióxido de carbono (CO₂) en un 20%.

² El nivel de mitigación de los automóviles eléctricos no es necesariamente “cero emisiones” puesto que depende del tipo y la cantidad de las fuentes energéticas (en la mayoría de los casos no renovables) con que se produzca la electricidad.

CUADRO 3.3
FUENTES ENERGÉTICAS Y SU PROCESO DE PRODUCCIÓN

COMBUSTIBLE	MATERIA PRIMA	PROCESO
Combustibles de petróleo líquido: gasolina, diésel, keroseno.	Aceite de fuentes convencionales y no convencionales (crudo pesado y arenas bituminosas).	Refinación.
Combustibles sintéticos líquidos.	Gas natural, carbón.	Gasificación.
Biodiésel	Cultivos oleaginosos, grasas animales.	Esterificación e hidrogenación.
Etanol.	Cultivos de granos.	Sacarificación y destilación.
Etanol.	Cultivos de azúcar (caña).	Destilación.
Biodiesel avanzado.	Biomasa de cultivos o productos residuales.	Gasificación.
Gas natural comprimido.	Gas natural.	Gasificación.
Electricidad.	Carbón, gas, petróleo, energía nuclear, renovables.	Mezclas de procesos, depende de cada región.
Hidrógeno (H ₂).	Gas natural.	Reformación, compresión.
	Electricidad.	Electricidad.

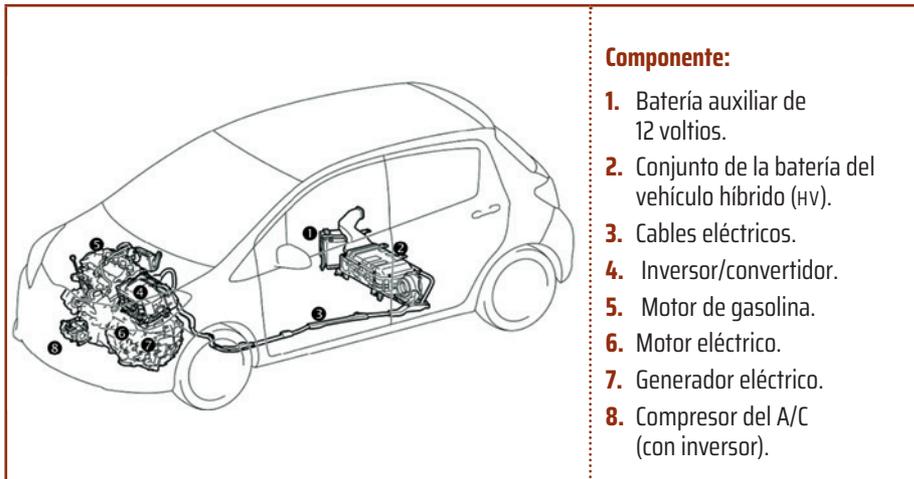


Figura 3.5. Ejemplo de automóvil híbrido.

Fuente: TMC, 2012.



Figura 3.6. Ejemplo de automóvil híbrido conectado a la red eléctrica.

Fuente: NREL, 2015.

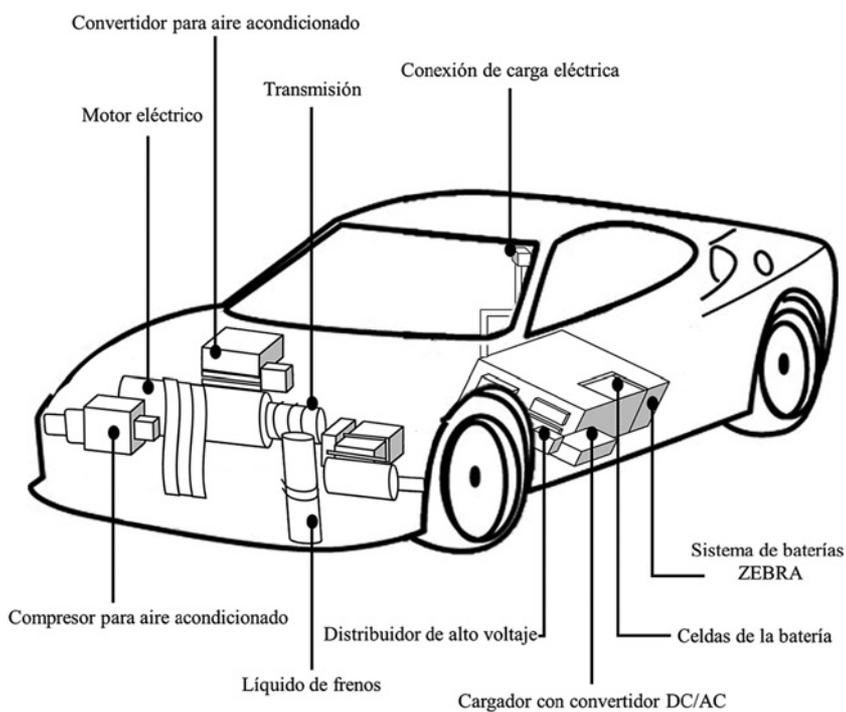


Figura 3.7. Ejemplo de automóvil eléctrico.

Fuente: Elaboración propia con datos de De la Herrán, 2014.

Cuando queremos determinar el impacto ambiental por el uso de coches eléctricos (ya sean parcialmente o 100% eléctricos), un aspecto fundamental a considerar es el tipo de fuente que se usó para producir la electricidad, puesto que hay países más renovables que otros en su red eléctrica. En la figura 3.8 se muestra un panorama de la generación de electricidad en diferentes países del planeta. Como se puede observar, existen países, como México, que dependen en su mayoría de fuentes energéticas con fuertes emisiones de CO₂, es por ello que sólo logran valores de 20% de la producción de electricidad con bajas emisiones. Con este dato, ¿consideras que un uso masivo de coches eléctricos en nuestro país mitigaría de forma importante las emisiones de CO₂e?

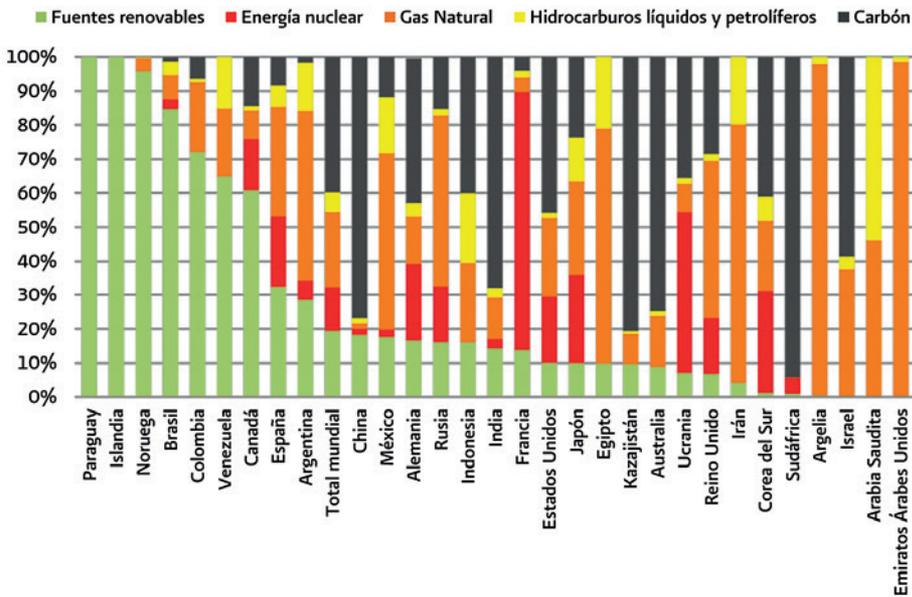


Figura 3.8. Generación de electricidad por tipo de fuente.

Fuente: elaboración propia con datos de Sener, 2012.

3.2.3. Cambios en el modo de transporte

Además, seguimos teniendo la posibilidad de cambiar el medio de transporte y no sólo quedarnos con el automóvil, las opciones son varias y se pueden combinar:

Caminar, andar en bicicleta, tren, compartir el automóvil, etcétera.

Un ejemplo de combinación de modos es el uso de la bicicleta y el metro (de uso común en ciudades europeas, pero con muchas barreras actualmente en nuestro país), pero también puede haber intersección de redes, que se refiere, por ejemplo, al uso de ciclovías (con espacios bien definidos) junto a las calles; cambios intermodales donde en vez de ir en automóvil a tomar el tren, se puede ir en bicicleta porque se cuenta con la infraestructura adecuada. Una forma de incentivar el uso de otras formas de transporte es tener el conocimiento de cuántos Gases de Efecto Invernadero (GEI) se pueden mitigar de en cada una de las opciones. En la figura 3.9 se muestran las emisiones GEI de diferentes formas de transporte.

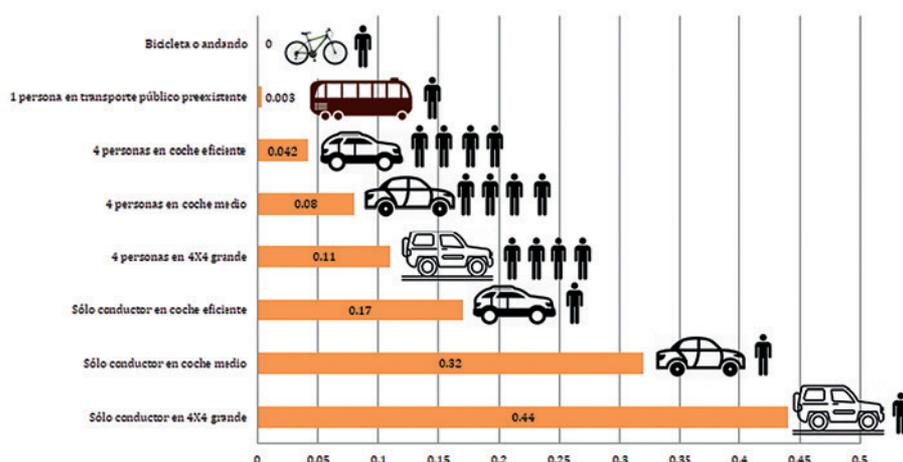


Figura 3.9. Emisiones de GEI de diferentes medios de transporte (Kg CO₂e) per cápita y distancia (Km).

Fuente: Ecologistas en acción, 2017.

Pero los problemas asociados al transporte y especialmente al transporte individual no están relacionados solamente al consumo de energía y sus emisiones respectivas, sino también a una cuestión de espacio, ¿cuántos coches podemos ver

estacionados a ambos lados de la calle? o ¿cuántos estacionamientos enormes enfrente de los centros comerciales? Un coche, en promedio, necesita de una zona de estacionamiento de 2.5 a 5 metros (12.5 m^2), en cambio una bicicleta únicamente necesita un espacio de 1.5 m^2 en promedio (Beltrán *et al.*, 2010). En la figura 3.10 se presenta un experimento realizado en Münster, Alemania, donde se muestra el espacio ocupado para transportar a 70 personas mediante diferentes medios de transporte: automóviles, bicicletas y autobús público.

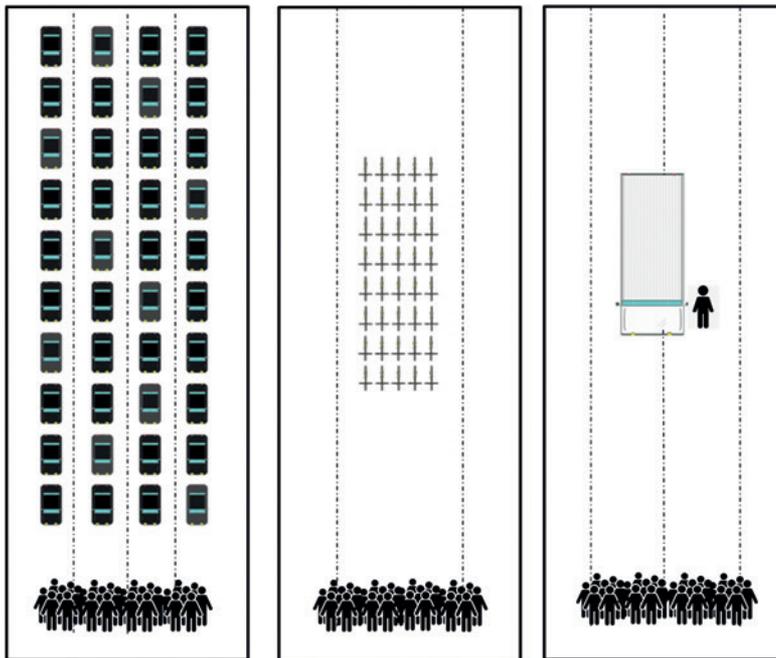


Figura 3.10. Espacio ocupado por diferentes medios de transporte.

Fuente: Beltrán *et al.*, 2010.

3.2.4. Planeación urbana

En México, como en la mayoría de los países de Latinoamérica, la planeación urbana se hace privilegiando al automóvil particular. El incremento de la *infraes-*

estructura urbana es en su mayoría *infraestructura para el transporte*. La falta de integración del transporte con la planeación del desarrollo urbano ha sido la causa principal del modelo desarticulado de movilidad que predomina en las ciudades mexicanas, así como de las pérdidas que esta situación genera por las externalidades negativas que origina: descenso en la productividad económica, impacto en la salud de los habitantes y en la calidad de vida y el deterioro ambiental (ONU-Habitat, 2015).

Se ha probado que la construcción y ampliación de nueva infraestructura vial para satisfacer la demanda creciente de tráfico motorizado, y que además va orientado a la mejora del desplazamiento en vehículo privado, no sólo son insuficientes para solucionar el problema de movilidad urbana, sino que, más bien, favorecen el crecimiento de viajes en vehículo privado y con ello generan una mayor congestión.

3.2.5. Instrumentos de política

El incremento del uso del automóvil y sus impactos negativos en México son resultado de políticas públicas con un escaso entendimiento del problema de movilidad, sin criterios de sustentabilidad, que no sólo han impulsado indirectamente el uso del automóvil, sino que han subestimado sus impactos negativos (ITDP, 2012).

Algunas de las políticas que han incentivado el uso del automóvil son: el subsidio a la gasolina, la eliminación del impuesto a la tenencia vehicular, la falta de políticas nacionales de seguro de daños a terceros obligatorio, así como la prioridad del gasto público en infraestructura para el transporte privado (ITDP, 2012). Los instrumentos de política entonces deberían estar orientados a revertir esta situación.

Los instrumentos de política para el transporte sustentable deberían tener como objetivo segregar la superficie urbana para dar más espacio al transporte colectivo, bicicletas, peatones, y menos espacio a los vehículos. El desarrollo de un transporte urbano sustentable tiene diversos beneficios, no exclusivamente ambientales:

- Reducción en el consumo de energía.
- Reducción del impacto ambiental, tanto local como global.
- Beneficios a la salud mediante la reducción de accidentes, contaminación y estrés; aumento de ejercicio por parte del usuario.
- Mejores condiciones de vida: tiempo libre, salud psico-social.
- Desarrollo económico: generación de empleos y fomento del turismo.

Algunos ejemplos son:

- Fomentar el transporte colectivo.
- Carriles exclusivos para transporte público (o para transportes eficientes).
- Fomentar el uso de bicicletas y motocicletas (facilidades en centros de trabajo, estudio y ocio).
- Fomentar la movilidad peatonal (calles peatonales, banquetas amplias, semáforos peatonales y pasos a nivel).
- Restringir el uso del automóvil (cobrar por estacionamiento en calles, centros de trabajo, escuela, etc. Dejar de privilegiar al automóvil, si se quiere usar un lugar público para estacionarse, se necesita pagar: parquímetros).

Algunos ejemplos a nivel internacional:

- Calmar el tráfico (*Traffic calming*). Su objetivo es fomentar una conducción más segura y responsable y reducir potencialmente el flujo de automóviles. Utiliza diversas medidas, como el rediseño de las vialidades, para mejorar la seguridad de los automovilistas, peatones y ciclistas. En la figura 3.11 se muestra un ejemplo.
- Tarifas de congestión (*Congestion charge*). Consiste en cobrar una cuota a determinados conductores que circulen en determinadas zonas (casi siempre la zona central, por ende, la más congestionada). Londres es la ciudad más grande del mundo que ha implementado este sistema que inclusive tiene una estructura de precios donde los automóviles más contaminantes pagan más.



Figura 3.11. Ejemplo de cambio de infraestructura para calmar el tráfico.

Fuente: Carlos A. García.

Para el transporte de pasajeros: segregación de carriles en autopistas. Esto ya opera en algunas ciudades de Estados Unidos y de Europa, su objetivo es disminuir el uso de los vehículos mediante la promoción de Vehículos con Alta Ocupación, es decir, si cada persona viaja solo en su coche, para mover a 5 personas necesitaríamos 5 coches; si en vez de eso se motiva a las personas a viajar juntas (llenar los coches), habrá menos coches en las ciudades. Es una ecuación muy simple, sin embargo, muy difícil de que se conciba. Por lo tanto, para promover este tipo de acciones es necesario premiar al que cumple las condiciones y castigar al que no las cumple. Se fija un número mínimo de ocupantes, se señala el carril explicando cuántas personas deben viajar a bordo del vehículo para poder usarlo y quien lo cumpla puede circular por él, obviamente se trata del carril más rápido. Otra opción para el transporte de pasajeros es el rescate de trenes de pasajeros.

“Pasada la barrera crítica de velocidad de un vehículo, nadie puede ganar tiempo sin que, obligadamente, lo haga perder a otro”. Iván Illich.

3.3. BIBLIOGRAFÍA

- CONUEE (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía). 2011. Rendimientos de Combustible de Vehículos Ligeros de Venta en México. Año Modelo 2011. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía-Secretaría de Energía. México.
- DE LA HERRÁN, J. 2014. *El auto eléctrico: una solución apremiante* (Ciencia de boleto. Divulgación de la Ciencia). Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- ECOLOGISTAS EN ACCIÓN. 2017. Transporte y cambio climático. <http://www.ecologistasenaccion.org/article20911.html#nb2-20>
- GARCÍA, S., T. COAKLEY, N. DUFFY, D. FINTA, H. KERN, M. IANCU, C. MCCARTHY, G. PUGLIESE, H. RAUPENSTRAUCH y F. TOMASI. 2010. *Transporte sostenible y movilidad. Manual para estudiantes* (Intelligent use of energy at school. [IUSES]). Comisión Europea-University of Ruse. Zaragoza.
- IEA/OECD (International Energy Agency/Organisation for Economic Co-operation and Development). 2009. *Transport, Energy and CO₂. Moving toward Sustainability*. International Energy Agency.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2021. Parque vehicular. <https://www.inegi.org.mx/temas/vehiculos/>
- ISLAS, V., y M. LELIS. 2007. *Análisis de los sistemas de transporte. Vol 1: Conceptos Básicos*. (Publicación Técnica No. 307). Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila.
- ITDP (Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo). 2012. *Transformando la movilidad urbana en México. Hacia ciudades accesibles con menor uso del automóvil*. Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo / Embajada Británica en México. México.
- JOHNSON, E. 2017. Toyota 1/X Concept. A sort of carbon-fiber plug-in Prius. *Car and Driver*. <https://www.caranddriver.com/news/toyota-1-x-concept-auto-shows>
- KAHN RIBEIRO, S., S. KOBAYASHI, M. BEUTHE, J. GASCA, D. GREENE, D. S. LEE, Y. MUROMACHI, P. J. NEWTON, S. PLOTKIN, D. SPERLING, R. WIT y P. J. ZHOU. 2007: Transport and its infrastructure. En *Climate Change 2007: Mitigation Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds.). Cambridge University Press. Cambridge-New York.
- MURRIETA, R., 2013. *Infraestructura de Transporte 2013-2018*. Secretaría de Comunicaciones y transporte. México
- NREL (National Renewable Energy Laboratory). 2015. *Hybrid and Plug-In Electric Vehicles (Spanish Version); Clean Cities, Energy Efficiency & Renewable Energy (EERE)*. United States.

- ONU-Habitat. 2015. *Reporte Nacional de Movilidad Urbana en México 2014-2015*. Grupo Mexicano de Parlamentarios para el Hábitat. México.
- POLLAR, T. 2017. Toyota 1/X. *Carmagazine*. <https://www.carmagazine.co.uk/car-news/motor-shows-events/geneva/2017/toyota-i-tril-concept-at-the-geneva-motor-show/>
- SEMARNAT (Secretaría de Medioambiente y Recursos Naturales). 2013. *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- SEMARNAT (Secretaría de Medioambiente y Recursos Naturales). 2016. Emisiones atmosféricas del transporte. http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D2_R_TRANSPOR02_02&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce
- SENER (Secretaría de Energía). 2011. *Balance Nacional de Energía 2011*. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001720.pdf>
- SENER (Secretaría de Energía). 2012. *Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026*. Secretaría de Energía-Dirección General de Sustentabilidad-Subdirección de Análisis, Difusión y Vinculación Tecnológica. México.
- TENTRADUE, C. y H. CARRANZA. 2014. La eficiencia energética en el transporte, un mega yacimiento posible. *Petrotecnia*. Octubre.
- TMC (Toyota Motor Corporation). 2012. *Manual del desguace del vehículo híbrido. Toyota. Yaris. Sistema Hybrid Synergy Drive eléctrico/de gasolina*. S. L. E.

Capítulo 4

El uso de energía en el sector residencial

RENÉ D. MARTÍNEZ-BRAVO

MARCO A. MARTÍNEZ NEGRETE

4.0. INTRODUCCIÓN

En este capítulo describiremos el papel de la energía en relación con el sector residencial. Este sector resalta la importancia que tiene la energía para la satisfacción de necesidades y su papel en el desarrollo social. Identificaremos las principales fuentes de energía que se utilizan en este sector, cuál es el consumo respecto al total nacional y sus implicaciones en el ambiente. Finalmente, describiremos algunas alternativas que han funcionado por medio de políticas públicas al promover el ahorro y la eficiencia de los energéticos, las cuales han favorecido la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero y la salubridad desde el sector residencial.

¿Qué tan importante es el consumo de energía en el sector residencial?

El uso y consumo de energía en el sector residencial es uno de los más importantes a nivel mundial, ha presentado un crecimiento del 1% anual entre 1990 y el 2010. Se estima a *grosso modo* que la tercera parte del total mundial de la energía final es consumida en este sector, posicionándolo delante del sector industrial y del de transporte (Lucon *et al.*, 2014).

De acuerdo con el balance de energía de la OCDE de 2008, el consumo final de energía planetario fue 321,603 PJ, de los cuales el 26.4% correspondió al sector residencial. En México se consume aproximadamente 4,560 PJ de energía, de los cuales el sector residencial se responsabiliza del 30% del consumo total (Sener 2014, 2015, 2016).

Con base en los resultados de consumo energético de la Sener (2014), el sector residencial junto con el comercial y público obtienen la energía de diversas fuentes

como son *a)* gas LP, *b)* electricidad, *c)* leña, *d)* gas seco, *e)* solar y *f)* en menor proporción, diésel. Los tres primeros son los más utilizados, aunque recientemente la participación del gas natural empezó a aumentar.

El consumo de los principales energéticos en el sector doméstico se ha mantenido con ligeras variaciones a través del tiempo. Por ejemplo, en 1994 el consumo de energía fue de 680 PJ, en 2008 el consumo de energía fue de 797 PJ y en el 2010 fue de 765 PJ. Para este último año, el consumo en este sector representó el 17% de la demanda final de energía a nivel nacional. La participación de las distintas fuentes de energía durante el periodo ha presentado cambios importantes, destacando el aumento en el consumo de gas LP que representa el 38% del total, y el consumo de leña, que representa el 33%. La electricidad muestra una participación creciente al pasar del 11% al 25% desde 1990 y hasta 2010 (BNE, 2009), lo que indica una mayor presencia de electrodomésticos e iluminación en el sector.

Desde otra perspectiva, parte de la energía que se consume en el sector residencial proviene o tiene relación con otros sectores descritos en este libro, por ejemplo, el sector industrial y eléctrico, el agrícola y el sector transporte, de tal forma que muchos de los insumos que se usan y consumen en los hogares traen *de facto* una cuota de energía previa, ya sea por el traslado, la manufactura o el embalaje, por citar algunas fases de la cadena de producción.

El caso de los alimentos procesados es ideal para describir la interconexión entre sectores porque estos productos requieren de insumos como empaquetamiento, refrigeración para su conservación y transporte para poder llegar a los hogares distantes. Un esquema gráfico de esta interconexión se puede ver en la caja 5 del Capítulo 5 “Sectores industrial y eléctrico”. Es importante tener presente que la estructura de la red energética del sector residencial se compone del consumo directo y de cuotas indirectas de energía.

El consumo promedio de energía en el sector residencial para satisfacer los usos finales tiene la siguiente proporción de mayor a menor demanda: el acondicionamiento de interiores (calefacción o enfriamiento), el calentamiento de agua, la iluminación, la refrigeración, la cocción de alimentos, la comunicación y el entretenimiento entre otros. El consumo de energía en cada una de ellas es variable y depende de factores como: ingreso económico, hábitos, clima o región, tamaño familiar, tipo de vivienda e infraestructura o accesibilidad a las localidades.

¿Cómo está compuesto el sector residencial en México?

El sector residencial mexicano se divide en los subsectores urbano y rural, una forma de dividirlos para diferenciarlos es por la cantidad de población: más de 2,500 habitantes es urbano y menor a esa cantidad es rural. En cada uno hay diferencias y preferencias en el tipo de energía consumida y demandada. Sin embargo, en ambos casos prevalece el cocinar y el calentamiento de agua como los usos finales con más demanda de energía. A esto se le suma el nivel socioeconómico del usuario final y las tecnologías o los dispositivos técnicos disponibles para conocer cuál fuente de energía es la más demandada para satisfacer las necesidades energéticas en cada subsector.

Otra forma de diferenciar a los subsectores residenciales es con respecto al consumo energético en las diferentes zonas climáticas y ambientales donde se localizan. Por medio del nivel de equipamiento tecnológico y el consumo de la electricidad, por ejemplo, se puede identificar la región geográfica donde habita el usuario final. Al revisar las diferencias y los cambios en el patrón del consumo de energía podemos observar dos trayectorias, las cuales agrupan a los usuarios de climas cálido y templado.

4.1. SUBSECTOR RESIDENCIAL URBANO

La evolución del sector residencial en los últimos tiempos ha favorecido el crecimiento del ámbito urbano. De acuerdo con Islas *et al.* (2015) el crecimiento poblacional fue de 77% en 2010 respecto a 1950, lo que le confiere un carácter importante con relación a la demanda de energía. El subsector residencial urbano se conforma de todas las ciudades pequeñas y grandes que se distribuyen en el territorio nacional cuya población supera los 2,500 habitantes. Con base en esta definición retomamos la información de la Secretaría de Energía, Sener (2016), la cual indica que el número de usuarios de energía eléctrica ha aumentado en los últimos 16 años. En 1999 se tenían registrados aproximadamente 20 millones de usuarios, mientras que para el 2016 el número de usuarios se incrementó en más de 36 millones (figura 4.1).

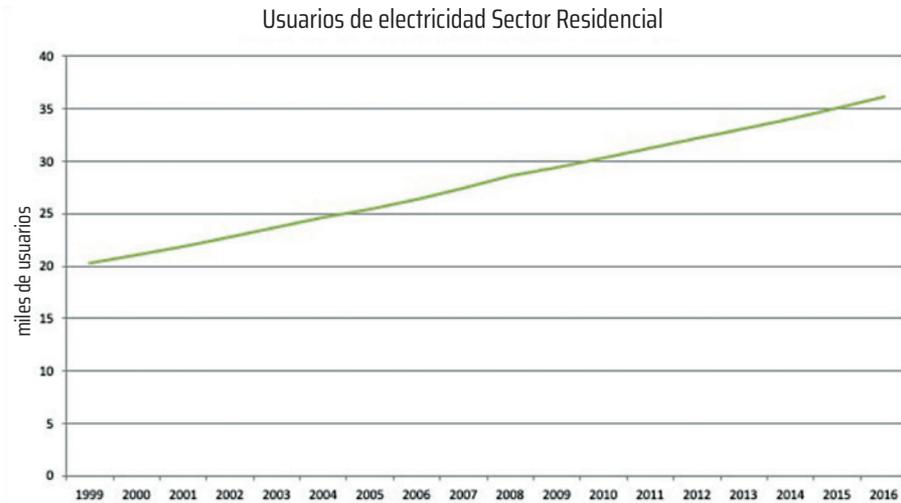


Figura 4.1. Tendencia histórica del incremento de usuarios de energía eléctrica en el sector residencial. Elaboración propia a partir de datos del Balance Nacional de Energía SENER.

En el BNE, la Sener reporta el consumo de energía de los sectores residencial y comercial en México como uno solo. Este resultado es alto respecto a la energía final consumida en el país, ubicándolo en el tercer lugar de los sectores con mayor consumo. El formato de agrupación en el que se presentan las cifras del balance, por otra parte, solo establece el consumo energético por fuentes, lo que no permite determinar las modalidades de consumo o los usos finales, mostrando únicamente un panorama general del consumo de energía.

De acuerdo con un estudio de la Sener, en el periodo de 2002 a 2008, el calentamiento de agua es el uso final que mayor demanda de energía requiere en el sector residencial. Esta tarea energética precisa casi el 50% del consumo total sin mostrar variaciones significativas durante el periodo. La otra tarea energética con mayor demanda es la cocción de alimentos. Es de destacar que en ambos casos los energéticos que se utilizan de manera recurrente son el gas LP y la leña (figura 4.2).

Las tendencias de crecimiento poblacional y la generación de escenarios estiman que en el mediano plazo aumentará la demanda de energía en los hogares en los dos subsectores residenciales. En México, de acuerdo con la Conapo (2019) se prevé un aumento en la vivienda de 1.5% anual que puede llegar a más de 41 millones en 2035, ocasionando un crecimiento en la demanda de energía en el sector residen-

cial de 2.1% anual, lo que puede ocasionar problemas si no se planifica a tiempo el suministro. En términos de crecimiento de la demanda de electricidad, esta tendrá un crecimiento con una tasa anual de 4.6%. Sin embargo, el consumo per cápita ha incrementado menos del 1% en los últimos 15 años, dejando claro que hay una disparidad entre el consumo promedio y el consumo per cápita (Maqueda y Sánchez, 2011).

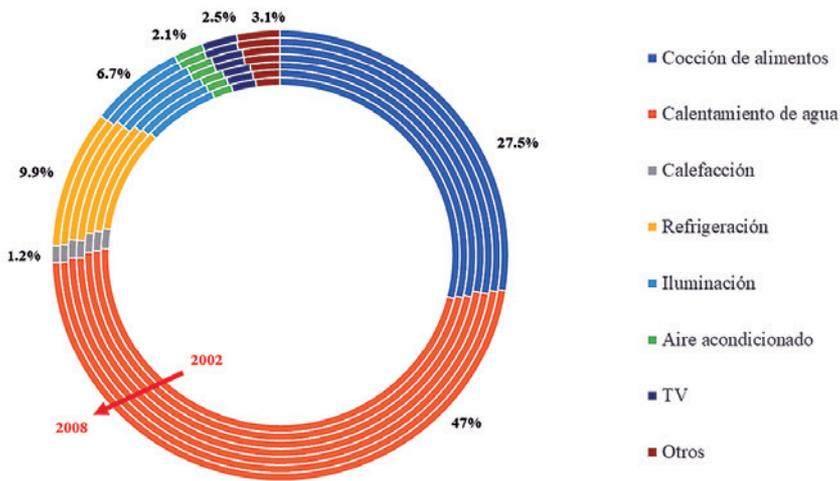


Figura 4.2. Consumo de energía en el sector residencial por usos finales.

Fuente: Tomado de Rosas, 2011.

Los habitantes de las regiones cálidas tienen un mayor consumo eléctrico respecto a los ubicados en las zonas templadas. En los últimos años el primero se ha incrementado respecto al segundo en una relación de 3 a 2; por ejemplo, en 2014 la región cálida registró un consumo aproximado de 34,000 kWh en contraste con 20,000 kWh consumidos en la región templada para el mismo año (De Buen *et al.*, 2016).

El incremento en el consumo de electricidad en la región cálida es debido a una mayor demanda energética en los hogares, lo que debe diferenciarse del incremento del número de usuarios, el cual no tiene tanto peso como indicador de consumo para este ejemplo. Estos datos se han sustentado en información de los censos poblacionales del periodo 1982-2014.

Ante la situación de mayor demanda y consumo de energía en el sector residencial, desde el gobierno se han lanzado iniciativas de proyectos de eficiencia energética ligadas a las estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero comprendidos en la agenda de cambio climático nacional. Además, se han lanzado normativas para la fabricación de equipo para este sector en forma paralela a los programas.

4.1.1. Opciones de eficiencia energética en el subsector residencial urbano

El consumo de energía en las viviendas mexicanas está dividido entre varios aparatos que requieren de electricidad y de gas LP principalmente. A partir del año 2000 el mayor consumo de electricidad se destina al uso final de la refrigeración con una participación cercana al 39% del consumo total. Desde que el gobierno federal estableció la campaña de reemplazo de los equipos de refrigeración obsoletos por equipos de última tecnología y mayor eficiencia mediante subsidios, por medio de la Comisión Federal de Electricidad en la década de los noventa, se logró disminuir el consumo de electricidad. Con la mejora en la eficiencia energética en los electrodomésticos se generan ahorros económicos, que se traducen en importantes volúmenes de CO₂ mitigados (para ver opciones de mitigación de GEI ver Capítulo 5, sección energía eléctrica).

A pesar de la permanencia del programa, la tendencia de consumo de electricidad por refrigeración se ha mantenido porque en la actualidad cerca del 48% de los refrigeradores no cumplen con la normatividad de eficiencia energética debido a que el consumo promedio anual se calcula en 828 kWh y se estima que hay en uso más de 24 millones para el 2010, por lo que en este rubro aún hay barreras que se deben superar para que el programa sea exitoso.

En el terreno de la iluminación, se ofreció el “Programa Luz Sustentable” coordinado por el Fideicomiso para Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE) con un esquema de penetración de nuevas tecnologías de los focos fluorescentes compactos ahorradores y con focos de tecnología LED para sustituir 45.8 millones de las bombillas incandescentes (de aleación de tungsteno) que consumen de 60 a 100 watts. Con base en lo reportado por Islas *et al.* (2015), en 2010 el 40% de la electricidad en el sector residencial se destinaba a la iluminación en una estimación de 200 millones de focos en uso, de los cuales el 77% eran bombillas incandescentes. Con la entrada del programa de sustitución se pudo reemplazar el 33% de esas bombillas a nivel nacional y, de cumplirse el reemplazo al 100%, se obtendría un beneficio en el con-

sumo de 2,048 GWh-año ahorrados, lo que es comparable a dos veces el consumo del estado de Campeche en 2011 (Irastorza, 2012).

En lo que concierne al uso de la electricidad, en las zonas cálidas del país existe una demanda mayor por el funcionamiento de los sistemas de aire acondicionado. En una estimación conservadora, el Fide (2011) señala que este tipo de equipos tienen un consumo aproximado 1.5 kW, lo que representaría un consumo promedio anual de 1,638 kWh-año usando como referencia 11 millones de equipos que pueden estar en funcionamiento en las casas ubicadas en los climas cálidos. Se plantea sustituir los equipos de aire acondicionado con tecnología eficiente y disminuir el consumo de energía en 20%. Si además se aplica aislamiento térmico en las viviendas, se lograría otro 20% de ahorro en el consumo. El conjunto de alternativas a las técnicas convencionales del uso de la energía en las áreas urbanas sin duda promoverá mejoras y ahorros significativos.

Los programas de ahorro de energía en México inciden en el sector residencial, ya que el 87.9% de los usuarios representan el 24.9% del consumo nacional de energía eléctrica, pero ¿cuáles de estas opciones son aplicables en el ámbito rural?, ¿qué opciones se ha diseñado con énfasis en el subsector residencial rural?

4.2. SUBSECTOR RESIDENCIAL RURAL

Según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), algunos países pobres obtienen el 90% de su energía a partir de la leña y otros biocombustibles. Específicamente en Asia, África y América se concentra la tercera parte del consumo energético en el ámbito doméstico total mundial. La biomasa que crece naturalmente es la fuente principal de energía en estas regiones del mundo, de ella dependen 2 mil millones de personas.

Al igual que en el subsector residencial urbano, los habitantes rurales mantienen necesidades energéticas similares, con la diferencia de que en el sector rural la mayor fuente de energía es la leña o biomasa para satisfacer la tarea de cocinado y para calentar agua. El resto y en menor proporción está dirigida a la calefacción o enfriamiento, iluminación y entretenimiento, entre otros rubros.

A pesar de la gran importancia del subsector rural, el Balance Nacional de Energía carece de un apartado en el que se describa el patrón y las tendencias de consumo de

energía. La información con mayor precisión se puede interpretar a partir de las estadísticas del consumo de leña, energético que como sabemos es usado ampliamente por los habitantes rurales y por los pobres que habitan algunas partes de las ciudades.

Tradicionalmente el principal energético consumido en el subsector residencial rural es la leña y en menor proporción el carbón y otros combustibles como rastrojos o excretas de animales. A nivel mundial, aproximadamente 3 mil millones de personas usan la biomasa como combustible primario para la cocción de alimentos (Martin *et al.*, 2011; Anenberg, 2012). En México, de acuerdo con la Sener (2016), el 27% de la energía consumida en el sector residencial, comercial y público fue por uso de leña (256 PJ), esto conlleva a que aproximadamente 23 millones de personas en el país dependan de la leña para satisfacer sus necesidades energéticas básicas (Serrano-Medrano *et al.*, 2014).

Como una medida sanitaria para disminuir los efectos secundarios de la exposición al humo de la leña, en muchos países se ha tratado de introducir al gas LP como energético alternativo para la cocción de alimentos, sin embargo, su adopción no ha sido exitosa. Las principales barreras que el gas LP ha presentado son de índole económico, de disponibilidad y aspectos relacionados a las tradiciones culinarias. Ante el conjunto de las situaciones descritas, una alternativa con mayor aceptación y que cubre la medida sanitaria ha sido la implementación de estufas eficientes de leña, las cuales disponen de una cámara de combustión cerrada, por lo que el humo de combustión no contamina el entorno donde se preparan los alimentos.

El análisis de la comunidad de Cheranatzicurin en el estado de Michoacán es un ejemplo de lo que sucede con la dinámica energética en una comunidad rural. En ella se ha realizado un estudio amplio, en dos períodos separados por casi un cuarto de siglo, sobre el consumo de la energía final y de las tareas energéticas que se realizan en la comunidad. Se identificaron un total de 22 usos finales de energía, los diferentes tipos utilizados y de los dispositivos de uso final de energía (Martínez-Negrete *et al.*, 2013). Los análisis en ambos períodos de tiempo identificaron cómo la penetración de la tecnología modifica la matriz energética y termina favoreciendo a un tipo de energético, en este caso al transporte.

El primer estudio se realizó en el año 1986 y el segundo en 2012. El consumo de energía final total en la comunidad durante 1986 fue de 28,940 GJ, mientras que en 2012 el consumo de energía final disminuyó a 27,353 GJ (Martínez-Negrete *et al.*, 2013). Los valores energéticos determinados en este análisis son representativos de

los consumos típicos reportados para las comunidades rurales en países en desarrollo (Goldemberg *et al.*, 1987).

En el año 1985 las tareas energéticas en la comunidad de Cheranatzicurin estaban mayoritariamente cubiertas con leña, principalmente para cocción de alimentos, calentamiento de agua, iluminación y calefacción. A pesar de que la red eléctrica se había instalado, este tipo de energía estaba poco representada; el gas LP no era una opción y el uso de hidrocarburos líquidos (gasolina y diésel) eran utilizados por escaso número de pobladores que tenían tractor para las tareas agrícolas o algún tipo de vehículo para transporte (Martínez-Negrete *et al.*, 2013).

En 2012, a pesar de la penetración de nuevos tipos de energía, la leña prevalecía como el energético de uso final más importante, representando el 68% de la energía consumida (figura 4.3). Los energéticos que más incrementaron su uso en la comunidad fueron la gasolina y el diésel, su consumo pasó de 8% al 21%. Además, Cheranatzicurin experimentó la modernización tecnológica por el creciente uso de la electricidad y un mayor número de aparatos electrodomésticos. Lo mismo ocurrió en otras áreas como el empleo de estufas de gas y vehículos para el transporte individual. El resultado del consumo de gas LP pasó de 0.25% en 1986 a 6.5% en 2012 (Martínez-Negrete *et al.*, 2013).

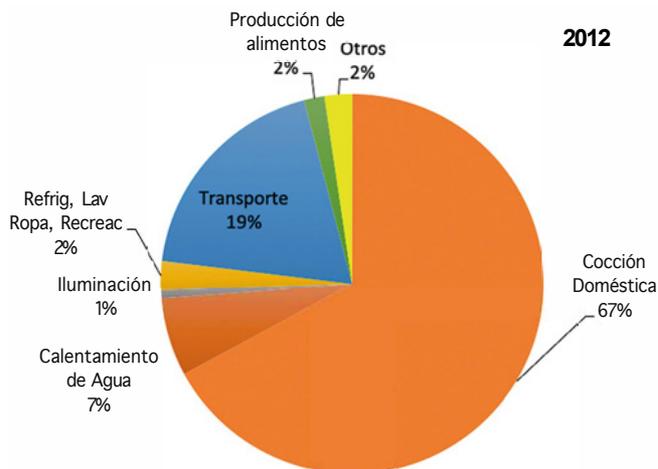


Figura 4.3. Distribución del consumo por usos finales en Cheranastico, Michoacán.

Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que el ingreso per cápita no ha variado significativamente en la comunidad (quizá debido a las remesas provenientes de los Estados Unidos), se puede observar una mayor penetración de tecnología moderna respecto a la tradicional en los hogares de Cheranatzicurin, en una transición hacia las fuentes no renovables de energía durante estas casi tres décadas de análisis. El resultado revela que el sector residencial rural se aleja de una trayectoria de sustentabilidad energética y que es necesario su regreso mediante opciones tecnológicas de uso final, como son las ecotecnologías.

Las ecotecnologías son un conjunto de herramientas auxiliares en el desarrollo de tecnologías apropiadas. Uno de sus objetivos es mejorar el acoplamiento entre necesidades y recursos energéticos disponibles, sobre todo los renovables. Su desarrollo e implementación pueden ser importantes estrategias sustentables para el desarrollo rural.

En México, la inversión económica que realizan los hogares destinada a la energía es del 5% en promedio. Esta cantidad incorpora la gran desigualdad social que prevalece en el país (Rosas, 2011). Se reconoce que los altos niveles de pobreza y la falta de recursos energéticos pueden ser un obstáculo para el desarrollo y la eliminación de la pobreza. De hecho, el índice de Gini, el cual estima la desigualdad social, refiere que en 2006 el coeficiente para México fue de 46.1, mientras que el de Canadá, por ejemplo, fue de 32.6 en el mismo año.

4.3. POLÍTICAS PÚBLICAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR RESIDENCIAL

En materia de políticas públicas para la eficiencia energética, el año 1996 es clave para México ya que, por un lado, se decretó el inicio del horario de verano con el objetivo de ahorrar energía en todos los sectores incluyendo al residencial y, por otro lado, entraron en vigor las primeras Normas Oficiales Mexicanas sobre eficiencia energética (NOM), que también inciden en el sector residencial. Ambas estrategias son conducidas por la actual Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (Conuee), antes CONAE. Las primeras NOM se aplicaron a la refrigeración para aumentar la eficiencia de los refrigeradores, los equipos de aire acondicionado y en la fabricación de lámparas fluorescentes compactas.

Otra estrategia de política pública encaminada a mejorar el consumo de energía en el sector residencial fue el programa piloto de aislamiento térmico de viviendas para hacer más eficiente el uso del aire acondicionado en Mexicali. Este programa estuvo a cargo de Comisión Federal de Electricidad (CFE) y, por cuestiones presupuestales, no tuvo continuidad en otras ciudades con climas similares que presentaban la misma problemática.

El proyecto Ilumex y el Fideicomiso para el Ahorro de Energía iniciaron el cambio de lámparas incandescentes para ahorrar electricidad. De 1993 a 2006 se lograron reemplazar 12.3 millones de lámparas. En términos generales, estas políticas públicas incidieron en el sector residencial cambiando la tendencia creciente del consumo de energía, sobre todo de electricidad.

El resultado de la aplicación de las políticas públicas en materia de energía eléctrica con incidencia en el sector residencial ha sido positivo. De acuerdo con la Conuee, de 1996 a 2014 se estima un ahorro acumulado de energía por la adopción de estas políticas de 175,000 GWh, lo que equivale a 175,000 millones de pesos ahorrados a los usuarios. Esta cifra económica no considera los ahorros que también obtiene la Hacienda Pública, ya que es importante señalar que la mayoría de los energéticos tienen un subsidio para los usuarios domésticos.

A partir de 2002 la Comisión Federal de Electricidad, buscando promover el uso racional de energía, puso en vigor la tarifa doméstica de “alto consumo”, la cual deja sin subsidio a aproximadamente 500 mil usuarios del sector residencial, buscando con ello que el costo de la energía les obligue a buscar alternativas de ahorro y uso eficiente.

La más reciente estrategia de política en materia energética para el sector residencial es la Hipoteca Verde. Impulsada desde 2008, es una iniciativa del gobierno que provee financiamiento a los compradores de viviendas nuevas en las cuales se ha incorporado tecnología que hace un uso eficiente de energía, tanto en la parte eléctrica como en el uso de gas LP. Incorpora además sustitutos tecnológicos de uso final como es el caso de los calentadores solares, sistemas híbridos para transformar la energía radiante en fotovoltaica y, recientemente, un conjunto de ecotecnologías como son la captación de agua de lluvia, entre otras. El objetivo es disminuir la demanda de energía, por ejemplo, el 52% del gas LP se destina para calentar agua, el cual puede ahorrarse con los calentadores solares y mitigar las emisiones de CO₂ durante el ciclo de vida energético.

En términos ambientales, los beneficios de las políticas públicas generaron una mitigación de 82.5 millones de CO₂e. Sin embargo, de acuerdo con Islas *et al.* (2015), existe un potencial de mitigación que podría llegar a ser de 307 millones de toneladas de CO₂e para el año 2035 si se sustituyen electrodomésticos eficientes (como focos eficientes, refrigeradores y sistemas de aire acondicionado); se añaden a la estrategia medidas de sustitución de calentadores; se agregan captadores solares, sistemas fotovoltaicos interconectados, estufas y hornos eficientes de leña (cuadro 4.1); y se fomenta el mayor uso de gas LP y de gas natural o seco, por ejemplo, en la generación de electricidad.

CUADRO 4.1
REDUCCIÓN DE EMISIONES POR MEDIDA DE MITIGACIÓN 2010-2035

MEDIDA DE MITIGACIÓN	POTENCIAL DE MITIGACIÓN MTCO ₂ E
Focos eficientes	87.6
Refrigeradores eficientes SR	65.0
Aire acondicionado Eficiente y Aislamiento térmico SR	48.5
Calentadores de gas eficientes	22.7
Captadores solares	19.2
Estufas de leña eficientes	42.8
Hornos eficientes de carbón vegetal	19.4
Sistemas fotovoltaicos interconectados SR	2.4
TOTAL	307.5

En el contexto internacional, el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) promueve una mayor participación de la biomasa para energía, especialmente en la generación de electricidad y térmica. De acuerdo con los escenarios, se espera que la biomasa pueda aportar entre el 25 y el 45% de la energía mundial antes del año 2100. Por mencionar solo a los usuarios domésticos que se

verían beneficiados, se considera que las estufas eficientes pueden generar ahorros significativos del 40% en el consumo de leña en comparación con el fogón tradicional. De alcanzarse esta mitigación, se podrían ahorrar 27.6 PJ de los 69 PJ que se consumen en el sector residencial y comercial con el plus del conjunto de cobeneficios a la salud.

4.4. CONCLUSIONES

El sector residencial es una pieza clave en la matriz energética de cualquier país. Como se mencionó al principio, a nivel internacional es el responsable del consumo de la tercera parte de la energía final en el mundo.

Los usos finales de la energía en el sector no presentan variaciones significativas genéricas en los hogares, ya sean rurales o urbanos; no obstante, las variaciones más significativas son en el tipo de energéticos (renovables o no renovables) y los tipos de tecnologías (modernas o tradicionales) empleados en la satisfacción de las necesidades energéticas. Con todo, la globalización del uso de la energía y la tecnología en el sector reducirán la separación entre ambos subsectores en el mediano plazo, cuyas implicaciones afectarán la sustentabilidad del sector si no hay un cambio en el modelo de consumo y en la demanda de energía.

Las estrategias de eficiencia y sustentabilidad en el sector residencial son cruciales para el balance de energía nacional debido a que los modelos de crecimiento poblacional indican que este sector seguirá en aumento y que el modelo de desarrollo tiende a hacer desaparecer la mayor parte de las tecnologías con que se satisfacen las tareas energéticas genéricas del subsector residencial rural, porque se incorporan cada vez más tecnologías modernas en los hogares, lo cual requiere de energéticos no renovables y lo acerca a los consumos del subsector urbano (como demuestra el caso particular presentado de Cheranatzicurin).

La eficiencia energética en el subsector residencial rural además tiene efectos de índole social como: en la salud, en la reducción de la mortalidad, en la reducción de ausencias escolares y laborales, en el empoderamiento de las mujeres, en el confort y ahorro de energía. En los pueblos rurales que utilizan leña, una pieza clave que les permite alcanzar la eficiencia energética y sus efectos es la adopción de las estufas de leña eficientes. Además, la incorporación de ecotecnologías basadas

en el diseño de la satisfacción de demandas energéticas locales tendrá un efecto directo en la disminución de la oferta energética fósil e incentivará el uso energía renovable para alcanzar su manejo sustentable.

En el sector residencial urbano, la incorporación de estrategias de políticas públicas son determinantes para acercarse a la eficiencia energética y la transición a los energéticos renovables por medio de la Hipoteca Verde y las NOM. Su efecto incide directamente en el mejoramiento de la eficiencia de los dispositivos y en el desplazamiento de combustibles como el gas LP por la radiación solar como combustible; por lo anterior, el uso racional de la energía en los dispositivos finales presenta alternativas que pueden catalizar el efecto de las políticas públicas.

Finalmente, al referirnos a los impactos ambientales, por el tamaño de la demanda energética, el sector residencial es un actor importante por la cuota indirecta que le corresponde respecto a la producción, distribución y consumo de ella. En términos de emisiones de GEI, en el sector residencial se pueden mitigar 307 MtCO₂e con la implementación de ocho tecnologías eficientes en un plazo de 2010 a 2035 mediante una política pública adecuada.

El éxito de la mitigación debe superar las barreras económicas principalmente porque la tecnología actualmente requiere de subsidios por su alto costo inicial para que pueda ser adoptada por usuarios, quienes en este sector son en su mayoría de escaso poder adquisitivo.

En paralelo y en el tema de los impactos ambientales, no se debe perder de vista que el sector residencial es un productor de desechos tecnológicos, orgánicos e inorgánicos, los cuales aún carecen de programas integrales de reciclamiento que sean eficaces para mitigar los impactos en los sitios de disposición final.

PARA SABER MÁS:

- La Conuee antes CONAE por decreto oficial inició actividades en 1991 como un organismo descentralizado de la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, con la finalidad de promover el ahorro y uso eficiente de la energía en los sectores de transporte, gran industria, doméstico, eléctrico y cogeneración, y gubernamental. www.gob.mx/conuee

- Hipoteca Verde. Es una propuesta nacional para incentivar la oferta de vivienda en la que se incorporan criterios ecológicos y de sustentabilidad buscando mejores prácticas en materia de ahorro y tratamiento de agua, ahorro y uso eficiente de energía, incorporación de ecotecnologías para manejo de residuos sólidos, aprovechamiento de la energía fototérmica y fotovoltaica, composteo de residuos orgánicos, y creación y conservación de áreas verdes. La Hipoteca Verde busca que los acreditados obtengan ahorros económicos por el uso de las ecotecnologías y que el país ahorre en la producción de energía eléctrica, gas LP y agua, así como para que el sector residencial evolucione por el camino de la transición a los energéticos renovables. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/90321/HipotecaVerde3erForoCSAINFONAVIT.pdf>

4.4. EJERCICIOS

Ejercicio 1. Consigue los datos del consumo de gas familiar mensual (y, si es posible, anual) antes y después de la instalación de un calentador solar de agua y responde:

¿Cuánto es el ahorro anual de gas debido a la sustitución de gas por el Sol?

¿Cuánto es el ahorro en dinero? ¿En cuántos años se recupera el dinero invertido en la compra del calentador solar?

¿Cuáles son los porcentajes de gas quemado para calentar agua y para cocinar en la casa?

¿Cuánto vale el ahorro de gas per cápita debido a la sustitución del calentador de agua de gas por el solar?

Ejercicio 2. Averigua cuáles son los principales contaminantes locales del aire de las grandes ciudades, en orden de importancia. Haz una estimación del impacto que causaría en la limpieza del aire de una ciudad de N habitantes la sustitución total de quemadores de gas por calentadores solares (utiliza el dato del ahorro per cápita del ejercicio anterior).

Ejercicio 3. ¿Consideras que parte del calor usado en la industria podría generarse por calentadores solares? (Indaga si la Sener proporciona datos para dar una respuesta cualitativa a esta pregunta).

Ejercicio 4. Elabora un modelo de “cajas negras energéticas” (se recomienda ver la sección 1.5 del Capítulo 1 Termodinámica) para dar una respuesta cualitativa (si puedes, cuantitativa), a la siguiente pregunta: ¿Cómo se quema menos gas al calentar una taza de agua: al calentarla en la estufa de gas o en el horno de microondas? (toma en cuenta que la electricidad se genera en un cierto porcentaje quemando gas. Indaga los valores para las eficiencias del horno de microondas, la estufa, el transporte de electricidad, la eficiencia de las gasoeléctricas, etcétera).

Ejercicio 5. Descarga de internet el artículo Martínez-Negrete, M., R. Martínez, R. Joaquín, C. Sheinbaum y O. Masera. 2013. “Is modernization making villages more energy efficient? A long-term comparative end-use analysis for Cheranatzicurin village, México”. *Energy Sustainable Development*. 17:463-470. y responde:

¿Por qué baja el consumo total de energía de 1986 a 2012 en Cheranatzicurin?

¿Qué sucede, y por qué, con el consumo de energía final per cápita entre 1986 y 2012?

¿Qué puede decirse respecto a la evolución de la seguridad energética del poblado en ese período de tiempo?, ¿y en cuanto a la sustentabilidad socio ambiental?

¿Mejóro la calidad de vida de sus habitantes entre 1986 y 2012?

Ejercicio 6. En Cheranatzicurin un adulto se baña con unos 10 litros de agua, a “jicarazos”, calentando el líquido de unos 18 °C a unos 40 °C. ¿Cómo se emite menos CO₂ a la atmósfera: calentando el agua en un fogón tradicional de tres piedras, en una estufa eficiente de leña del tipo Patsari o en una estufa de gas? (Haz un modelo de cajas negras energéticas como lo que se sugiere en el ejercicio 4).

Ejercicio 7. Argumenta sobre la factibilidad tecnológica de satisfacer todas las necesidades energéticas del sector residencial con sólo energéticos renovables (e inagotables, si se incluye la geotermia). ¿Es la misma argumentación válida para los subsectores rurales urbano y rural? ¿Qué podrías decir respecto a las factibilidades económicas y sociales?

4.6. BIBLIOGRAFÍA

- ANENBERG, S. 2012. Technology: clean stoves benefit climate and Health. *Nature*, 490:343.
- CONAPO (Consejo Nacional de Población). México en cifras. Indicadores demográficos de México de 1950 a 2050. http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/Mapa_Ind_Dem18/index_2.html
- DE BUEN, O., F. HERNÁNDEZ, y J. NAVARRETE. 2016. *Análisis de la evolución del consumo eléctrico del sector residencial entre 1982 y 2014 e impactos de ahorro de energía por políticas públicas*. Cuadernos de la Conuee, número 1. México.
- FERNÁNDEZ, R., y L. GONZÁLEZ. 2014. *En la Espiral de la Energía* Vol. 1. Libros en Acción. Madrid España.
- FIDE (Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica), 2011. Programas de ahorro de energía en el sector doméstico. FIDE. México.
- GOLDEMBERG, J., T. B. JOHANSSON, A. K. N. REDDY, y R. H. WILLIAMS. 1987. *Energy for a Sustainable World*. World Resources Institute. New Delhi.
- HERNÁNDEZ, J. 2011. Energy consumption and associated emissions of residential sector. [https://scholar.google.com.mx/scholar?q=HERN%C3%81NDEZ,+\)+2011.+Energy+consumption+and+associated+emissions+of+residential+sector.&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart](https://scholar.google.com.mx/scholar?q=HERN%C3%81NDEZ,+)+2011.+Energy+consumption+and+associated+emissions+of+residential+sector.&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart)
- IRASTORZA, V. 2012. Eficiencia energética en el sector doméstico: El caso del “Programa Luz Sustentable”. *Revista Digital Universitaria*, 13(10): 2-6.
- ISLAS, J., F. MANZINI, P. MACÍAS, y J. GRANDE. 2015. *Hacia un sistema energético mexicano bajo en carbono. Desplegando el potencial de las energías renovables y del ahorro y uso eficiente de la energía*. Reflexio Ediciones. México.
- LUCON O., D. ÜRGE-VORSATZ, A. ZAIN AHMED, H. AKBARI, P. BERTOLDI, L. F. CABEZA, N. EYRE, A. GADGIL, L. D. D. HARVEY, Y. JIANG, E. LIPHOTO, S. MIRASGEDIS, S. MURAKAMI, J. PARIKH, C. PYKE, y M. V. VILARIÑO. 2014. Buildings. En *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Inter-*

- governmental Panel on Climate Change*. O. EDENHOFER, R. PICHs-MADRUGA, Y. SOKONA, E. FARAHANI, S. KADNER, K. SEYBOTH, A. ADLER, I. BAUM, S. BRUNNER, P. EICKEMEIER, B. KRIEMANN, J. SAVOLAINEN, S. SCHLÖMER, C. von STECHOW, T. ZWICKEL, y J.C. MINX (eds.). Cambridge University Press, Cambridge-New York.
- MARTIN, W. J., R. I. GLASS, J. M. BALBUS, y F. S. COLLINS. 2011. A major environmental cause of death. *Science*, 334:180-181.
- MARTÍNEZ-NEGRETE, M., R. MARTÍNEZ, R. JOAQUÍN, C. SHEINBAUM y O. MASERA. 2013. Is modernization making villages more energy efficient? A long-term comparative end-use analysis for Cheranatzicurin village, México. *Energy Sustainable Development*. 17:463-470.
- MAQUEDA, M., y L. SÁNCHEZ. 2011. Curvas de demanda de energía eléctrica en el sector doméstico de dos regiones de México. *Boletín IIE*, octubre-diciembre. 172-180.
- ROSAS, J. 2011. Evolución del consumo y gasto económico de energía en el sector residencial (urbano-rural) mexicano 1996-2006. Tesis Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México-Facultad de Ingeniería, México.
- SENER (Secretaría de Energía). 2009. *Balance Nacional de Energía 2008*. Sener, México.
- SENER (Secretaría de Energía). 2014. *Balance Nacional de Energía 2013*. Sener, México.
- SENER (Secretaría de Energía). 2015. *Balance Nacional de Energía 2014*. Sener, México.
- SENER (Secretaría de Energía). 2016. *Balance Nacional de Energía 2015*. Sener, México.
- SENER (Secretaría de Energía). (s.f.). *Sector eléctrico nacional*. <http://egob2.energia.gob.mx/portal/electricidad.html>
- SERRANO-MEDRANO, M., T. ARIAS-CHALICO, A. GHILARDI, y O. MASERA. 2014. Spatial and temporal projection of fuelwood and charcoal consumption in Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 19:39-46

Capítulo 5

Sector industrial y Sistema eléctrico

CARLOS A. GARCÍA BUSTAMANTE

RAÚL TAURO

RICARDO MUSULE

5.1. SECTOR INDUSTRIAL

5.1.1. Consumo energético del sector industrial a nivel mundial

¿Qué sector económico es el principal consumidor de energía a nivel mundial? ¿Cómo se distribuye el consumo?

El sector industrial es uno de los sectores económicos más importantes en cuanto al consumo final de energía. Se requieren grandes cantidades de energía para transformar materias primas en los productos finales que nos rodean a diario, desde la vestimenta que usamos en este momento, el papel o la computadora en la que estamos leyendo, hasta los alimentos que consumimos. El sector industrial (figura 5.1) generó el mayor consumo energético a nivel mundial en el año 2015, seguido por los sectores transporte y el residencial.

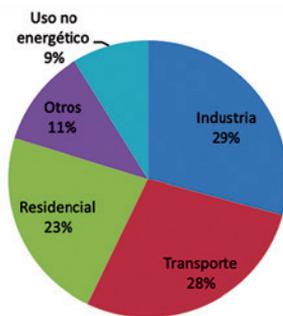


Figura 5.1. Consumo total mundial de energía por sector.

Fuente: Sener (2016).

Según Banerjee *et al.* (2012), a nivel global la industria química, que incluye a la petroquímica, es la principal consumidora de energía, seguida de la siderurgia, minerales no metálicos, pulpa y papel, comida y tabaco, entre otras. Estas industrias dependen principalmente de combustibles fósiles como el gas natural, combustóleo, carbón y coque de petróleo. El uso de estos combustibles genera considerables impactos ambientales debido principalmente a sus emisiones contaminantes en las diferentes etapas de extracción, transformación y combustión.

5.1.2. El sector industrial en México

¿Qué importancia tiene el sector industrial en el consumo energético nacional?
¿Cuáles son las industrias que consumen más energía y qué energéticos utilizan?

En México, durante la época prehispánica se comenzaron a transformar materias primas en productos finales, obteniendo objetos de cerámica y piedra. La elaboración de bebidas y alimentos, la construcción, la orfebrería y el tejido fueron los principales pasos de industrialización; sin embargo, la industria como la conocemos actualmente se desarrolló con la llegada de los españoles, quienes explotaron los yacimientos minerales y establecieron las primeras industrias en el país: textiles, del tabaco, del jabón, del azúcar y de la pólvora, entre otras.

En la época colonial la actividad más importante del país era la industria extractiva (minería), mientras que la industria de transformación (textil, alimenticia, etc.) no era tan relevante. Años más tarde, durante la década de 1920 se establecieron fábricas dependientes de empresas estadounidenses como la Ford y Simmons, se desarrollaron las industrias extractivas (se incluye el petróleo además de la minería), la textil, la alimentaria y de calzado. Pero el suceso más importante para la industrialización en México fue la Segunda Guerra Mundial, que provocó una gran inversión extranjera en el país para abastecer de materias primas, de productos alimenticios y de textiles a los países que estaban en guerra, principalmente a los Estados Unidos por su cercanía geográfica. Desde entonces, la producción en México se orientó sobre todo hacia la industria extractiva, petroquímica, química (farmacéutica), construcción de maquinaria, alimentaria y de bebidas (ILCE, 2009).

En la actualidad, aproximadamente una tercera parte (30% en el 2015) de toda la energía que se consume en México se usa en el sector industrial, que es el segundo sector consumidor de energía después del transporte, con un consumo final de 1,612 PJ de un total de 4,941 PJ. Las industrias con mayores consumos de energía se pueden observar en la figura 5.2, donde resaltan la industria básica del hierro y acero, la de fabricación de cemento y productos a base de cemento y Pemex-petroquímica. La industria petroquímica por lo regular se incluye dentro del subsector de la industria química, sin embargo, en el Balance Nacional de Energía se toma en cuenta por separado petroquímica de Pemex debido a su importancia (magnitud energética).

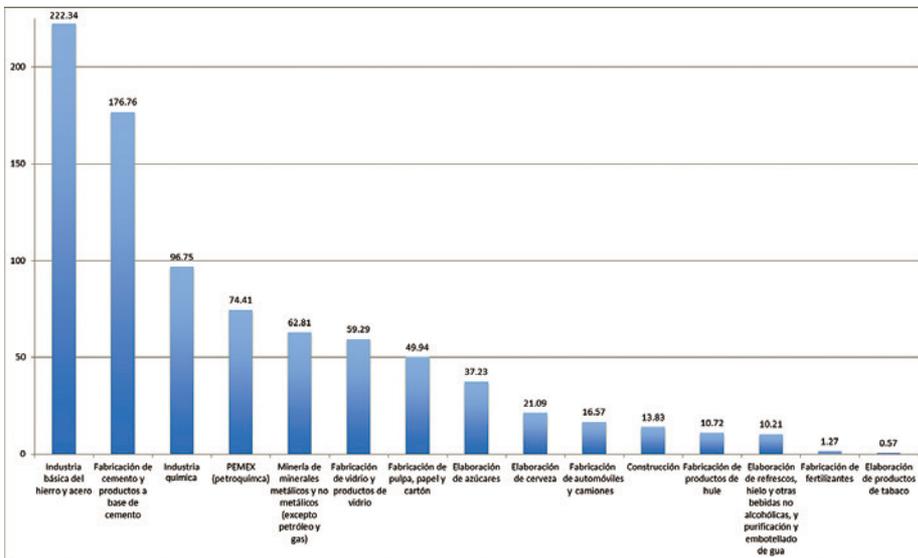


Figura 5.2. Consumo de energía de las principales ramas industriales (Petajoules) en el 2015.

Fuente: elaboración propia con datos de Sener, 2016.

Un factor muy importante a considerar es la fuente energética que se procesa, pues de ello depende el impacto ambiental que pueda tener el uso de la energía. Se entiende por fuentes energéticas a las existentes en la naturaleza

y que se pueden utilizar o transformar por diferentes procesos. De una misma fuente pueden extraerse diferentes productos o transportadores energéticos: de los yacimientos de esquisto se puede extraer gas natural y petróleo; de la radiación solar se puede obtener electricidad y agua caliente; del viento se puede aprovechar la energía mecánica y transformarla en electricidad. Los combustibles son un grupo de transportadores energéticos y pueden ser líquidos, sólidos o gaseosos.

En términos de los impactos al ambiente, cada energético, de acuerdo con la tecnología de extracción y aprovechamiento, tiene un patrón de emisiones diferenciado. A modo de ejemplo, el gas seco genera menores emisiones de gases contaminantes (SO_2 , CO_2 , NO_x y CH_4) por unidad de energía producida que otros energéticos tales como el carbón o el combustóleo. En la figura 5.3 se muestra el consumo de energía por transportador energético y en la figura 5.4 se pueden ver los principales combustibles utilizados en cada rama industrial.

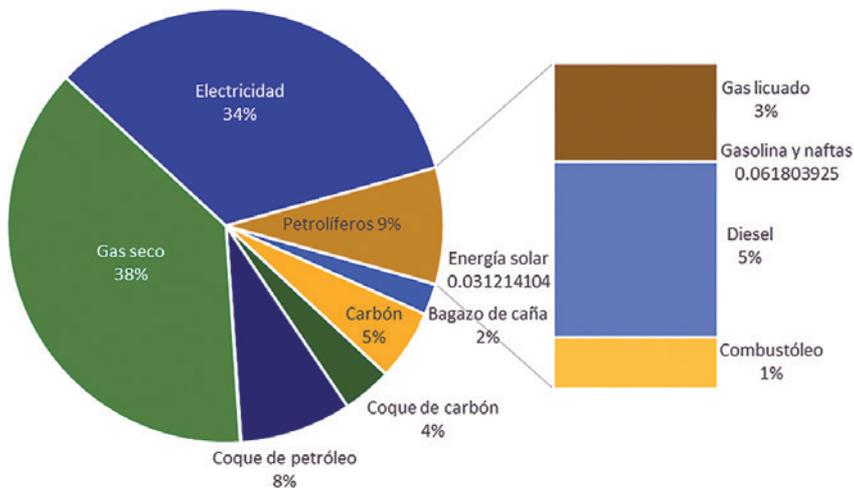


Figura 5.3. Consumo de energía por tipo de energético.

Fuente: Elaboración propia con datos de Sener, 2015.

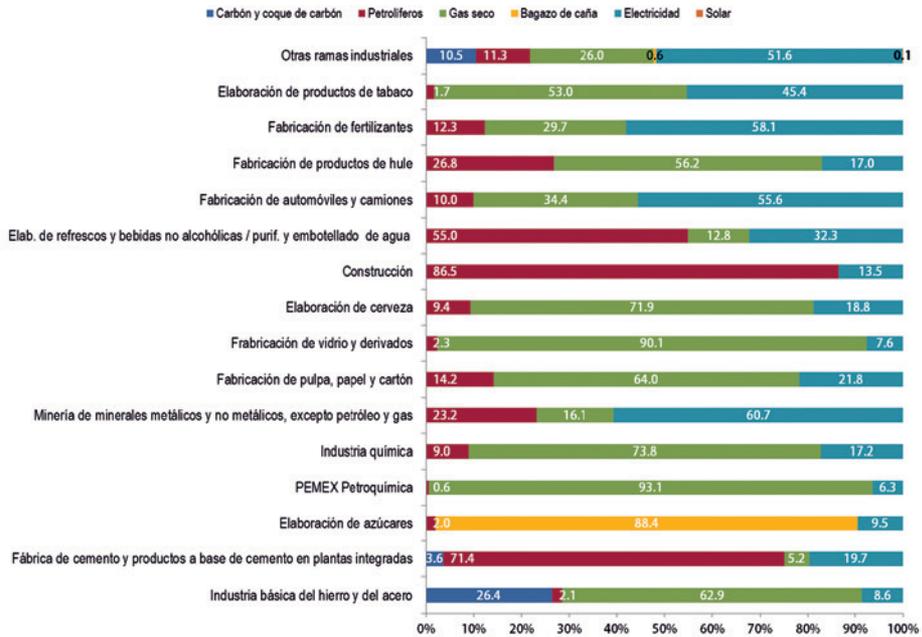


Figura 5.4. Estructura del consumo energético de las principales ramas industriales por tipo de energético, 2015.

Fuente: Sener, 2016.

En el sector industrial nacional predomina el uso de gas natural, diferentes combustibles derivados del petróleo (gas LP, diésel, combustóleo), carbón mineral y coque de carbón. La extracción de estos energéticos, su procesamiento, transporte y uso final generan impactos ambientales considerables como las emisiones de gases de efecto invernadero. Por esta razón, una opción es disminuir el consumo de energía en el sector, aumentando la eficiencia energética de los procesos. Otra opción es la sustitución de los energéticos fósiles por energéticos renovables que tienen menores emisiones de GEI y menores impactos ambientales negativos.

5.1.3. La intensidad energética en la industria

¿Cómo se pueden comparar los consumos de energía por sector?

¿Qué caminos existen para encontrar oportunidades de eficiencia energética?

El desarrollo económico de un país está relacionado, en entre otros factores, al desempeño de su sector industrial, el cual transforma las materias primas en artículos de consumo (alimento, vestimenta, artefactos eléctricos, entre otros). Bajo un enfoque energético, es importante trabajar con indicadores que vinculen el consumo de energía de las industrias con su producción, permitiendo de esta forma analizar la evolución de la demanda energética del sector industrial y encontrar oportunidades para disminuir el consumo.

Entre los diferentes indicadores que nos permiten entender y evaluar el comportamiento energético de un país (y de sus sectores productivos), la intensidad energética es el más usado a nivel mundial para tener un medio de comparación entre países. A continuación, se describen las diferentes categorías de este indicador.

Intensidad energética por unidad de valor agregado

Se define como la cantidad de energía requerida para producir una unidad del PIB (Sener, 2015) y su unidad de medida es en GJ/\$. Permite analizar las tendencias de uso de energía en el sector industrial, aunque no es el más preciso para evaluar la eficiencia energética en el sector debido a que no logra diferenciar la tecnología empleada ni los procesos productivos más eficientes en este sentido, a menos que se lo calcule separadamente para cada proceso o cada subsector de la economía.

Evaluar la intensidad energética por unidad de valor agregado es interesante para valorar las tendencias de uso de energía. Mientras menor sea la intensidad energética, la productividad y la eficiencia energética del país aumentan (es decir, se produce una unidad de riqueza con un menor uso de energía).¹ También nos permiten visualizar la relación entre consumo de energía y desarrollo del país; cuando el consumo energético aumenta, también se incrementa el PIB, tal como se aprecia en la siguiente figura 5.5.

¹ Ver caja 5.1 para algunas precisiones sobre este indicador.

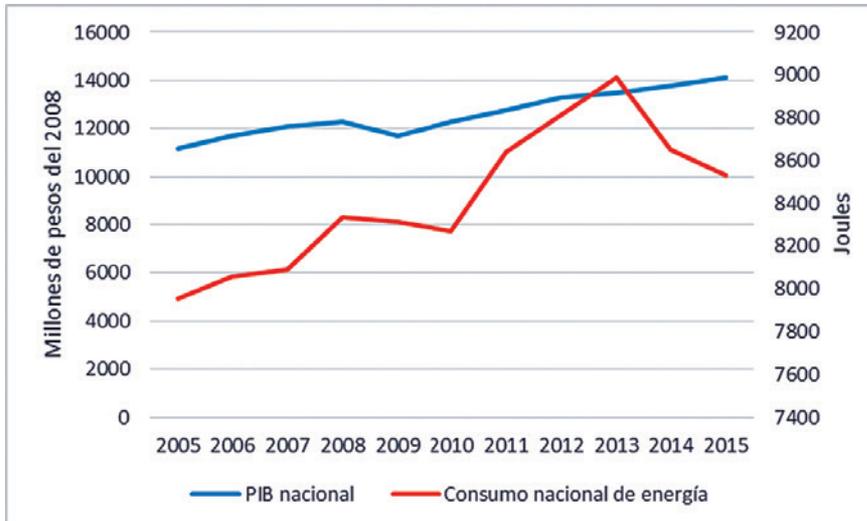


Figura 5.5. Producto Interno Bruto vs. Consumo nacional de energía.

Fuente: elaboración propia con datos del BNE (Sener 2016).

Además, este indicador es muy importante y fácil de calcular. Se puede utilizar la siguiente fórmula tomada de Sener, 2011:

$$IE_{i,t} = \frac{C_{i,t}}{VA_{i,t}}$$

Donde:

$IE_{i,t}$ es la intensidad energética de la actividad industrial i en el año t .

$C_{i,t}$ es el consumo de energía de la actividad industria i en el año t .

$VA_{i,t}$ es el Valor Agregado de la actividad i en el año t .

Intensidad energética por unidad de producción física

Este indicador relaciona el consumo energético del sector industrial por unidad física producida (Sener, 2011) y su unidad de medida es el GJ/T producida. Tiene relación directa con los procesos de producción y con la tecnología empleada, permitiendo de esta forma analizar oportunidades de mejora en la eficiencia energética por sus tecnologías de uso final.

El cálculo de este indicador se puede hacer utilizando la fórmula:

$$IE_{i,t} = \frac{C_{i,t}}{P_{i,t}}$$

Donde:

$IE_{i,t}$ es la intensidad energética de la actividad industrial i en el año t .

$C_{i,t}$ es el consumo de energía de la actividad industrial i en el año t .

$P_{i,t}$ es la producción de unidades físicas de la industria i en el año t .

De esta forma, se puede observar en la figura 5.6 el comportamiento y la tendencia de la intensidad energética (en función del PIB) para diferentes industrias mexicanas. Se puede notar que la intensidad energética disminuyó desde 1990 al 2008 en la mayoría de las industrias, con excepción de las industrias del cemento, vidrio, caucho y tabaco, donde aumentó. En la siderúrgica la intensidad energética disminuyó por cambios tecnológicos (por ejemplo, hornos de fundición más eficientes), los ingenios y la petroquímica modernizaron sus cadenas de producción; mientras que en las cementeras, el aumento de la intensidad energética fue debido al cambio de combustible, coque de petróleo por gas natural, siendo el coque menos eficiente.

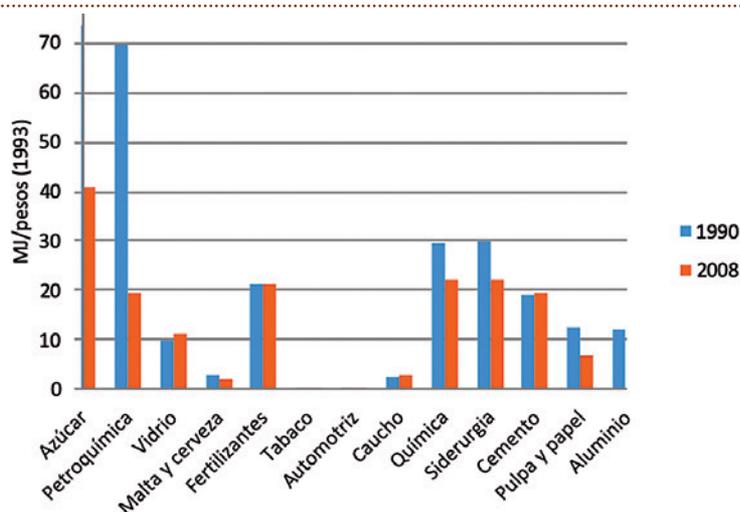


Figura 5.6. Intensidad energética por subsector manufacturero en México para los años 1990 y 2008.

Fuente: elaboración propia con datos de Sheinbaum-Pardo *et al.* (2012).

CAJA 5.1. PARA SABER MÁS...

La intensidad energética de un país es usada con frecuencia como un indicador de eficiencia energética. La razón principal para utilizar el indicador es que es de fácil medición (cantidad de energía consumida, dividida por el PIB del país), sin embargo, podría generar un error de interpretación, ya que un país con una baja intensidad energética no necesariamente tiene una alta eficiencia. Por ejemplo, un pequeño país basado en el sector de servicios ubicado en un clima templado, sin duda, tendrá una intensidad mucho menor que un gran país industrializado ubicado en un clima muy frío, incluso si se consume la energía de manera más eficiente en este país que en el primero. La eficiencia es un factor que contribuye a la intensidad, pero muchos otros elementos –a menudo más importantes– también deben tenerse en cuenta. Estos incluyen: la estructura de la economía (presencia de grandes industrias consumidoras de energía, por ejemplo); el tamaño del país (la mayor demanda del sector del transporte); y el clima (mayor demanda de calefacción o refrigeración).

¿Qué quiere decir que la intensidad energética de un determinado sector industrial aumente? ¿Cómo podemos utilizar la intensidad energética para encontrar medidas de ahorro de energía?

5.1.4. Soluciones energéticas para la industria

¿Cómo se pueden identificar e implementar medidas de ahorro energético en el sector? ¿Qué relación existe entre una biorrefinería y el uso eficiente de energía? ¿La cogeneración es técnica y económicamente viable como medida de ahorro energético?

El crecimiento acelerado de la población, el aumento en el consumo de productos y servicios, sumado al uso poco eficiente de energía incrementan el consumo energético (primario y secundario) en el sector industrial, donde predomina el uso de los combustibles fósiles. Como se mencionó anteriormente, la extracción, procesamiento, transporte y uso final de combustibles fósiles generan emisiones de gases de efecto invernadero que aceleran el cambio climático, entre muchos otros impactos ambientales (para profundizar en los impactos ambientales ver capítulo 8).

Frente a estos problemas, son fundamentales las acciones de mejora que puedan realizarse en el uso final de la energía en el sector industrial, entre las cuales

se pueden mencionar el aumento de la eficiencia energética, modificaciones en los procesos, o implementación de buenas prácticas para uso de la energía. A continuación, se presentan algunas alternativas para realizar un mejor uso de la energía en el sector mencionado.

5.1.4.1. Buenas prácticas y eficiencia energética

El primer paso para disminuir el consumo de energía en el sector industrial es encontrar áreas u oportunidades de ahorro, para posteriormente aplicar acciones de buenas prácticas. Estas acciones pueden ser muy simples, como apagar las luces cuando no se necesiten, ajustar los termostatos en las áreas climatizadas y comprobar que no existan pérdidas en los sistemas de aire comprimido; o más complejas, como se explica a continuación.

En muchos países se ha logrado una significativa reducción en la intensidad energética (IE) en el sector industrial por medio de un incremento en la eficiencia de los procesos. Este aumento de eficiencia se debe principalmente a la mejora de las tecnologías de uso final, y a la evolución de los sistemas de control y optimización.

Para encontrar oportunidades de ahorro de energía, y así poder implementar algunas de las buenas prácticas ejemplificadas anteriormente, se pueden utilizar técnicas como el *benchmarking*, que es una herramienta para comparar el consumo o la eficiencia energética entre sectores similares. Por ejemplo, se puede evaluar el consumo unitario de energía de un ramo industrial en un país (industria del cemento) comparando el consumo unitario del mismo ramo a nivel mundial. De esta forma, se pueden determinar posibilidades de implementar acciones de mejora, como se puede ver en el cuadro siguiente.

En el cuadro 5.1 se puede observar, a modo de ejemplo, que la herramienta de *benchmarking* permite comparar las medidas de mejora energética en la industria del cemento, tomando como referencia los países industrializados que tienen un potencial de mejora del 20 al 25%. Los países en vías de desarrollo tienen un mayor potencial de mejora, aunque no difiere mucho del anterior y varía entre 20 y 30%. Sin embargo, al transformar estos porcentajes en valores energéticos, se puede ver que la industria del cemento en los países en desarrollo tiene un potencial de ahorro de energía de 1.8 EJ/año, y debe tomar como referencia el potencial de esta industria en los países desarrollados, donde alcanza un valor de 0.4 EJ/año. Esto significa que los países en vías de desarrollo deberían considerar la experiencia y

las medidas de eficiencia utilizadas por los países industrializados que consumen menor cantidad de energía en este rubro industrial.

CUADRO 5.1
POTENCIALES DE MEJORA EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA INDUSTRIA MANUFACTURERA, BASADO EN EL BENCHMARKING E INDICADORES (2007).

	POTENCIAL DE MEJORA (%)		POTENCIAL DE AHORRO TOTAL (EJ/YR)		SUMA GLOBAL (EJ/YR)
	PAÍSES INDUSTRIALIZADOS	PAÍSES EN DESARROLLO	PAÍSES INDUSTRIALIZADOS	PAÍSES EN DESARROLLO	
Química y petroquímica					
Químicos de alto valor	15-25	25-30	0.4	0.3	2.3
Amonio, metanol	10-15	15-30	0.1	1.4	
Metales no ferrosos					
Producción de alúmina	30-40	40-55	0.1	0.5	1
Fundiciones de aluminio	5-10	5			
Fundición no ferrosa y otros no ferrosos	35-60		0.2	0.2	
Metales ferrosos					
Hierro y acero	10-15	25-35			6.1
Fundición ferrosa	25-40		0.7	5.4	

Minerales no metálicos					
Cemento	20-25	20-30	0.4	1.8	2.8
Cal					
Vidrio	10-40	20-50	0.4	0.2	
Cerámica					
Pulpa y papel	20-30	15-30	1.3	0.3	1.6
Textil					
Alimento, bebidas y tabaco	25-40		0.9	1	1.9
Otros sectores	10-15	25-30	2.5	8.7	11.2
Total	10-20	30-35			
Total (excluyendo materia prima)	15-20	30-35	7.2	20.1	27.3

Fuente: tomado de Banerjee *et al.* (2012).

Otra forma de encontrar oportunidades de mejora energética es identificar los componentes de mayor consumo dentro de sistemas energéticos. Existen ciertos sistemas en las instalaciones industriales, por ejemplo, motores eléctricos y producción de vapor, que consumen grandes cantidades de energía y tienen, por lo tanto, mayores oportunidades para implementar medidas de eficiencia energética. Actualmente se trabaja en mejoras energéticas sobre los componentes individuales de los sistemas (bombas, compresores, calderas) que ayudan a disminuir el consumo de energía del sistema industrial al que pertenecen.

Las mejoras de cada componente se deben considerar desde un punto de vista técnico y económico. Los potenciales técnicos de ahorro son generalmente mayores que los potenciales económicos. Por ejemplo, en los sistemas de compresión de aire, el potencial técnico de ahorro de electricidad puede ser 10% mayor que

el potencial económico. Generalmente las técnicas costo-efectivas son simples de implementar y contemplan arreglo de fugas, eliminar o reconfigurar los usos inapropiados de energía, contemplar mantenimiento predictivo de los equipos, etc. Mientras que las inversiones en la implementación de mejoras más complejas, como controladores de consumo o reemplazo de tecnologías, suelen ser costosas y no logran ahorros significativos.

5.1.4.2. Medidas de eficiencia: nuevos diseños y procesos (integración de procesos)

La integración de procesos es una técnica que permite disminuir el costo de inversión para la implementación de buenas prácticas. Mediante la integración y el diseño óptimo de procesos industriales se logra minimizar el consumo de energía, mejorar el uso de materia prima y promover el desarrollo sustentable.

Las industrias que trabajan con biomasa como materia prima tienen gran potencial de integrar procesos, convirtiendo sus residuos en coproductos. Un ejemplo de lo anterior es lo que hoy conocemos como biorrefinerías, que son instalaciones industriales con un concepto similar a una refinería de petróleo, pero en el primer caso se procesa biomasa para obtener diferentes bioproductos, por ejemplo, biocombustibles, compuestos químicos y electricidad. De esta forma, se diversifican los productos obtenidos de una misma materia prima, y disminuye el consumo de energía por unidad de producto obtenido.

Estas estructuras industriales posibilitan el uso eficiente de la energía, diversificando las entradas y salidas de los procesos, y revalorizando de esta forma los recursos. Las biorrefinerías promueven el uso de energías renovables y la disminución de emisiones contaminantes.

5.1.4.3. Cogeneración

La cogeneración se define como la producción simultánea de calor útil y electricidad a partir de un mismo combustible o fuente de energía primaria. Estos combustibles pueden ser de origen fósil (por ejemplo, gas natural, combustóleo, etc.) o renovable (por ejemplo, residuos agrícolas y forestales, biogás, etcétera).

El principio fundamental de la cogeneración es la recuperación del calor residual, producto por ejemplo del proceso de combustión en una planta generadora de electricidad. El calor recuperado, de otra forma hubiera sido liberado en el

medio ambiente desperdiciando con ello una parte importante de la energía todavía disponible en los gases de combustión. Esta energía recuperada, en la mayoría de los casos puede ser utilizada en diversos usos finales como calefacción de espacios, calentamiento de agua, así como otros procesos térmicos o de refrigeración que se encuentren cercanos a la planta de cogeneración.

El principal beneficio de la cogeneración es el mayor aprovechamiento del combustible, lo que permite aumentar la eficiencia del sistema. La eficiencia global de un sistema de cogeneración se define como la relación entre la suma de la energía térmica y eléctrica producida por el sistema y la energía contenida en el combustible empleado para la obtención de las energías sumadas. Un proceso de cogeneración usualmente convierte 75-80% del combustible en energía útil (figura 5.7), mientras que las plantas más modernas alcanzan hasta 90% o más. Comparativamente, la eficiencia promedio de plantas de generación eléctrica tradicionales está por debajo del 35% para derivados del petróleo y carbón, alrededor del 45% cuando usan gas natural y en plantas de ciclo combinado se alcanzan eficiencias cercanas al 50%.

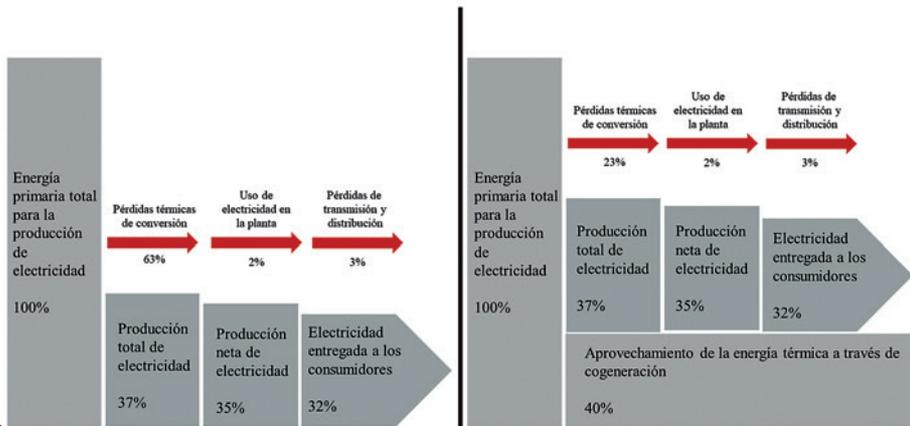


Figura 5.7. Comparación entre sistemas convencionales y cogeneración.

Fuente: Guía Práctica de Trámites y Permisos para Proyectos de Cogeneración de Energía Eléctrica en México (Conuee, GIZ, 2012). Tomado de <https://www.google.com/url?sa=f&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewiLjdbutJPOAhXBnGoFHdMDBRAQFnoECAIQAGurl=https%3A%2F%2Fwww.gob.mx%2Fcms%2Fuploads%2Fattachment%2Ffile%2F200257%2F cogeneracion.pdf&usq=AOvVaw0dykL3s-0thp-qPdaFvF5r9>

¿Para qué sirve la cogeneración?

¿Qué beneficios se obtienen?

¿Dónde se puede aplicar?

CAJA 5.2.

Los ingenios de caña de azúcar son particularmente interesantes para la cogeneración, puesto que el bagazo de caña está disponible prácticamente sin costo y se puede usar como combustible. Además, los ingenios requieren la producción simultánea de electricidad y calor de proceso en una relación de 1:4 o 1:5. Sin embargo, hasta la fecha, los ingenios habían limitado la generación de la energía eléctrica y térmica solamente para resolver su demanda por separado. Mientras tanto, se ha reconocido que la cogeneración con bagazo y con otras biomásas puede contribuir considerablemente a la sustitución de energéticos no renovables. También, los ingresos obtenidos por venta de la electricidad sobrante o excedente a la red se están haciendo cada vez más atractiva para los productores de azúcar, quienes deben rediseñar sus instalaciones para llegar a capacidades más altas de generación eléctrica y hacer un uso más intensivo del bagazo disponible.

Fuente: (Conuee/ CRE/ GTZ, 2009).

5.1.4.4. Cambios de fuente de energía

Actualmente, las principales energías renovables que se utilizan en México son la biomasa, la hidroelectricidad, la energía eólica y la solar. Sin embargo, el uso de energías renovables en el sector industrial aún es incipiente, predomina el uso de bagazo de caña en los ingenios azucareros con una creciente contribución de la energía eólica y solar para generar electricidad o calentar agua.

Existen grandes potenciales de sustituir combustibles fósiles por energías renovables, como la biomasa, en el sector industrial de México, utilizando principalmente residuos agroindustriales (cáscaras de naranja, cascarilla y pulpa de café, bagazo de agave, entre otras) que se encuentran disponibles en las industrias alimenticias. Otros recursos que aumentan el potencial de sustitución de combustibles fósiles son los residuos forestales (aserrín y leña mayormente) y biocombustibles sólidos procesados (astillas, pellets, carbón). Estos recursos biomásicos tienen el potencial técnico aproximado de 330 PJ/año (lo que equivale al 20% de la demanda total de energía del sector industrial en el 2015 según la Sener, 2016) para reemplazar combustóleo, coque de carbón, diésel, gas natural o gas LP en calderas industriales.

CAJA 5.3. EL USO DE LA ENERGÍA SOLAR EN LA PRODUCCIÓN DE TORTILLAS Y MASA EN LA TORTILLERÍA “LA CRUZ” EN PUEBLA

Existen en México varios casos para el uso de la energía solar en la producción de tortillas. Esta opción es atractiva debido a los ahorros económicos que se presentan al disminuir el consumo de gas LP y su consecuente disminución de emisiones contaminantes. A continuación, revisamos un ejemplo concreto.

La instalación solar de la tortillería se localiza en la cubierta plana del local. Se trata de un sistema termosifónico, localmente denominado calentador solar, que consta de dos grandes colectores de tecnología de tubo de vacío y tres tanques de almacenamiento de agua termoaislados.

En la tortillería, el calor captado por los colectores solares es usado como aporte energético básico para elevar la temperatura del agua en la que se hierve el maíz junto con un poco de cal, un procedimiento clave para la elaboración de la tortilla denominado nixtamalización.

El proceso consiste en precalentar el agua en los colectores solares a una temperatura entre 75 °C y 86 °C. Esta agua caliente se hace pasar a continuación por un calentador de gas que es el encargado de aportar la fracción de energía complementaria para alcanzar una temperatura de cocción final de 95 °C a 100 °C.

Este precalentamiento solar, aunque por sí sólo no es suficiente para cocer el maíz, supone un aporte muy importante de energía y permite un ahorro notable de combustible. No resulta igual elevar la temperatura del agua en un calentador de gas hasta los 100 °C, partiendo de 80 °C, que hacerlo partiendo de 15 °C (en caso de no contar con la tecnología solar). El salto térmico en el primer caso será de sólo 20 °C, mientras que en el segundo de 85 °C. En conclusión, hará falta quemar mucho menos gas para elevar la temperatura del agua precalentada en los colectores solares que la tomada fría directamente de la red. Al elevar la temperatura del agua en buena medida por medio de una fuente de energía gratuita como es la energía solar, en vez de hacerlo enteramente con gas, se obtiene un ahorro económico y de emisiones de gases contaminantes muy importante

Fuente: <http://www.sitiosolar.com/instalacion-solar-termica-en-tortilleria-de-maiz-en-puebla-mexico/>

¿Por qué las energías renovables son una alternativa para el sector industrial?

¿Qué beneficios generan?

5.1.4.6. El efecto rebote de la eficiencia energética

Antes de finalizar esta sección, es importante mencionar que las mejoras en la eficiencia energética no siempre están relacionadas con un ahorro energético.

¿Cómo puede ser esto? Se define como “efecto rebote”, un término poco estudiado y medido en el sector industrial.

Lo podemos entender mejor con un ejemplo de Lovins *et al.* (2011), quienes consideran que una fábrica de teléfonos celulares ahorra energía por medio de prácticas de eficiencia. La fábrica reinvertirá sus ganancias provenientes del ahorro energético con la intención de ahorrar aún más, tal vez compren nueva maquinaria para aumentar la producción. Al mismo tiempo, podrán fabricar más teléfonos, que a su vez serán más baratos por la disminución en los costos de producción, y expandir su mercado usando cada vez más energía para producir nuevos celulares. Por otro lado, al bajar el precio de venta de los celulares, cada vez habrá más usuarios, lo que impulsa otro aumento en el consumo energético.

El efecto rebote es una discusión amplia y aún no resuelta. Sin embargo, actualmente los estudios son limitados y existen desacuerdos entre investigadores. Mientras algunos afirman que el efecto rebote es despreciable y no es un fenómeno observable, otros afirman que este efecto es considerable, significando que las mejoras en eficiencia podrían llevar a un incremento en el consumo de energía para otros usos. Esto ocurriría debido a que se lograrían ahorros económicos al disminuir el consumo energético por las acciones de eficiencia, recursos que se podrían utilizar para adquirir otros equipos que a su vez requieran de energía para funcionar, lo que reduciría o eliminaría los ahorros de energía logrados por las acciones para incrementar la eficiencia. De cualquier forma, sería necesario analizar y complementar las políticas que incentivan el uso eficiente de energía con otras medidas fiscales que compensen el efecto rebote.

5.2. SISTEMA ELÉCTRICO

5.2.1. Introducción

¿Por qué es importante la energía eléctrica? ¿Cómo puede apreciarse su impacto en la Tierra?

Hoy en día, la energía eléctrica es fundamental para la satisfacción de necesidades básicas (como la iluminación, confort térmico, comunicación, refrigeración) y otras como el ocio y el entretenimiento. Su uso en aplicaciones de iluminación es incluso perceptible desde el espacio exterior (figura 5.8).

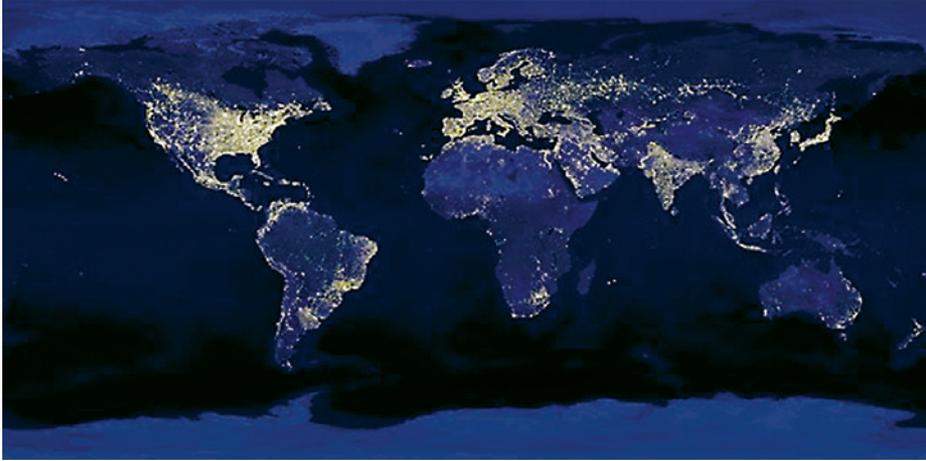


Figura 5.8. Composición fotográfica de la tierra.

Fuente: Observatorio Terrestre de la NASA y Centro Nacional de Datos Geofísicos de la NOAA.
https://www.nasa.gov/mission_pages/NPP/news/earth-at-night.html

La electricidad también es el transportador energético que ha permitido el surgimiento de la llamada sociedad de la información. Debido a su versatilidad, puede proporcionar energía para prácticamente cualquiera de los usos finales, incluso, debido a su alta eficiencia y flexibilidad, se espera que las infraestructuras de comunicaciones, de los edificios, de las industrias e incluso en el transporte, migren para emplear a la electricidad como transportador energético (Lovins *et al.*, 2011).

Los descubrimientos de Tesla y Faraday permitieron el surgimiento de las plantas de generación de energía eléctrica y su transmisión a grandes distancias (lo que permitió tener la generación de energía en localizaciones alejadas de los dispositivos de uso final).

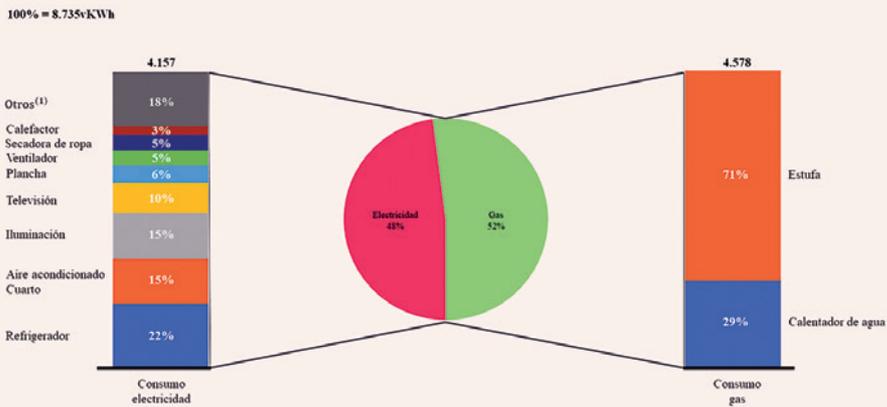
5.2.2. Usos de la energía eléctrica

A nivel global los principales usos de la energía eléctrica son: 1) el sector industrial; 2) el sector residencial; 3) el sector comercial y público y; en menor medida, el sector agropecuario, transporte y otros. Por su parte, en México el principal consumo corresponde al sector industrial, seguido por el sector residencial, de servicios y agrícola (Cancino-Solórzano *et al.*, 2010).

CAJA 5.4. PRINCIPALES USOS DE LA ELECTRICIDAD EN LOS HOGARES MEXICANOS

A nivel residencial se presentan patrones de consumo energético y de fuentes de energía distintos dependiendo de si los hogares a los que nos referimos se encuentran en zonas rurales o en zonas urbanas. Los hogares en zonas rurales dependen en mayor parte de combustibles tradicionales, como la leña, para satisfacer su demanda energética.

En la Figura 5.9 se presenta el consumo típico de energía en los hogares mexicanos urbanos. Como puede observarse, en cuanto al consumo de energía eléctrica, la mayor parte se emplea en refrigeración de alimentos, seguido de otros usos como iluminación y acondicionamiento de espacios. Cabe señalar que se ha observado una tendencia de aumento de uso de la energía eléctrica en los hogares, al pasar del 11% en 1990 al 23% en 2010 (Islas *et al.*, 2015).

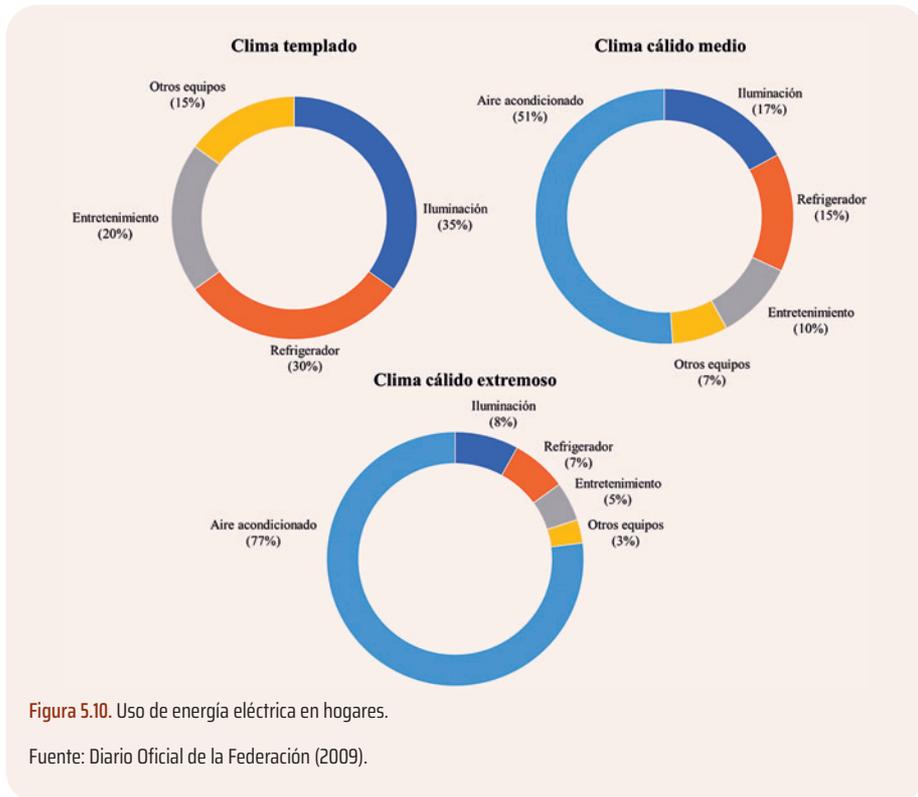


⁽¹⁾ Productos que consumen menos de 2%. Incluye computadoras, secadoras de pelo, microondas, videojuegos, cafeteras, estéreos, radios, entre otros.
FUENTE: CFE, ENIGH 2006, análisis CONUEE.

Figura 5.9. Consumo eléctrico.

Fuente: Diario Oficial de la Federación (2009).

Es interesante notar que las condiciones climáticas juegan un papel fundamental en el consumo energético de los hogares. Por ejemplo, en lugares muy calurosos será necesario invertir más energía en aires acondicionados en comparación con lugares de clima templado (ver figura 5.10).



Se prevé que la generación mundial de electricidad aumentará en un 93%, pasando de 20.2 billones de kWh en 2010 a 39 billones de kWh en 2040 y que la electricidad suministrada a los usuarios finales aumentará en un 2.2% por año en ese mismo periodo de tiempo, en comparación con un crecimiento medio del 1.4% anual para las fuentes de energía. Por otra parte, se ha estimado que el 19% de la población mundial (alrededor de 1,300 millones de personas en 2010) no contaba con acceso a la electricidad. Más aún, se reporta que alrededor del 57% de la población en África no cuenta con acceso a la electricidad (Pedraza, 2015).

5.2.3. Principios básicos

Para poder entender la transformación de distintas formas de energía a energía eléctrica (recordemos que la electricidad es una forma de energía secundaria), es necesario revisar algunos conceptos físicos.

Un circuito eléctrico (ci) es un bucle cerrado de alambre que contiene una fuente de voltaje (generador o batería) y una carga (algún dispositivo que usa electricidad). Los términos empleados en un ci son el voltaje (v), la corriente (i) y la carga (R).

La medida del potencial eléctrico es el voltaje (v), en tanto que el flujo de electrones (intensidad de corriente) que se transporta es i. R representa la resistencia a que ocurra flujo de electrones, y se le llama resistencia. En un sistema eléctrico v, i y R están todos interrelacionados y su relación es explicada por la ley de Ohm ($v = i R$), la cual cuantifica la resistencia al flujo de corriente eléctrica (Aubrecht, 2006). La unidad de potencial eléctrico es el volt (V), mientras que las unidades de la corriente eléctrica y la resistencia son el ampere (A) y el ohm (Ω) respectivamente. La potencia está definida por la relación:

$$P = V \times I$$

Existen dos tipos de corriente eléctrica, la corriente directa (DC) en la cual los electrones fluyen en una sola dirección, y la corriente alterna (AC), que cambia constantemente su amplitud e invierte su dirección a intervalos regulares.

Por otra parte, a partir de los experimentos de Michael Faraday (1791-1867) fue posible descubrir los generadores eléctricos, máquinas que pueden transformar la energía mecánica en eléctrica, ya que son capaces de mantener una diferencia de potencial (voltaje) entre dos puntos llamados polos (figura 5.11).

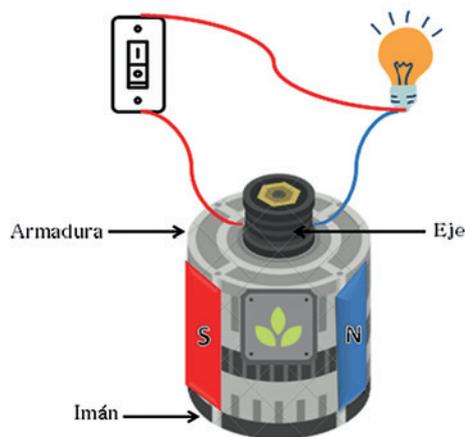


Figura 5.11. Generador eléctrico.

¿Cómo está formado el sistema eléctrico?

¿Cuáles son algunas de las tecnologías de generación eléctrica?

5.2.4 Componentes del sistema eléctrico

Los sistemas para el suministro de energía eléctrica son obras de ingeniería muy avanzada y que tienen una complejidad operativa alta, ya que la energía eléctrica que se genera (corriente alterna) en las grandes plantas es muy costosa para almacenar, de manera que la energía se tiene que generar al tiempo que se va demandando. Los componentes del sistema eléctrico son la generación, transmisión y distribución (figura 5.12).

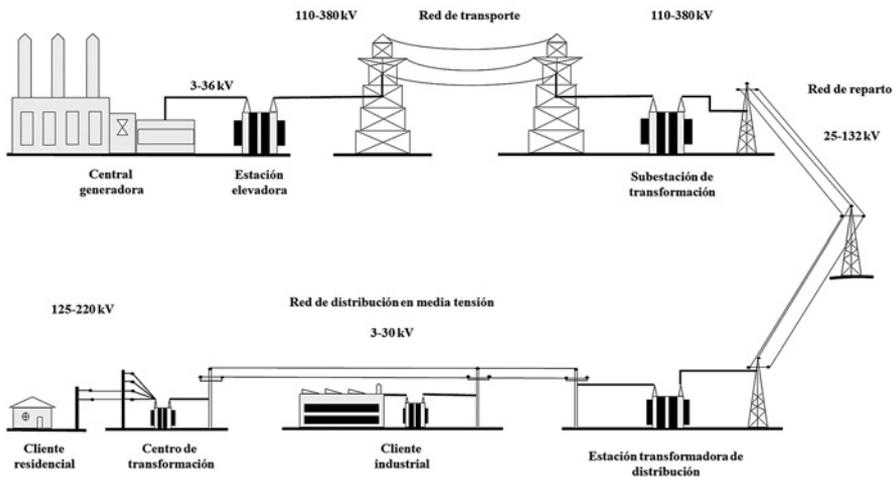


Figura 5.12. Sistema eléctrico.

Fuente: elaboración propia basada en: https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_suministro_el%C3%A9ctrico

A continuación, se describen los componentes del sistema eléctrico.

5.2.4.1. Generación de electricidad

En la actualidad la mayor parte de la generación eléctrica se da en grandes plantas centralizadas desde las cuales se tiene que llevar la energía hasta los usuarios. Las principales tecnologías para la generación eléctrica son: 1) turbinas de vapor; 2) turbinas de gas; 3) cogeneración; 4) ciclo combinado; 5) motogeneradores diésel y; 6) turbinas hidráulicas.

En seguida se explican tres de estas tecnologías.

5.2.4.1.1. Turbinas de vapor

Un dispositivo generador de electricidad muy empleado es la turbina de vapor (figura 5.13), ya que genera alrededor del 80% de la electricidad a nivel mundial. El funcionamiento de una turbina de vapor es el siguiente: mediante una caldera se calienta agua hasta llevarla a vapor sobrecalentado. Una vez que el agua se convierte en vapor, se pasa por una turbina, haciendo que la turbina gire. La turbina está conectada a un generador, el cual al girar produce energía eléctrica por medio del principio descubierto por Faraday. Después de la turbina, el vapor entra en una cámara de metal fría (el condensador). Cuando el vapor toca las paredes frías del condensador, vuelve a convertirse en agua y luego esta se bombea a la caldera para comenzar de nuevo el proceso.

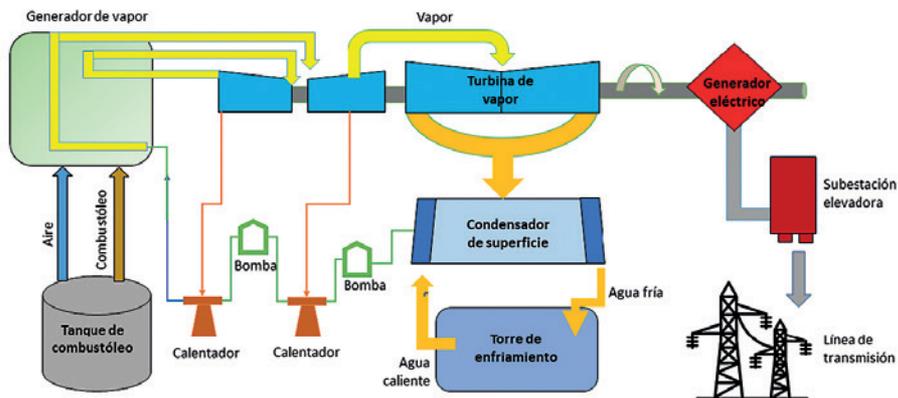


Figura 5.13. Turbina de vapor.

Fuente: elaboración propia basada en CFE (2015).

5.2.4.1.2. Turbinas de gas

La turbina de gas es otra tecnología importante para producir energía eléctrica (figura 5.14). Estos sistemas constan de compresor, cámara de combustión y una turbina de expansión. En una turbina de gas de ciclo abierto, el aire entra continuamente al compresor en condiciones atmosféricas. Posteriormente, el aire entra a la cámara de combustión, donde una parte proporciona el oxígeno necesario para realizar la combustión, mientras, la parte restante se utiliza para enfriar los gases para que puedan entrar a la turbina. Los gases realizan trabajo en la turbina para después ser expulsados a la atmósfera. Generalmente se utiliza gas natural como combustible. La conexión entre la turbina giratoria y el generador eléctrico funciona de la misma forma que en una turbina de vapor. Las turbinas de gas pueden comenzar a producir potencia a la máxima eficiencia tan pronto como se encienden. Como resultado, las turbinas de gas se utilizan comúnmente para las centrales eléctricas que necesitan encenderse rápidamente o bien cuando se requiere regular la producción de energía.

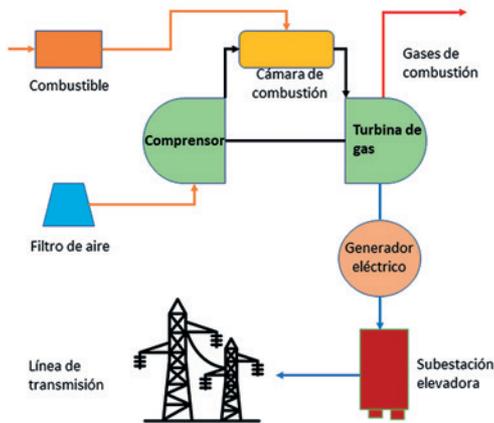


Figura 5.14. Turbina de gas.

Fuente: elaboración propia basada en CFE (2015).

Existe también un tipo de tecnología para la generación eléctrica cuya aplicación está creciendo de forma importante en México y el mundo. Se trata de las plan-

tas de ciclo combinado. Estas plantas emplean una turbina de gas en un ciclo como el ya explicado, además tienen acoplado un ciclo de vapor, donde la fuente de calor para vaporizar el agua proviene de los gases calientes a la salida de la turbina de gas (figura 5.15). Esta tecnología permite aprovechar de mejor manera el combustible, lo que aumenta la eficiencia a valores cercanos al 57%.

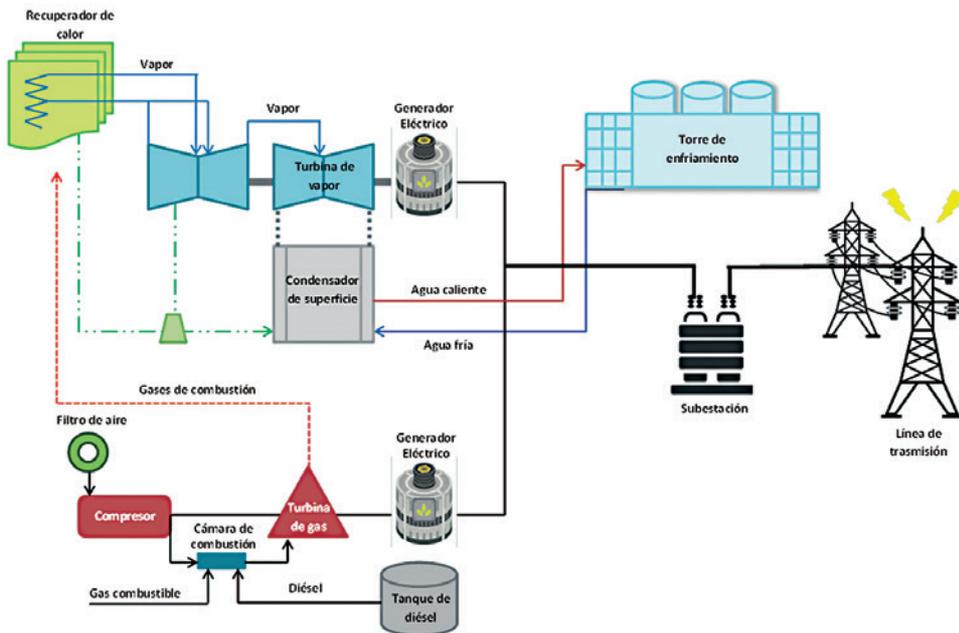


Figura 5.15. Ciclo combinado.

Fuente: elaboración propia basada en CFE (2015).

5.2.4.2. Transmisión y distribución de electricidad

La red eléctrica, es decir, la infraestructura que lleva la electricidad de la central de generación a los clientes, está conformada por las líneas de transmisión, subestaciones (para elevar o bajar el voltaje) y líneas de distribución. La transmisión se refiere a la transferencia de energía de la planta generadora a una subestación a

través de líneas de alta tensión. Por su parte, la distribución se refiere a la transferencia de energía de una subestación a varios consumidores usando líneas de voltaje mucho más bajas. Las centrales eléctricas utilizan varios tipos de líneas eléctricas (la energía se transmite casi siempre a través de tres líneas eléctricas): las líneas de alta tensión, utilizadas para la transmisión de electricidad a largas distancias y las líneas de baja tensión, utilizadas para la distribución residencial. Los transformadores y las subestaciones aumentan o disminuyen el voltaje entre los diferentes tipos de líneas eléctricas.

Como parte del proceso de transmisión, una parte de la electricidad se convierte en calor, el cual debe disiparse en las líneas eléctricas. Esta parte es proporcional a la corriente: cuanto mayor sea la corriente en una línea, mayores serán las pérdidas. Se las puede reducir usando voltajes más altos (reduciendo efectivamente la corriente). Sin embargo, las líneas de mayor tensión (voltaje) son más peligrosas que las de baja tensión y no pueden utilizarse en muchas áreas (Edwards, 2009).

¿Es posible almacenar la energía eléctrica? ¿Qué son las redes inteligentes?

5.2.5. Almacenamiento y redes inteligentes

La demanda de electricidad cambia con el tiempo (generalmente en cada región varía según la estación, el día de la semana y la hora del día de manera cíclica), por lo que existe una infraestructura encargada de equilibrar la generación de energía contra su respectiva demanda. Además, es necesario utilizar estimaciones lo más precisas posibles para calcular la carga esperada de energía eléctrica en escalas espacio temporales. El pronóstico de la carga eléctrica es esencial para la rentabilidad de una planta de generación de electricidad.

Para garantizar un mejor suministro eléctrico se han buscado formas de almacenar la energía eléctrica. Esta forma de energía solo puede ser almacenada de manera directa como una carga eléctrica en un dispositivo denominado condensador, que se conforma por dos placas opuestas con un medio dieléctrico en el espacio entre ellas. Sin embargo, la capacidad de almacenamiento incluso de los condensadores más avanzados es aún limitada (0.0003 kWh/kg). Otra complicación radica en que los condensadores solo son adecuados para el almacenamiento de energía a corto plazo debido a que la carga se disipa. Por otra parte, también se

puede almacenar energía eléctrica a partir de una conversión de esta en energía mecánica o energía química. Las baterías son un ejemplo de almacenamiento de energía química, mientras que la hidroelectricidad bombeada o el aire comprimido, entre otros, son ejemplos de almacenamiento de energía mecánica. Hasta el momento las opciones para el almacenamiento de energía eléctrica son costosas (Klimstra y Hotakainen, 2011), de manera que es más práctico generar electricidad a medida que se la necesita. No obstante, existe actualmente mucha investigación y se emplean muchos recursos en el tema.

En años recientes mucho se ha hablado del término red inteligente (RI), el cual se refiere a la modernización de la red eléctrica para que pueda monitorear, optimizar y tomar medidas preventivas en el funcionamiento de sus elementos interconectados (desde la generación central a través de la red de transmisión de alto voltaje y el sistema de distribución hasta los usuarios finales). Se lleva a cabo mediante la medición inteligente en tiempo real y los sistemas de control de las redes modernas. Básicamente, una RI busca garantizar altos niveles de seguridad, calidad, confiabilidad y disponibilidad de la energía eléctrica, así como mejorar la productividad económica, la calidad de vida y minimizar el impacto ambiental al tiempo que maximiza la seguridad y el bienestar social. Estos beneficios esperados se deben a que las RI pueden permitir un uso más extendido de la generación distribuida y de fuentes renovables de energía. Las RI se caracterizan por un flujo bidireccional de electricidad e información entre los distribuidores y los consumidores, proporcionando la información en tiempo real y permitiendo el equilibrio casi instantáneo de la oferta y la demanda (Sen *et al.*, 2014). Por lo tanto, la implementación de este tipo de dispositivos se presenta como una prometedora alternativa de optimización del sector eléctrico que podría generar una serie de beneficios en favor del uso eficiente y racional de la energía eléctrica demandada y consumida.

5.2.6. Impactos ambientales

En el desarrollo y aplicación de políticas y estrategias energéticas de los países, el impacto de la generación de energía sobre el medio ambiente debe ser considerado. Si no es así, se pueden presentar graves consecuencias para sus economías y ecosistemas.

La generación de la energía eléctrica puede afectar al ambiente de varias formas. Por ejemplo, en la combustión del petróleo se emiten CO, CO₂ y otros gases al aire, con efectos negativos sobre el medio ambiente. Para el caso del carbón, la minería tiene el potencial de dañar la calidad del aire, el agua y el suelo si no se hace con el cuidado apropiado, y se liberan dióxido de carbono, dióxido de azufre y mercurio, nocivos para el ambiente (Pedraza, 2015). De igual forma, la generación eléctrica puede hacer uso de grandes cantidades de agua, como en México, las plantas termoeléctricas pueden usar de 120 a 1,400 litros por segundo. Una descripción más detallada de los impactos ambientales negativos de la producción de la electricidad es abordada en el capítulo 8.

5.2.7. Panorama de la energía eléctrica en México

El consumo de energía eléctrica ha crecido a una tasa mayor que la de la economía al alcanzar un crecimiento promedio anual de 3% (en comparación con el 2.7% del PIB).

En cuanto a los consumidores de energía, la mayor porción de las compras fue de las empresas medianas (38.3%), seguida del sector residencial (26.4%) y la gran industria (19.4%) (Sener, 2016).

De acuerdo con información de la Prospectiva del Sector Eléctrico 2016-2030, la capacidad instalada del sector eléctrico a finales del año 2015 fue de 68,044.0 MW, con 2,519 MW de nueva capacidad (figura 5.16). La generación bruta de energía eléctrica fue de 309,552.8 GWh, de la cual 79.7% provino de tecnologías convencionales y 20.3% de las llamadas tecnologías limpias (compuestas por las fuentes renovables de energía más la energía nuclear, cogeneración eficiente, frenos regenerativos y licor negro). Cabe destacar que el ciclo combinado generó el 50% de la energía eléctrica total. Por su parte, la hidroelectricidad es la forma de energía renovable con la mayor participación en la generación eléctrica (18.4%), seguida de la energía eólica (4.1%).

Se espera que las llamadas energías limpias alcancen el 37.7% de participación en la potencia instalada para el 2030 (Sener, 2016), principalmente con energía eólica, cogeneración eficiente y una menor parte de energía nuclear y solar, en tanto que el ciclo combinado alcanzaría los 20,700 MW de capacidad nueva instalada.

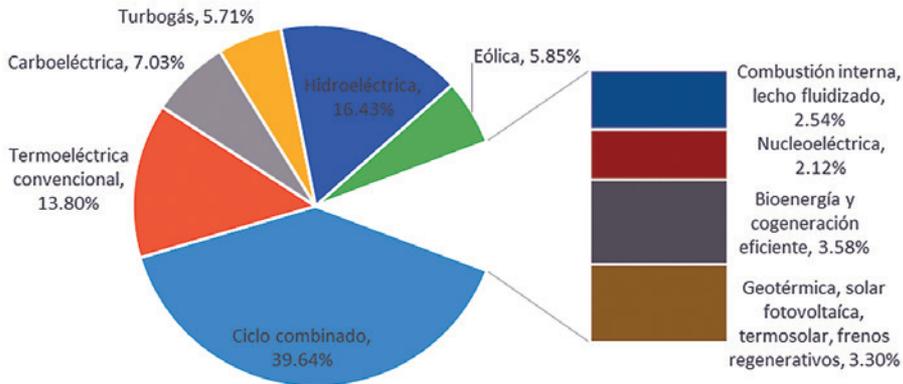


Figura 5.16. Capacidad instalada por tecnología.

Fuente: Sener (2016).

Por otra parte, debido a los diversos proyectos de generación que se esperan en todo el país, se requiere del desarrollo de líneas de transmisión acordes a la expansión programada. De acuerdo con la Prospectiva del Sector Eléctrico entre 2016 y 2025, se tienen contempladas 159 obras de transmisión, con un total de 13,066.0 km (Sener, 2016).

5.3. HACIA UN SISTEMA ELÉCTRICO SUSTENTABLE

¿Cuáles son algunas de las acciones para lograr un sistema eléctrico sustentable?

Para transitar hacia un sistema eléctrico más sustentable es necesario trabajar en distintas acciones. Entre las principales encontramos la eficiencia energética (de primera y segunda ley de la termodinámica), cambios en los hábitos de consumo y generación distribuida.

5.3.1. Eficiencia de la primera ley de la termodinámica en dispositivos eléctricos

Como señalamos con anterioridad, a nivel residencial los principales usos de la energía eléctrica, dependiendo de las condiciones meteorológicas, son la refrigeración (tanto de espacios como de alimentos) y la iluminación. A través de los

años se han tenido avances en cuanto a mejorar la eficiencia de los dispositivos de uso final para estas tareas (eficiencia de primera ley) y en cuanto a su aplicación en los hogares. Por ejemplo, en el caso de los refrigeradores, se estima que en Estados Unidos de Norteamérica (EUA) en promedio un refrigerador usa 72% menos energía (en 2009) que los modelos usados en 1972 (Lovins *et al.*, 2011). Por su parte, se estima que los aires acondicionados han mejorado su eficiencia a una tasa de 3 a 4.5% anual, sin llegar aún a los límites físicos posibles (Lovins *et al.*, 2011).

En México se ha logrado un aumento del 62% en la eficiencia de los refrigeradores en el periodo de 1990 a 2010. Si bien esta mejora es importante, aún es posible aumentar la eficiencia de estos dispositivos. Por ejemplo, es posible introducir al país tecnología usada ampliamente en EUA, con mejoras en la eficiencia de hasta 25% (Sener, 2016).

Los dispositivos para iluminación han tenido un desarrollo tecnológico considerable, así como un aumento significativo en la eficiencia de manera que actualmente se cuenta con una variedad de tecnologías para este fin (ver caja 5.5).

Para poder aprovechar las ventajas de las tecnologías más eficientes es necesario sustituir los dispositivos ineficientes. Una forma de lograr lo anterior es a partir de programas de gobierno y de normas oficiales que obliguen a los productores de dispositivos de uso final a mejorar la eficiencia de sus tecnologías. Como ejemplo tenemos las normas: NOM-011-ENER (eficiencia energética en acondicionadores de aire tipo central, paquete o dividido; límites, métodos de prueba y etiquetado); NOM-015-ENER (eficiencia energética de refrigeradores y congeladores electrodomésticos; límites, método de prueba y etiquetado); NOM-028-ENER (eficiencia energética de lámparas para uso general; límites y métodos de prueba), entre otras <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/normas-oficiales-mexicanas-en-eficiencia-energetica-vigentes>

Existen además posibles beneficios en México por la mejora en eficiencia energética en los dispositivos de uso final de energía eléctrica. La Secretaría de Energía llevó a cabo un ejercicio donde estimó que se podrían ahorrar al gobierno 600 millones pesos anuales por sustituir equipos por otros más eficientes en un millón de hogares en iluminación, refrigeración, aire acondicionado, ventiladores y lavadoras (Sener, 2017). Además, se podrían mitigar 550 mil toneladas de CO₂ y ahorrar 281 millones de litros de agua (el equivalente al consumo anual de 3,208 personas si consideramos un consumo diario de 240 litros por persona) y cada hogar ahorraría

alrededor de 377 kWh al año (una reducción promedio del 18% del consumo anual per cápita de energía eléctrica). Se estima que, si la sustitución de los equipos se diera en todos los hogares del país, los ahorros para el gobierno rondarían los 21 mil millones de pesos al año (Sener, 2017).

CAJA 5.5. TECNOLOGÍAS PARA ILUMINACIÓN

En la figura 5.17 se pueden observar tres tipos de tecnología de uso final para iluminación. La tecnología de foco incandescente es la menos eficiente de las tres, ya que nos proporciona la misma intensidad luminosa (en lúmenes) con una mayor potencia. Por su parte, la lámpara fluorescente compacta (LFC) es la más eficiente al requerir menor potencia para brindar la misma intensidad luminosa que los focos incandescentes o de halógeno. Más aún, los diodos son alrededor de 30% más eficientes que la LFC.

Nivel de iluminación (en lúmenes)	 INCANDESCENTE	 HALÓGENO	 FLUORESCENTE
	⚡ 1,000 horas	⚡ 5,000 horas	⚡ 10,000 horas
1300	100 W	70 W	18 - 23 W
930	75 W	52 W	13 - 18 W
720	60 W	42 W	11 - 12 W
420	40 W	28 W	7 - 8 W
220	26 W	18 W	5 - 7 W

Figura 5.17. Tecnologías para iluminación.

Fuente: Conuee, Guía de iluminación eficiente en el hogar. <https://www.yumpu.com/es/document/read/14655591/iluminacion-eficiente-en-el-hogar-comision-nacional-para->

5.3.2. Eficiencia de segunda ley de la termodinámica

Es posible determinar la eficiencia de segunda ley de la termodinámica para las tecnologías de generación y los usos finales de la energía eléctrica (ver capítulo 1).

Debido a que la electricidad es una forma de energía de muy alta calidad, los usos más eficientes de la misma son para la generación de trabajo, por ejemplo, en un ventilador, una bomba, o en un sistema de transporte, como puede ser un tren eléctrico. En el cuadro 5.2 podemos observar una lista con las eficiencias de primera y segunda ley de la termodinámica para tecnologías de generación eléctrica y usos finales.

CUADRO 5.2
EFICIENCIAS DE PRIMERA Y SEGUNDA LEYES PARA
GENERACIÓN Y USOS FINALES DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

DISPOSITIVO	EFICIENCIA	
	PRIMERA LEY	SEGUNDA LEY
GENERACIÓN ELÉCTRICA		
Carboeléctrica	37	36
Nucleoeléctrica	30	30
Hidroeléctrica	90	90
Celda de combustible	33	33
Turbina eólica	80-97	80-97
Sistema Fotovoltaico	6-25	6-25
Sistema Fototérmico	10-30	10-30
USOS FINALES		
Resistencia para calentamiento de espacios	99	6
Calentador de agua	90	10
Bomba	70	70
Ventilador	90	90
Lámpara incandescente	5	5

Lámpara fluorescente	20	20
Horno eléctrico (para hogares)	70-85	50-55
Secadora de ropa	60	30
Sistema eléctrico de transporte	80	80

Fuente: Elaboración propia basada en Rosen y Bulucea (2009).

5.3.3. Cambio de hábitos

Una de las formas para ahorrar energía eléctrica está en los cambios de hábitos y en el comportamiento. Básicamente se trata de eliminar de nuestra vida cotidiana aquellas acciones que resulten en un desperdicio de energía. Esto incluye acciones sencillas como apagar las luces o el aire acondicionado en las habitaciones que no se estén ocupando o cuando salimos de casa; apagar las computadoras, televisiones y otros electrodomésticos en vez de dejarlos en *stand by* ya que en este modo aún siguen consumiendo energía, aunque en menor cantidad; evitar dejar abiertas por mucho tiempo las puertas del refrigerador y del congelador; establecer temperaturas adecuadas para climatización de espacios (ni muy caliente ni muy frío); planchar la ropa en una sola sesión en lugar de varias para evitar calentar la plancha varias veces; desconectar los cargadores de baterías cuando no se estén utilizando; entre otras.

Es importante señalar que la energía ahorrada significa una menor producción de energía eléctrica, lo que implica que se requieran menos plantas eléctricas, una menor cantidad de pérdidas de energía en la transmisión y distribución debido al efecto Joule, y una disminución en los impactos ambientales.

5.3.4. Generación distribuida

Los sistemas de generación distribuida pueden ser una alternativa al modelo de generación eléctrica centralizada. La generación distribuida es aquella que se da en una geografía dispersa y que en vez de conectarse a los sistemas de transmisión se conecta directamente a los sistemas de distribución. La Ley de la Industria Eléctrica define a la generación distribuida como la generación de energía eléctrica que

es realizada a partir de energías limpias por un generador externo mediante una central eléctrica con capacidad menor a 500 kW.

Las tecnologías más comunes para la generación distribuida incluyen sistemas fotovoltaicos en los techos de los edificios; cogeneración en rellenos sanitarios; cogeneración con biogás de residuos agrícolas, pecuarios o lodos de plantas de tratamiento; pequeñas hidroeléctricas y turbinas eólicas, entre otras.

La generación distribuida puede tener varias ventajas, entre ellas: se eliminan las pérdidas por la distribución de la energía (que pueden ser del 6 al 14%) lo cual se debe a que la generación se acerca a los lugares donde se va a hacer uso de la energía; los sistemas distribuidos pueden construirse en menor tiempo debido a que las unidades de generación son de menor potencia que las de generación centralizada; puede emplear fuentes renovables de energía, lo que permitiría disminuir los impactos ambientales, mejorar la seguridad energética y evitan el riesgo de altos precios de los combustibles. Debido a que se requiere de inversiones menos cuantiosas, se reduce el riesgo financiero (en contraste con las plantas nucleares y termoeléctricas que necesitan de varios años para su construcción y tienen altos costos de inversión); permiten aumentar la resiliencia del sistema eléctrico, ya que pueden constituir microrredes que pueden incluir sistemas de almacenamiento y control que permiten que estas operen de forma independiente y puedan seguir operando si la red central falla.

En México se ha evaluado el potencial de la generación distribuida, por ejemplo, la Secretaría de Energía estimó que si se instala en sistemas fotovoltaicos el equivalente al 1% de la capacidad instalada nacional, el Estado mexicano tendría ahorros por alrededor de 1,500 millones de pesos, se reduciría el consumo de electricidad de 680 mil hogares en un 75%, se evitarían las emisiones de 1.3 millones de toneladas de CO₂ equivalente y se ahorrarían 680 millones de litros de agua (Sener, 2016).

5.3.5. Retos de las fuentes renovables de energía para su integración al sistema eléctrico

Cada vez más investigadores del tema de la energía consideran que una transición hacia fuentes de energía renovable en el sector eléctrico enfrenta grandes desafíos debido a retos técnicos, a la enorme cantidad de recursos naturales requeridos (como minerales y agregados) y a las elevadas inversiones.

Entre los retos técnicos importantes para la implementación masiva de fuentes renovables de energía (recordemos que la energía eléctrica debe ser producida a medida que va siendo demandada) está su variabilidad, ya que no siempre brilla el Sol o sopla el viento, lo que dificulta poder disponer de energía de forma confiable en el momento que se necesita. Este problema será cada vez más difícil de resolver conforme aumente la participación de fuentes renovables de energía en los sistemas eléctricos.

Existen varias soluciones propuestas a este problema, entre las que destacan el almacenamiento de energía, el manejo de la demanda y el rediseño de la red eléctrica. En cuanto a las soluciones para almacenamiento de energía se han propuesto y, en algunos casos, implementado alternativas como el bombeo de agua, almacenamiento de aire comprimido y el uso de baterías. El bombeo de agua se lleva a cabo al trasladar agua cuesta arriba en un depósito cuando existe un excedente de electricidad y luego dejarla correr cuesta abajo para accionar una turbina cuando hay un déficit de electricidad. Si bien esta opción puede proporcionar altas potencias, el agua almacenada sólo es suficiente para unas pocas horas de operación en tanto se echan a andar otras plantas de generación (Peake, 2018). Otra opción es almacenar aire comprimido en cavernas subterráneas (típicamente a 100 atmósferas). Cuando existe un pico en la demanda de electricidad, el aire se alimenta a una turbina de gas (las cuales requieren aire comprimido para su operación) de manera que se puede reducir su uso de gas hasta en un 60% (Peake, 2018). Por su parte, las baterías de iones de litio son una alternativa para almacenar directamente energía eléctrica y tienen un mayor tiempo de vida que otras baterías como las de plomo y ácido. Las baterías de iones de litio tienen la ventaja de proveer tiempo de respuesta muy cortos (fracciones de segundo) y se pueden encontrar ya en potencias de hasta 50 MW, no obstante, se usan para suministrar energía en periodos típicamente de una hora o dos. Si bien se ha visto al almacenamiento de energía eléctrica como una alternativa, ya que se está llevando a cabo mucha investigación al respecto, aún persisten dudas sobre si estos sistemas podrían almacenar la suficiente cantidad de energía a costos que resulten factibles (Heinberg y Fridley, 2016).

Otras alternativas para reducir la variabilidad es incluir fuentes renovables como la biomasa y la energía geotérmica, las cuales pueden proporcionar potencia firme y confiable. Esto es más complicado para el caso de la biomasa porque su despacho de energía dependerá de los recursos de biomasa disponible y de cons-

truir cadenas que permitan un suministro confiable del combustible en la cantidad y calidad necesaria.

En cuanto a las soluciones basadas en el manejo de la demanda de energía, las redes inteligentes permitirán un flujo bidireccional de la energía y de información sobre los precios de la energía (de manera que sea más barata cuando hay un exceso de energía eléctrica). Esto permitiría a los usuarios realizar tareas energéticas como el lavado de ropa o planchado en estos periodos.

En este sentido, existen posibilidades de integrar alternativas como el uso de autos eléctricos para manejar o mitigar la variabilidad de las fuentes renovables de energía. Los vehículos eléctricos se han propuesto como una de las alternativas para disminuir el elevado consumo de gasolina y diésel por el sector transporte. Incluso, hay países europeos que han impulsado políticas para prohibir en el mediano plazo el uso de vehículos que utilizan gasolina y diésel. Los autos eléctricos requieren de la energía de la red eléctrica para realizar la carga de sus baterías, pero a partir de desarrollos como las redes y los cargadores inteligentes de baterías, es posible que los autos no sólo se carguen en periodos de alta oferta de energía, sino que a su vez puedan suministrar potencia firme a la red eléctrica en caso de ser necesario, esto debido a la bidireccional del flujo de energía que permiten las redes inteligentes. Se ha estimado que cada auto eléctrico puede almacenar una cantidad de alrededor de 9 kWh y 53 kWh y proporcionar una potencia de 2 a 3 kW (Mackay, 2009), lo que a partir de grandes cantidades de autos conectados al mismo tiempo permitiría una disponibilidad importante de potencia. Sin embargo, existen serias dudas sobre la viabilidad de esta estrategia, pues aún no se conocen con certeza los volúmenes reales de litio disponible en la Tierra (requerido por las baterías de los vehículos eléctricos), y su capacidad para proveer de baterías a todos los vehículos que circularán en el futuro. Esto además implica altos costos de la tecnología, así como impactos socioeconómicos y ambientales de la minería, ya que, paradójicamente, se requiere de importantes cantidades de energía para poder extraer el litio, de manera que un pico en la producción de combustibles (como el pico del petróleo) puede afectar las actividades de minería y, en última instancia, la disponibilidad de litio. De esta forma, este tipo de opciones requieren ser estudiadas con más detalle, sobre todo para países en desarrollo como México.

Algo similar ocurre con la energía solar y eólica debido a que estas tecnologías requieren de combustibles fósiles en toda su cadena de producción (pasando por la

minería, manufactura, transporte, instalación y reemplazo). En el caso de las celdas fotovoltaicas de películas delgadas (que se ha visto como una alternativa prometedora en comparación con las celdas de silicio) algunas hacen uso de materiales como galio e indio, los cuales no son abundantes en la Tierra (Sverdrup *et al.*, 2015), de manera que estas alternativas también requieren estudiarse con mayor cuidado.

Otro reto importante para lograr un sistema eléctrico basado en fuentes renovables son los costos de inversión. Estos costos no sólo se limitan a la instalación de nuevos paneles fotovoltaicos, aerogeneradores o plantas de biomasa, también son necesarias inversiones en el rediseño de la red eléctrica, en almacenamiento de energía y en capacidad de generación redundante (Heinberg y Fridley, 2016). En este sentido, los doctores Jacobson y Delucchi (2009) estimaron en 100 millones de millones de dólares las inversiones para convertir el sistema energético en uno basado en fuentes renovables, es decir, se requerirían 5 millones de millones de dólares al año durante 20 años (lo que significaría aumentar las inversiones actuales en fuentes renovable por un factor de 10 veces (Heinberg y Fridley, 2016).

En México existen dos escenarios de alta penetración de fuentes renovables para el sector eléctrico, en donde se estiman inversiones de alrededor de 25,000 a 26,000 millones de dólares en 30 años (Johnson *et al.*, 2009; Islas *et al.*, 2015). Vale señalar que estas inversiones no consideran un suministro de energía eléctrica basado solamente en fuentes renovables (alrededor de un 40% de la energía).

Todas las acciones anteriores deben considerarse para poder transitar a un sistema eléctrico basado en fuentes renovables.

PARA SABER MÁS

1. Indicadores de eficiencia energética en México. 5 sectores, 5 retos https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/85305/Bibliograf_a_6.pdf
2. Energy Efficiency Indicators (IEA): <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/energy-efficiency-indicators>
3. Diagnóstico del desarrollo de biorrefinerías en México: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382010000300004
4. Cogenera México: <http://www.cogeneramexico.org.mx>

5. ¿Cómo leer el recibo de luz de CFE?: <https://energiahoy.com/2020/06/12/como-leer-el-recibo-de-luz-de-cfe/>
 6. Tarifas Eléctricas: costos y retos para la eficiencia energética en México: <http://www.iluminet.com/tarifas-electricas-costos-y-retos-para-la-eficiencia-energetica-en-mexico/>
-

PREGUNTAS

1. ¿Estás de acuerdo en que la energía nuclear puede considerarse como una forma de energía limpia? ¿Por qué?
 2. ¿Habrá impactos ambientales negativos a partir de un uso mayoritario de energías fósiles para la generación de electricidad en México?
 3. ¿Cuáles son las posibles implicaciones para la seguridad energética de México el seguir con la prospectiva oficial y que la tecnología de ciclo combinado (que emplea gas LP) aporte el 35% de la capacidad adicional de generación al 2030?
 4. ¿Cuáles son las principales tecnologías para la generación eléctrica?
 5. ¿Cuáles son los principales impactos ambientales de la generación eléctrica?
 6. ¿Cuáles son las nuevas tendencias en cuanto a los sistemas eléctricos?
-

PROBLEMAS

1. Si el consumo total de energía en el sector industrial para el año 2017 fue de 1,877 PJ ¿cuánto CO_{2e} se emitió ese año por uso de combustible fósil? ¿Cuánto se dejaría de emitir si toda la electricidad usada para este sector fuera producida con fuentes renovables?

2. Un cargador de celular consume 0.5 W cuando está conectado pero sin uso. Una PC consume 55 W cuando está encendida pero inactiva; a) calcula las emisiones anuales de ambos dispositivos si el cargador se deja conectado 290 días al año y la PC se mantiene encendida, pero sin uso durante 2,920 horas (en un año). Considera que las emisiones de la electricidad de la red son de 0.498 KgCO_{2e}. b) ¿Cuál sería la mitigación por desconectar estos dispositivos cuando no se están utilizando (considera los tiempos del inciso a)? Problema tomado de la obra: *Sustainable Energy without the hot air*, de David JC MacKay. <https://www.withouthotair.com/>
3. Un Xbox consume 160 W.
- ¿Cuál sería el consumo energético por jugar dos horas?
 - Supongamos que juegas un promedio de dos días por semana (dos horas cada día), ¿cuál sería el consumo de energía por jugar el Xbox en un año?
 - Compara el consumo del inciso b) con el consumo anual per cápita en México (2,057 kWh/año), ¿qué porcentaje representa?
4. Supón que en una casa se consumen 7.17 kWh/día de energía eléctrica: a) calcula el número de paneles fotovoltaicos para satisfacer la demanda de energía; b) calcula el costo del sistema en pesos mexicanos si el precio del Watt pico (Wp) es de 0.87 dólares (sin incluir impuestos y con un tipo de cambio de 20 pesos por dólar); c) ¿Cuál es la mitigación diaria de gases de efecto invernadero? si el SEN tiene emisiones de 498 gCO_{2e}/kWh. Para realizar los cálculos considera una potencia pico de 140W, una cantidad de 5 horas solares pico (HSP), una eficiencia del inversor de 90% y un 10% de pérdidas en cables y conexiones.

Recuerda que:

$$E_{real} = \frac{\text{Consumo diario}}{\eta_{inversor}}$$

$$\text{No. módulos} = \frac{E_{real}}{Wp * HSP * (1 - P)}$$

Donde:

W_p = Potencia pico.

HSP = Horas Solares Pico.

P = Pérdidas en los cables y conexiones.

$$\text{Costo sistema} = W_p * \text{No. módulos} * \text{presio del } W_p$$

5.4. BIBLIOGRAFÍA

- AUBRECHT, G. J. 2006. *Energy: Physical, environmental, and social impact*. (3a Edición). Pearson/ Addison-Wesley. San Francisco.
- BANERJEE, R. (coord.), Y. CONG, D. GIELEN, G. JANNUZZI, F. MARÉCHAL, A. T. MCKANE, M. A. ROSEN, D. van Es, y E. WORRELL. 2012. Energy End Use: Industry. En *Global Energy Assessment. Toward a Sustainable Future*. Cambridge University Press / International Institute for Applied Systems Analysis. Cambridge-New York-Laxenburg.
- CANCINO-SOLÓRZANO, Y., A. VILICANA-ORTIZ, E. J. GUTIÉRREZ-TRASHORRAS, y J. XIBERTA-BERNAT. 2010. Electricity sector in México: Current status. Contribution of renewable energy sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14: 454-461.
- CFE (Comisión Federal de Electricidad). 2015. *COPAR de Generación*. Edición 35. Comisión Federal de Electricidad. México.
- CONUEE/ CRE/ GTZ (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía / Comisión Reguladora de Energía / Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit). 2009. *Estudio sobre Cogeneración en el Sector Industrial en México*. México.
- CONUEE / GIZ. 2012. *Guía Práctica de Trámites y Permisos para Proyectos de Cogeneración de Energía Eléctrica en México*. Conuee/ CRE/ GTZ. México.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2014. Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2014-2018. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5342503&fecha=28/04/2014
- EDWARDS, D. W. 2009. *Energy trading and investing: Trading, risk management and structuring deals in the energy market*. McGraw Hill Professional. New York.
- GARCÍA CASTRO, B., E. SALINAS CALLEJAS, L. VELÁZQUEZ GARCÍA, Z. CARRANCO GALLARDO, y A. GODÍNEZ ENCISO. 2009. Lo Cotidiano del sector industrial en México: 25 años de cambio estructural. *El Cotidiano*, 156:77-107.

- HEINBERG, R., y D. FRIDLEY. 2016. *Our Renewable Future: Laying the Path for One Hundred Percent Clean Energy*. Island Press. Washington.
- ILCE (Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa). 2009. La industria en México. Biblioteca digital. http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/telesec/curso2/htmlb/sec_87.html
- ISLAS, J., F. MANZINI, P. MACÍAS, y G. GRANDE. 2015. *Hacia un Sistema Energético Mexicano Bajo en Carbono*. México: Reflexio Ediciones.
- JACOBSON, M. Z., y M. A. DELUCCHI. 2009. A Plan to Power 100 Percent of the Planet with Renewables. *Here's how-Scientific American*. 26, octubre.
- JOHNSON, T., C. ALATORRE, Z. ROMO, y F. LIU. 2009. *México: estudio sobre la disminución de emisiones de carbono*. Banco Mundial / Mayol Ediciones. Colombia.
- KLIMSTRA, J., y M. HOTAKAINEN. 2011. *Smart power generation*. Avain Publishers. Helsinki.
- LOVINS, A. B., y E. K. DATTA. 2011. *Rocky Mountain Institute. Reinventing Fire: bold business solutions for the new energy era*. Chelsea Green. White River Junction.
- MACKEY, D. J. C. 2009. *Sustainable energy without the hot air*. UIT. Cambridge.
- PEAKE, S. 2018. *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*. 4a edición. Oxford University Press. Oxford.
- PEDRAZA, J. M. 2015. *Electrical energy generation in Europe*. Springer International. London.
- ROSEN, M., y C. A. BULUCEA. 2009. Using Exergy to Understand and Improve the Efficiency of Electrical Power Technologies. *Entropy*, 11: 820-835.
- ROSILLO-CALLE, F., P. DEGROOT, S. L. HEMSTOCK, y J. WOODS (coords.). 2007. *The Biomass Assessment Handbook*. EARTHSCAN. London.
- SEN, S., S. SENGUPTA, y A. CHAKRABARTI. 2014. *Electricity Pricing: Regulated, Deregulated and Smart Grid Systems*. CRC Press. Boca Raton.
- SENER (Secretaría de Energía). 2011. *Indicadores de eficiencia energética en México: 5 sectores, 5 retos*. http://www.energia.gob.mx/taller/res/1858/IEE_Mexico.pdf
- SENER (Secretaría de Energía). 2013. *Balance Nacional de Energía 2012*. Sener, México.
- SENER (Secretaría de Energía). 2014. *Balance Nacional de Energía 2013*. Sener, México.
- SENER (Secretaría de Energía). 2015. *Balance Nacional de Energía 2014*. Sener, México.
- SENER (Secretaría de Energía). 2016. *Prospectiva del Sector Eléctrico 2016-2030*. Sener, México.
- SHEINBAUM-PARDO, C., S. MORA-PÉREZ, y G. ROBLES-MORALES. 2012. Decomposition of energy consumption and CO₂ emissions in Mexican manufacturing industries: Trends between 1990 and 2008. *Infona* 16, 57-67.

SVERDRUP, H., K. VALA RAGNARSDOTTIR, y D. KOCA. 2015. An Assessment of Metal Supply Sustainability as an Input to Policy: Security of Supply Extraction Rates, Stocks-in-Use, Recycling, and Risk of Scarcity. *Journal of Cleaner Production*. 140 (1):359-372 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.085>.

Capítulo 6

El sistema alimentario

QUETZALCÓATL OROZCO-RAMÍREZ

MARTA ASTIER

OMAR MASERA

6.1. INTRODUCCIÓN

¿Por qué estudiar el sistema alimentario en un libro sobre energía?

En este capítulo trataremos el sistema alimentario, veremos qué hace diferente el uso de energía en la producción de alimentos comparado con otros sectores, así como cuáles son las principales fuentes de energía, tecnologías y usos finales para diferentes tipos de sistemas agrícolas y para otras etapas de la producción de alimentos como el procesamiento, almacenamiento y el transporte. También estudiaremos de qué formas se analiza el uso de la energía en el sistema alimentario. Los conceptos útiles para estos análisis, tales como energía directa e indirecta; de “eficiencia”, como relación de salidas/entradas, que es distinto de la eficiencia en sentido estricto; contenidos energéticos de los insumos en la producción de alimentos y de los alimentos propiamente. Haremos una revisión de las tendencias históricas en el consumo de energía en la agricultura con ejemplos de México y algunos a nivel internacional. Debido a las particularidades del uso de energía en la producción de alimentos, se han propuesto otras maneras para su análisis más allá de la eficiencia de entradas o salidas, además de agrupar las diferentes etapas bajo el concepto integrador de sistema alimentario. La sección se cierra con una discusión y recomendaciones concretas para hacer el sistema alimentario más eficiente y sustentable.

6.2. IMPORTANCIA DEL SECTOR

En la producción de alimentos es donde se hace el uso más complejo de la energía comparado con otros sectores del sistema energético. En el balance de energía

de un país no aparece el sector alimentario total, pero sí se incluye el sector agropecuario, el cual en México sólo representó el 3.1% del consumo final total en 2014 (Sener). Sin embargo, la producción de alimentos es un sector complejo que participa transversalmente en todos los demás sectores: industrial (producción de insumo agrícolas y procesamiento de alimentos), transporte, residencial y comercial (preparación y almacenamiento de alimentos). Algunos investigadores han estimado que, en el sector alimentario, conjuntado el uso final de energía de todos los demás sectores se usa alrededor del 14% al 20% de toda la energía consumida en EU, algunos otros dicen que puede ser más. El sistema alimentario global es responsable de entre 44% y 57% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

A diferencia de otros ámbitos económicos como el transporte o la generación de energía eléctrica en donde se utiliza generalmente uno o pocos tipos de insumos energéticos, en la producción de alimentos, los insumos contienen y representan energía que puede ser directa o indirecta. Los insumos de energía directa son, por ejemplo, la luz del Sol, el trabajo humano para cuidar y cultivar las plantas, el diésel que mueve los tractores o la electricidad que mueve las bombas para extraer el agua de riego. La energía indirecta está en los fertilizantes, en los plaguicidas, en las semillas, o en los empaques de las cosechas producidos con energía. Algunos alimentos, después de ser cosechados, entran en una larga cadena de procesamiento, almacenamiento y distribución. En estas etapas hay un gran consumo de energía eléctrica, gas, y combustibles para el transporte, además de un cruce con otros sectores productivos, por lo que su análisis se vuelve muy complejo.

La energía del sol es la fuente primaria de energía del sistema alimentario, por esta razón, el sistema alimentario es un caso especial comparado con otros sectores de la sociedad. La producción de alimentos en esencia es una actividad productora de energía. Las plantas capturan la energía del sol y la transforman en energía química (azúcares principalmente), la cual usamos directamente al consumir esos alimentos o se usa como insumo para producir otros alimentos como la carne y la leche. Hay que aclarar que cada tipo de planta que usamos como cultivo (ej. maíz, trigo, espárragos, jitomates) tiene mayor o menor eficiencia en capturar y transformar la energía del sol en azúcares. En general la mayoría de los cultivos captan entre el 1% y el 2% de la energía solar que les llega; la caña de azúcar es la campeona al capturar hasta el 8% en condiciones ideales. La ecología nos dice que cada vez que la energía pasa de un nivel trófico a otro en el ecosistema, una parte de esa energía

se pierde. En términos generales, al pasar de un nivel trófico a otro, por ejemplo, de las plantas a los herbívoros, se pierde un 90% de la energía (Turk y Turk, 1988) (figura 6.1).

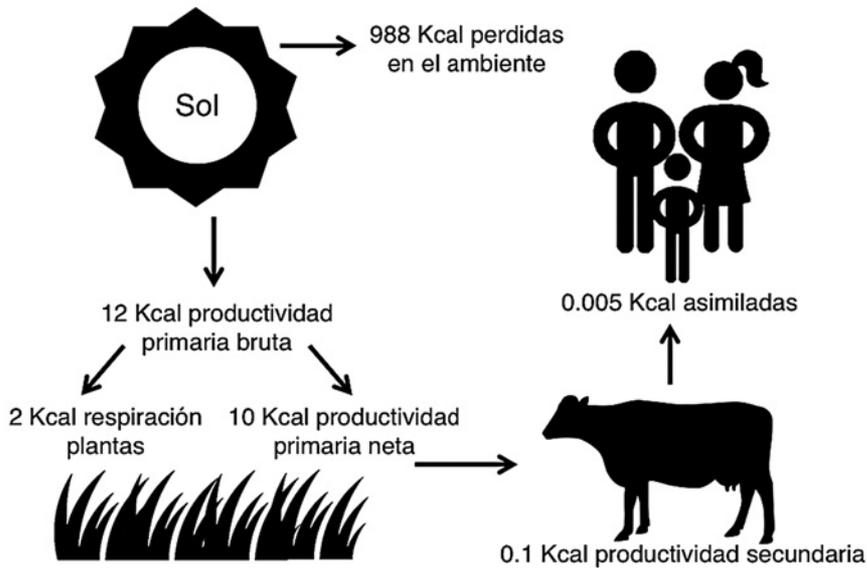


Figura 6.1. Flujo de energía entre los niveles tróficos.

Fuente: a partir de Turk y Turk, 1988.

El concepto de eficiencia energética en la producción de alimentos, y en general en el sistema alimentario, es diferente al concepto que se usa para evaluar la eficiencia de uso final. Esto es así por dos razones: la primera es que la entrada de energía solar al sistema no se toma en cuenta cuando se hace la evaluación de uso de energía en la producción de alimentos; la segunda es la gran diversidad de tipos de insumos, los cuales tienen diferentes calidades de energía, la cual se hace equivalente a través de un ejercicio aritmético. Por lo tanto, la eficiencia a la que nos estamos refiriendo en el sistema alimentario es la que puede ser calculada y evaluada en formas diversas. Más adelante veremos las principales metodologías para hacerlo.

Debido a la fisiología de cada una de las especies cultivadas, su eficiencia es diferente, por ejemplo, el maíz es más eficiente que el trigo en transformar la energía del sol. También, dependiendo de la parte que se aprovecha de la planta, la eficiencia es distinta, por ejemplo, consumir las hojas de una lechuga es más eficiente que consumir frutos como los arándanos. Sin embargo, la mayor diferencia en el uso de la energía, y por lo tanto en la eficiencia, se da debido a la tecnología que se utiliza en la agricultura. Lo que llamamos agricultura moderna o intensiva es un tipo de agricultura que utiliza insumos industriales que requieren de mucha energía para su producción, estos son los fertilizantes, plaguicidas, maquinaria agrícola, semillas mejoradas y plásticos, principalmente. Al comparar sistemas de producción intensivo con sistemas de producción campesinos, nos damos cuenta de que el uso de energía en los últimos es mucho menor y que por cada unidad de energía invertida por el hombre se obtiene más de una unidad de energía en el producto cosechado. Esto se debe a que se está capturando energía del sol. En cambio, en la mayoría de los sistemas agrícolas intensivos, por cada unidad de energía que invierte el hombre se cosecha menos de una unidad de energía en el producto. En general, a medida que los sistemas agrícolas hacen uso de más tecnología, su eficiencia energética baja. Los peores son los invernaderos instalados en áreas muy frías. Explicaremos más sobre esto en la siguiente sección.

6.3. ESTADO ACTUAL

La invención de la agricultura hace unos diez mil años dio origen a la civilización. La producción de alimentos excedentes, además de posibilitar la creación de sociedades estructuradas con división de clases, modificó para siempre la forma en que los humanos se apropiaron de la productividad primaria neta de los ecosistemas. La agricultura permitió aprovechar la energía solar, cosechar el Sol a través del trabajo humano sembrando y cuidando plantas que sirven de alimento. La eficiencia con que los campos agrícolas aprovechaban la energía del sol dependía de la tecnología de cultivo. A medida que los agricultores aprendían a labrar la tierra, seleccionar las mejores semillas y a darle las mejores condiciones a las plantas, la eficiencia aumentó, pues se incrementó el rendimiento de las cosechas.

El desarrollo de la agricultura ha tenido diferentes etapas que se diferencian a partir de las tecnologías que se utilizan, a su vez, estas tecnologías se pueden diferenciar principalmente por el tipo de energía que utilizan. Por ejemplo, la agricultura basada en trabajo humano que se practicaba en Mesoamérica precolombina, la etapa de la agricultura con tracción animal y recientemente la agricultura con tracción mecánica e insumos industriales. En el siglo pasado fue cuando el rendimiento de los cultivos a nivel mundial se disparó (figura 6.2). El crecimiento de la agricultura, a través de abrir más tierras al cultivo y del incremento de los rendimientos, ha permitido el espectacular aumento de la población. Este importante aumento de los rendimientos —el cual ha sido más notorio en algunos cultivos como maíz, trigo, arroz y papas— se debió al incremento del uso de la energía en los campos agrícolas. A esta etapa de crecimiento agrícola se la conoce como la Revolución verde. La modernización de la agricultura durante la Revolución verde consistió en utilizar semillas mejoradas genéticamente e insumos industriales, fertilizantes y plaguicidas principalmente. También se incrementó el uso de maquinaria agrícola como tractores, cosechadores y bombas para riego que utilizan combustibles derivados del petróleo.

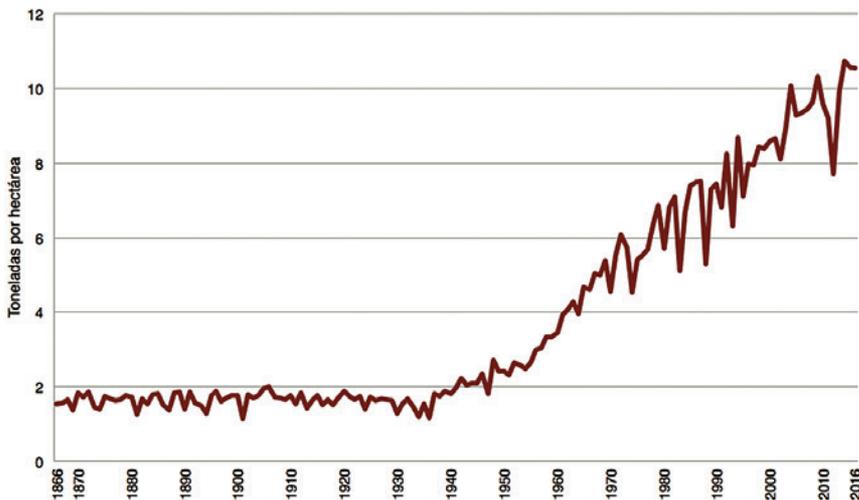


Figura 6.2. Rendimiento promedio de maíz en Estados Unidos.

Fuente: elaboración propia datos USDA 2016.

A medida que la agricultura se intensificó, el uso de energía de fuentes industriales se incrementó fuertemente, al mismo tiempo que se desplazó al trabajo humano y animal. Como consecuencia, los rendimientos por unidad de superficie aumentaron, pero el uso de energía o el costo energético también se incrementaron y en mayor proporción a los rendimientos. Después de la Revolución verde, para algunos cultivos la producción de alimentos se convirtió en un sumidero de energía y la agricultura entró en una gran contradicción, pues dejó de ser una actividad productora de energía neta (captura de la energía del sol) para convertirse en una actividad que consume energía. Los incrementos en el rendimiento no son directamente proporcionales a los insumos, después de cierto punto una unidad de insumo no incrementa el rendimiento en la misma magnitud que lo hace una unidad de insumo a un nivel más bajo de producción.

El balance energético de entradas y salidas es negativo para muchos de los alimentos que se producen en sistemas que usan mucha tecnología. Esta situación está empeorando porque para mantener los rendimientos de los cultivos hay que incrementar los insumos, sobre todo fertilizantes y plaguicidas, ya que la agricultura moderna ha modificado los agroecosistemas y no es sustentable. Aproximadamente la mitad de la tierra cultivable a nivel mundial se usa para pastizales manejados o agricultura intensiva, y lo peor es que el modelo agrícola actual más promovido por las políticas públicas es el de la agricultura intensiva basada en el monocultivo con alto uso de insumos industriales (ver cuadro 6.1).

CUADRO 6.1.
COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA ENERGÍA
EN DIFERENTES SISTEMAS PRODUCTIVOS DE MAÍZ

SISTEMA	ENERGÍA INSUMOS (Mcal/ha)	TRABAJO (h)	RENDIMIENTOS (kg/ha)	EFICIENCIA (INSUMOS/PRODUCTOS)	PRODUCTIVIDAD TRABAJO (kg/h)
Coa México	677	1,144	1,944	10.1	1.7
Tiro México	770	383	941	4.3	2.5
Tiro EU	7,219	120	7000	3.4	58.3

Tractor EU	6,958-7,845	10-12	6,500-7,000	3.3-3.5	583-650
Labranza cero	7,172	7	6,500	3.6	928.6
Bajos insumos	3,962	12	6500	3.6	928.6

Elaborado a partir de Pimentel, 1980, y Pimentel y Pimentel 1996.

6.4. MIDIENDO EL USO DE ENERGÍA EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS

Ya dijimos que los análisis energéticos en la producción de alimentos no hacen una evaluación de la eficiencia propiamente dicha en términos de las leyes termodinámicas. A lo que nos referimos con eficiencia es a la relación (cociente) entre las salidas y las entradas de energía en el proceso de producción de alimentos.

$$Efic = \frac{Es}{Ee}$$

Donde:

Efic = Eficiencia en la producción de alimentos

Es = Energía de salida, energía contenida en los alimentos producidos

Ee = Energía de entrada, suma de la energía directa e indirecta de los insumos utilizados.

Se han desarrollado varias propuestas para hacer el análisis del uso de la energía en la agricultura. Los primeros trabajos, más conocidos, se desarrollaron hace más de cuarenta años por David Pimentel, quien en 1980 publicó un gran volumen sobre el uso de la energía en la agricultura, en donde demostraba que la modernización había hecho a la agricultura una actividad dependiente de energía en lugar de ser productora de esta. En la década de los noventa a estos análisis se les agregó el componente de emisiones de gases de efecto invernadero porque el consumo de energía está ligado directamente con la emisión de contaminantes.

El enfoque más general que se usa en estos análisis es sumar toda la energía directa que se utiliza en un cultivo determinado: el trabajo humano, el trabajo animal, el diésel, la gasolina y la electricidad. Se usa el contenido energético de cada uno de estos tipos de energía (cuadro 6.2). A la energía directa se suma la energía indirecta, la cual es utilizada para producir los insumos, como la maquinaria, los fertilizantes, los plaguicidas, etc. Como resultado tenemos el total de energía invertida en ese cultivo. La cosecha total tiene un equivalente energético, si este equivalente se divide entre el total de energía invertida, obtendremos la eficiencia de ese producto (cuadro 6.3).

CUADRO 6.2
EQUIVALENTE ENERGÉTICO DE VARIOS INSUMOS AGRÍCOLAS

INSUMO/ ACTIVIDAD	UNIDADES	CONTENIDO ENERGÉTICO (MJ)	REFERENCIA
Trabajo Humano	h	1	Goldemberg, 1996
Barbecho	ha	1,854	Hernández y Luna, 1999
Cruza o rastra	ha	490	Hernández y Luna, 1999
Siembra	ha	849	Hernández y Luna, 1999
Escarda	ha	373	Hernández y Luna, 1999
Aplicación mecánica de herbicidas	ha	363	Hernández y Luna, 1999
Encalado	ha	363	Hernández y Luna, 1999 y Dalgaard <i>et al.</i> , 2001
Fertilización mecánica	ha	373	Hernández y Luna, 1999 y Dalgaard <i>et al.</i> , 2001
Cosecha mecánica	ha	1,310	Hernández y Luna, 1999
Escarda tracción animal	ha	350	Masera <i>et al.</i> , 1987
Cal	kg	0.03	Dalgaard <i>et al.</i> , 2001

Urea	kg	23	Dalgaard <i>et al.</i> , 2001
Amoniacoanhidro	kg	43	Dalgaard <i>et al.</i> , 2001
11:52:00	kg	12	Dalgaard <i>et al.</i> , 2001
DAP (18-46-00)	kg	15	Dalgaard <i>et al.</i> , 2001
MAP (00-48-17)	kg	7	Dalgaard <i>et al.</i> , 2001
Sulfato de amonio	kg	10	Dalgaard <i>et al.</i> , 2001
Triple 17	kg	12	Dalgaard <i>et al.</i> , 2001
K Mag	kg	2	Dalgaard <i>et al.</i> , 2001
Nitrato de amonio	kg	17	Dalgaard <i>et al.</i> , 2001
Cloruro de potasio	kg	4	Dalgaard <i>et al.</i> , 2001
Potasio líquido	kg	5	Dalgaard <i>et al.</i> , 2001
Super fosfato de calcio triple	kg	5	Dalgaard <i>et al.</i> , 2001
Herbicidas	kg	40	Dalgaard <i>et al.</i> , 2001
Insecticidas	kg	40	Dalgaard <i>et al.</i> , 2001
Semilla	kg	104	Pimentel y Pimentel, 1996
Riego	cm ²	21	Pimentel, 1980
Maíz	kg	15	Pimentel y Pimentel, 1996
Transporte mecánico	ton/km ³	3	Pimentel, 1980
Aplicación aérea ¹	ha	13	Pimentel, 1980

¹ Estimado a partir de la capacidad de carga, la carga media y la distancia de vuelo para aplicar insecticidas en una hectárea.

² Lámina de riego aplicada en centímetros.

³ Las unidades son MJ por tonelada transportada por kilómetro.

CUADRO 6.3
EFICIENCIA DEL USO DE ENERGÍA PARA EL CULTIVO
DE MAÍZ EN UNA HECTÁREA EN VARIAS REGIONES DE MÉXICO

ACTIVIDAD O INSUMO	NOROESTE	EL BAJÍO	CIÉNEGA DE CHAPALA
Preparación de suelos			
Labranza	3,697	2,834	490
Siembra			
Semilla	3,105	2,070	2,588
Siembra	1,222	849	849
Fertilización			
Fertilizantes	16,859	10,875	12,068
Flete y maniobras	3	2	4
Aplicación manual	8	17	33
Aplicación mecánica			373
Labores culturales:			
Escarda	747	747	
Deshierbe	8	33	
Vigilante	25		
Riego y drenaje:			
Agua	1,058		
Riegos	46	25	
Labores de preparación	21	17	

Control de plagas			
Asistencia técnica	8		4
Insecticidas	50	80	850
Aplicación mec/manual	363	33	8
Control de arvenses			
Herbicidas		186	220
Aplicación manual		33	4
Aplicación mecánica			363
Cosecha			
Trilla	1,473	1,310	1,310
Flete	35	22	26
Entradas de energía (MJ/ha)	28,727	18,733	19,190
Rendimiento (kg/ha)	10,000	6,200	7,400
Uso de energía (MJ/kg)	2.9	3.0	2.6
Eficiencia (salidas/entradas)	5.1	4.9	5.7
intensidad del trabajo (h/kg)	0.013	0.027	0.008

A partir de Mendoza *et al.*, 2003; Ramírez, 2001 y Vázquez, 2000.

La mayoría de los estudios hacen una comparación entre diferentes sistemas de producción, por ejemplo, entre los convencionales (tipo Revolución verde) y los campesinos, o los orgánicos. También se han comparado diferentes sistemas de labranza, como la labranza convencional, de conservación y labranza cero. El objetivo de estos estudios ha sido identificar los sistemas más eficientes y por tanto más sustentables.

Para medir la eficiencia energética en la producción de alimentos se han usado varios indicadores, como el propuesto por Pimentel (1980), el cual es el cociente de

las salidas en kcal entre las entradas. Él no considera al trabajo humano como un ingreso energético, pero utiliza el cociente de la energía producida entre las horas de labor requeridas. Fluck (1980), por su parte, hace una revisión de los indicadores más usados en el análisis energético, critica el análisis de entradas y salidas y propone la productividad energética como unidad alternativa. Esta mide la cantidad de producto que se obtiene por unidad de energía aplicada, medida en kg/MJ. Más recientemente se han usado otros indicadores para comparar diferentes sistemas de producción, como la cantidad de energía utilizada por hectárea y por kg de producto, utilizando las unidades MJ/ha y MJ/kg (Bailey *et al.*, 2003). También se han utilizado algunos indicadores más específicos, como el uso de energía fósil, porque los otros tipos de energía son renovables.

Gliessman (2000) distingue y clasifica los tipos de entradas de energía en la agricultura de la siguiente manera: a la energía de la radiación solar la llama energía ecológica; en contraposición, a la energía derivada de fuentes humanas la denomina energía cultural. A su vez, la energía cultural se puede dividir en energía biológica y energía industrial. Las entradas biológicas provienen de organismos, como el trabajo humano directo, los animales de trabajo y los estiércoles. Las entradas industriales provienen de los combustibles fósiles, de fuentes atómicas, geotérmicas o hídricas. También es importante distinguir que, aunque se hable de entradas de energía en general, hay algunas que provienen del interior del mismo agroecosistema, por lo que no son entradas externas al sistema propiamente, por ejemplo, la energía aportada por los animales de tiro que se alimentan de la misma cosecha de la parcela.

Debido a que en los análisis energéticos se comparan tipos diferentes de energía que no son equivalentes porque se encuentran en otro nivel jerárquico, Odum (1988) propuso el término emergía. El concepto de emergía es: la energía de un tipo que se requiere transformar para generar un flujo energético o un almacén de energía. Por lo general se utiliza a la energía solar como unidad común. Por ejemplo, se puede calcular la emergía contenida en un litro de diésel de acuerdo con la energía solar necesaria para producirlo, al igual que para un kilogramo de madera, o para la fuerza contenida en la marea. Se afirma que el uso de la emergía tiene la ventaja de homogeneizar las unidades energéticas a una misma base e intenta proveer un marco común para tratar con los sistemas ecológicos y económicos porque asigna un valor tanto a los combustibles y productos comerciales como a los recursos

renovables que no se contabilizan en la producción, como el viento o la lluvia. En realidad, esta propuesta se ha utilizado muy poco.

La fuente de energía más importante para el sistema alimentario es la luz solar, la cual no se cuantifica porque se considera un recurso ilimitado, es decir, su flujo es mucho mayor a la energía que invierte el hombre. Si se cuantificara, las comparaciones entre sistemas no serían efectivas. Por este motivo, la eficiencia resultante de los sistemas agrícolas generalmente es mayor que uno. En términos generales se puede decir que el análisis energético del sistema alimentario mide la eficiencia con la que se captura la energía solar por las plantas y se transforma en alimento para el hombre en las siguientes etapas del sistema del sistema alimentario.

Un análisis rápido nos indica que los insumos que representan la mayor cantidad de energía son los insumos industriales, en particular los fertilizantes, los plaguicidas y la maquinaria (incluyendo el diésel) (ver cuadro 6.3). Un análisis global del uso de energía en una granja promedio en Estados Unidos reporta que el fertilizante y los combustibles para mover las máquinas representan el 63% del consumo total de energía de la granja (figura 6.3).

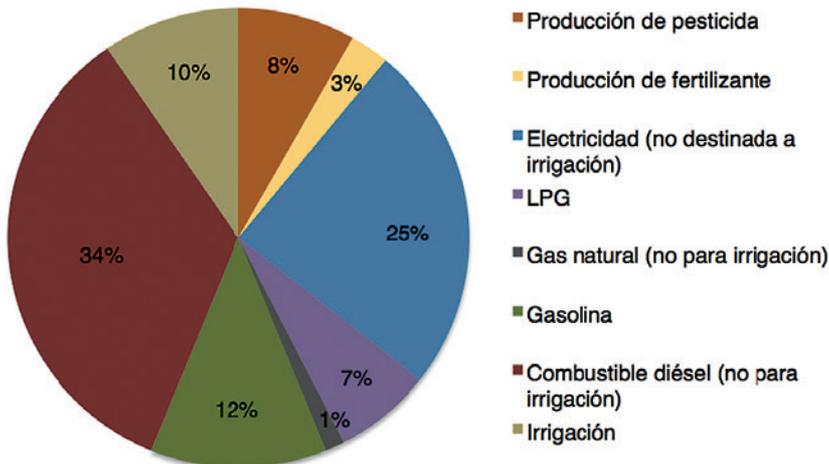


figura 6.3 Uso de energía en una granja promedio en Estados Unidos.

Fuente: Heller y Keoleian, 2000.

6.5. EL ANÁLISIS DEL SISTEMA ALIMENTARIO

La producción agrícola es sólo el primer paso dentro del sistema que provee de alimentos a la población. Un análisis integrado de la producción de alimentos debe incluir al sistema alimentario en su conjunto, el cual comprende: (1) la producción agrícola (2) la industrialización o transformación (3) la distribución y (4) el consumo de los alimentos (figura 6.4). En la mayoría de los estudios sobre el consumo de energía en la producción de alimentos se ha analizado sólo la primera etapa, la agricultura. De forma genérica se denomina agricultura, pero también incluye a los sistemas ganaderos incluso en piscícolas. El procesamiento y empaclado tiene que ver con todas las actividades de transformación de las materias primas alimenticias obtenidas en la producción agrícola. La distribución, aunque esquemáticamente se presenta después del procesamiento, enlaza también la etapa de producción con la de procesamiento, pues incluye el transporte de las materias primas hacia los centros de transformación y de los centros de transformación hasta el consumidor final. La última etapa, la de consumo, representa todas las actividades que se realizan en la casa para consumir los alimentos. Entre estas se incluye la preparación, la cocción y el almacenamiento de los alimentos elaborados. Las actividades de procesamiento, transformación y distribución tienen una gran importancia dentro de la cadena de abasto de alimentos porque permiten modificar las características del alimento para hacerlo comestible y digerible, conservarlo, y hacerlo disponible en tiempo y espacio al consumidor (Masera y Astier 1995; Bauer *et al.*, 1994).

Cada una de las etapas tiene dos denominadores comunes: el uso de energía y la generación de desechos (sólidos y gases). Para entender la producción actual de alimentos debemos analizar cada una de las etapas. La eficiencia total del sistema alimentario se calcula multiplicando las eficiencias parciales.

$$E_{sa} = E_a * E_p * E_d * E_c$$

Donde:

E_{sa} = Eficiencia del sistema alimentario

E_a = Eficiencia en la producción agrícola

E_p = Eficiencia en el procesamiento

E_d = Eficiencia en la distribución

E_c = Eficiencia en el consumo

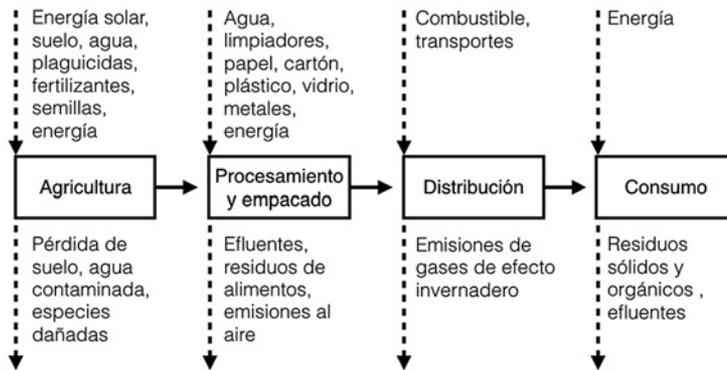


Figura 6.4. Diagrama del sistema alimentario y sus entradas y salidas en cada etapa.

Fuente Orozco-Ramírez, 2007.

En el sistema alimentario de Estados Unidos, el procesamiento, distribución y consumo demandan más de seis veces la energía que se utiliza en la producción agrícola (figura 6.5), la cual consume el 14% de la energía utilizada en el sistema alimentario, mientras que en la casa se utiliza el 30% de la energía. El sistema alimentario actual no es sustentable porque se alimenta de energía no renovable, principalmente del petróleo. En un estudio de la producción de tortillas en la Meseta purhépecha, se encontró que el procesamiento consumió el 89% de toda la energía consumida desde la producción del maíz hasta las tortillas, y esta principalmente se obtuvo de leña (82%) (Orozco-Ramírez, 2007) (figura 6.6).

Los consumos de energía varían de un producto a otro, e incluso entre los mismos productos genéricos hay una gran diferencia en el consumo de energía. Por ejemplo, entre manzanas producidas en Chihuahua y Washington consumidas en Morelia, el uso de energía es mucho mayor para las de Washington, porque estas requieren de más transporte y refrigeración. Así mismo, el empaçado y procesamiento de cada producto tiene un gran efecto en el uso de la energía. Los productos altamente empaçados como las olivas o los mariscos en lata utilizan más energía en el empaque que en toda la cadena de producción, es por eso que los consumidores tenemos un gran papel y un gran poder de decisión para mejorar el impacto ambiental de la producción de alimentos y la sustentabilidad del sistema alimentario en su conjunto.

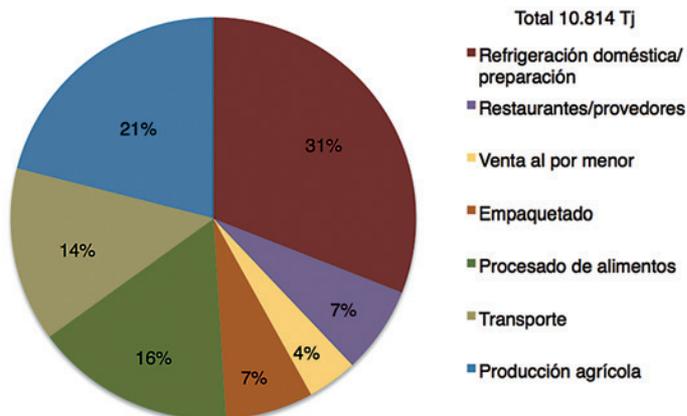


Figura 6.5. Uso de energía en cada etapa del sistema alimentario en Estados Unidos.

Fuente: Heller y Keoleian, 2000.

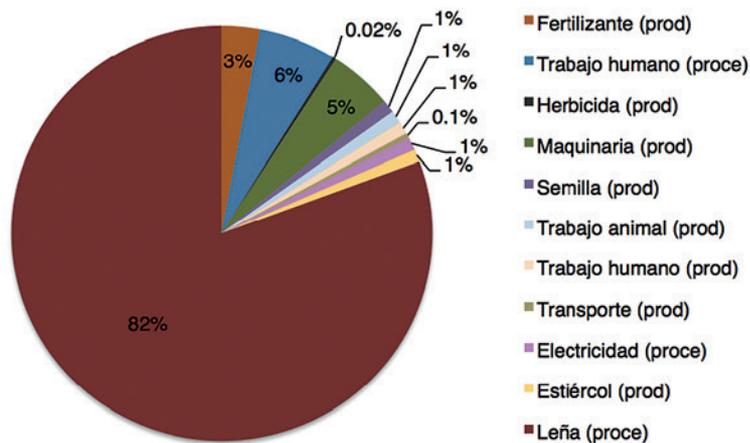


Figura 6.6. Uso de energía en la producción de tortilla tradicional en una comunidad purhépecha.

Fuente: Orozco-Ramírez, 2007.

6.6. ALTERNATIVAS PARA UN SISTEMA ALIMENTARIO SUSTENTABLE

Nuestra dieta y el tipo de alimento que elegimos impacta fuertemente la energía utilizada. Las dietas vegetarianas son mejores desde el punto de vista ambiental porque el consumir vegetales reduce los pasos en la cadena trófica y esto, a su vez, disminuye las pérdidas de energía. Además, la producción y transformación de carne, huevo y leche consume grandes cantidades de energéticos fósiles y emiten una gran cantidad de gases de efecto invernadero.

Como consumidores podemos hacer mucho en favor de un sistema sustentable. Las recomendaciones generales son las siguientes: consumir productos locales que requieren de menos transporte y de preferencia agroecológicos que utilicen pocos insumos industriales; preferir los alimentos no procesados ni empacados, mucho menos los congelados; no consumir comida chatarra, no es nutritiva y tiene empaques muy costosos en términos energéticos.

En cada una de las etapas del sistema alimentario se puede hacer mucho para mejorar la eficiencia energética. En la etapa de producción agrícola se puede reducir el uso de pesticidas y fertilizantes, implementado sistemas agroecológicos que incluyan fertilización orgánica, rotación de cultivos y control biológico. Además, se deben preferir cultivos más eficientes y mejor adaptados al ambiente de cultivo, mejorar la eficiencia del riego y reducir el uso de maquinaria en la labranza de la tierra. En la etapa de procesamiento se deben mejorar los procesos industriales y reducir los empaques o cambiarlos por empaques reciclables y no metálicos, de preferencia retornables. En la etapa de distribución, debería haber un límite en el transporte de alimentos, ya que actualmente no hay restricción más allá del mercado y sus costos. Sin embargo, no es sustentable importar kiwis de Nueva Zelanda por avión para consumirlos como frutas frescas en Morelia, por ejemplo. En la etapa de consumo en casa también hay mucho por hacer, sobre todo en la cocción y refrigeración de alimentos. Hay hábitos muy ineficientes, por ejemplo, usar ollas muy chicas con la flama alrededor de ellas, o almacenar grandes cantidades de comida en el congelador que terminará en la basura porque nunca la consumiremos. El desperdicio de comida debido a las ineficiencias del mercado y la irresponsabilidad de los consumidores finales es quizá el principal problema del sistema alimentario. Se estima que entre el 30% y el 50% de la comida que se produce en el mundo se

desperdicia. Las estimaciones para México rondan el 35%. Esta situación es inadmisibles y pronto se debe hacer algo. Por ejemplo, Francia ha dado los primeros pasos al prohibir legalmente a los supermercados tirar la comida.

CAJA 6.1. LA HUELLA DE ENERGÍA Y CARBONO DE DIETAS URBANAS Y RURALES EN MÉXICO

Las presentes gráficas han sido elaboradas con los datos recabados mediante entrevistas directas a dos familias del medio rural del estado de Michoacán y mediante la información de una familia urbana de la ciudad de Cuernavaca, Morelos, a partir de Menzel y D'Aluisio (2005). Para el cálculo de los gases de efecto invernadero se utilizó la metodología de la huella de carbono y para los cálculos de energía se tuvieron en cuenta las kcal per cápita consumidas por cada unidad familiar, considerando que dos niños consumirían lo que un adulto.

La familia rural 1, de la comunidad de Santa Ana Chapitiro, está compuesta por tres adultos y dos niños. Esta produce el 26% de los alimentos que consume y obtiene otro 10% mediante trueque. La familia rural 2, de la comunidad de Tzurumútaró, está compuesta por dos adultos y tres niños y produce el 5% de los alimentos que consume. La familia urbana normal de la ciudad de Cuernavaca está formada por dos adultos y tres niños. Para la familia urbana hipotética, en su modalidad *light*, se ha presupuesto que no consume dulces ni refrescos embotellados y compra hortalizas de origen orgánico.

En la figura 6.7 se puede apreciar una diferencia substancial entre las familias de origen rural y urbano en cuanto a la fuente y la distribución de la energía ingerida. En el caso de las familias rurales, se puede observar que el pilar básico de la alimentación son los cereales (fundamentalmente pan y tortillas), mientras que en la familia urbana, en sus dos modalidades, estos cereales tienen un peso muy inferior, mientras que los que tienen un mayor peso son los refrescos, los dulces, los productos cárnicos, lácteos y la fruta.

Esto pone en evidencia, por un lado, una mayor capacidad adquisitiva de la familia urbana al sustituir los hidratos de carbono provenientes del maíz por los que vienen de los refrescos y los dulces, además de incorporar más productos de origen animal y de adquirir productos no fundamentales para la canasta básica. En el caso hipotético de la familia urbana *light*, esta no consumiría refrescos embotellados ni dulces de alto contenido energético, y compraría verduras orgánicas. La primera medida está a la mano de todas las economías, mientras que la segunda se encuentra, hoy en día, fuera del alcance de la mayoría de las economías urbanas y rurales.

En la figura 6.8 se observa que las dietas rurales son las que menos emisiones de gases de efecto invernadero generan. Esto se explica por el tipo de dieta, baja en productos de origen animal, basada en alimentos locales y en parte producidos por las unidades familiares estudiadas. En la dieta urbana normal, por tanto, el excesivo consumo de productos de origen animal, así como de otros productos como dulces y bebidas penaliza fuertemente su comportamiento ambiental y puede tener importantes consecuencias para la salud de la familia. En la dieta urbana light se observa cómo el cambio hacia hábitos de consumo más sanos y sustentables tienen un gran impacto en la reducción de emisiones, con una disminución notable de las emisiones de las verduras y una reducción drástica del consumo de bebidas embotelladas azucaradas y dulces.

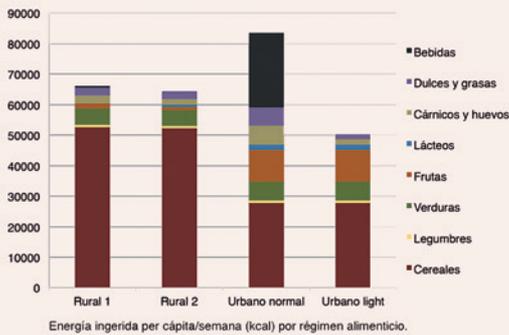


Figura 6.7. Energía ingerida per cápita/semana (kcal) por tipo de alimento en contextos rurales y urbanos.
Fuente: Datos de campo, Menzel y D'Aluisio, 2005.

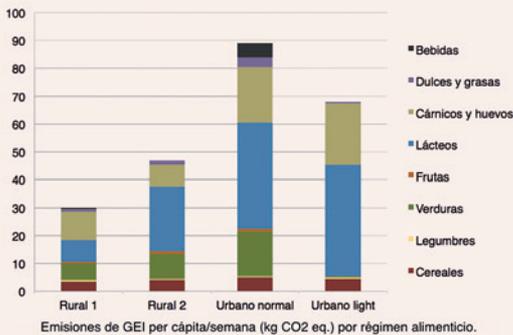


Figura 6.8. Emisiones de GEI per cápita/semana (kg CO2e.) por tipo de alimento según régimen alimenticio.
Fuente: Datos de campo, Menzel y D'Aluisio, 2005.

PREGUNTAS

1. ¿Qué hace diferente el sistema alimentario en comparación con otros sectores productivos en relación con su uso de energía?
 2. ¿Qué particularidades tiene la medición de la eficiencia energética en el sistema alimentario?
 3. ¿Por qué decimos que el sistema alimentario está subsidiado energéticamente?
 4. ¿Cuáles son los insumos en la agricultura que utilizan más energía para producirse?
 5. ¿En qué etapa del sistema alimentario se usa más energía y por qué?
 6. ¿Cuáles son las alternativas para reducir el uso de energía en el sistema alimentario?
-

EJERCICIOS

1. Selecciona cinco productos alimenticios de tu cocina. Enlista los principales insumos de cada producto, localiza las zonas de producción y de procesamiento en cada caso y ordena los productos cualitativamente en función del uso de energía.
2. Busca cinco artículos científicos que hagan un análisis energético en la producción agrícola. Usando la tabla de insumos que presentan para calcular el uso de energía, ordena los insumos por su equivalencia energética. Analiza qué tipo de insumos son los que más energía usaron en su producción.
3. Entrevista al gerente o encargado de un restaurante, fonda o puesto ambulante de comida. Enlista los principales insumos que usa en su negocio, pregunta sobre el costo aproximado de esos insumos por semana o mes. Analiza la relación entre el costo de cada tipo de insumo y la energía que representa cada uno.

4. Entrevista a un agricultor cercano a tu lugar. Pregunta sobre todos los insumos y las cantidades que se utiliza para un determinado cultivo, así como su volumen de cosecha. Pregunta por los costos de los insumos. Transforma esos insumos a sus equivalencias energéticas, calcula las entradas y salidas de energía y la eficiencia del sistema.

PARA SABER MÁS

1. El blog de la colmena <http://blog.lacolmenaquedicesi.es/>
2. De la producción a los residuos, el sistema alimentario <http://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2014/articulos/de-la-produccion-a-los>
3. Energía, sistema alimentario y salud <http://www.nodulo.org/ec/2003/n019p15.htm>
4. Uso de la energía en el sistema alimentario de los Estados Unidos. https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/46375/8144_err94_1_.pdf?v=0
5. Agricultura, energía y cambio climático. <http://www.comunidadism.es/herramientas/agricultura-energia-y-cambio-climatico>

6.7. BIBLIOGRAFÍA

- BAILEY, A. P., W. D. BASFORD, N. PENLINGTON, J. R. PARK, J. D. H. KEATINGE, T. REHMAN, R. B. TRANTER, y C. M. YATES. 2003. A comparison of energy use in conventional and integrated arable farming systems in the UK. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 97: 241-253.
- BAUER, M., I. CHONG, E. MORENO, J. QUINTANILLA, y F. TORRES. 1994. *El agua y la energía en la cadena alimentaria: granos básicos*. Universidad Nacional Autónoma de México-Programa Universitario de Energía-Programa Universitario de Alimentos-Instituto de Investigaciones Económicas. México.

- DALGAARD, T., N. HALBERG, y J. R. PORTER. 2001. A model for fossil energy use in Danish agriculture used to compare organic and conventional farming. *Agriculture, Agroecosystems and Environment*, 87: 51–65.
- FLUCK, R. C. 1980. *Agricultural energetics*. AviPublishing Company. Weasport.
- GLIESSMAN, S. R. 2000. *Agroecology, ecological processes in sustainable agriculture*. Lewis Publishers. USA.
- Goldemberg, J. 1996. *Energy, Environment & development*. Earthscan Publications. UK.
- HELLER, M. C., y G. A. KEOLEIAN. 2000. *Life cycle-based sustainability indicators for assessment of the US food system* (Vol. 4). Center for Sustainable Systems-University of Michigan. Ann Arbor.
- HERNÁNDEZ, C. F., y J. J. LUNA. 1999. Manejo de la energía en los sistemas de producción agrícola en Yuriria, Guanajuato. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- MASERA, O., L. ALMEIDA, J. CERVANTES, G. SHANKAR, L. GARCÍA, J. GARZA, R. JOAQUÍN, C. JUÁREZ, C. MÁRQUEZ, M. MARTÍNEZ, J. NAVIA, A. ORTIZ, R. PÉREZ, y C. SHEINBAUM. 1987. *El patrón de consumo energético y su diferenciación social, estudio de caso en una comunidad rural de México*. Cuadernos sobre prospectiva energética. Número 108. El Colegio de México. México.
- MASERA, O., y M. ASTIER. 1995. *Energía y sistema alimentario en México: aportaciones de la agricultura alternativa*. Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Aplicada A. C. México.
- MENDOZA, R. J. L., C. J. MACÍAS, y E. CORTÉS. 2003. *Tecnología para mejorar la productividad del maíz en el Norte de Sinaloa y su impacto económico*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Folleto técnico N. 21.
- MENZEL, P., y F. D'ALUISIO. 2005. *Hungry planet: What the world eats*. Material World Press. Berkeley.
- ODUM, E. 1988. Self-organization, transformity, and information. *Science*, 242: 1132-1139.
- OROZCO-RAMÍREZ, Q. 2007. El sistema alimentario del maíz en Pátzcuaro Michoacán. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia
- PIMENTEL, D. 1980. *Handbook of energy utilization in agriculture*. CRC Press. Boca Raton.
- PIMENTEL, D., y M. PIMENTEL. 1996. *Food, Energy and Society*. Colorado University Press. Boulder.
- RAMÍREZ G., J. L. 2001. Rentabilidad financiera de maíz, trigo y sorgo en Guanajuato y maíz en Sinaloa, bajo el sistema de labranza convencional y de conservación. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. México.

- SENER (Secretaría de Energía). 2014. *Balance nacional de energía 2013*. Sener. México.
- TURK, J., y A. TURK. 1988. *Environmental science*. 4a Edición. Saunders Colley. Philadelphia.
- USDA, 2016. *National Agriculture Statistical Service*. <https://quickstats.nass.usda.gov/>
- VÁZQUEZ L., V. 2000. Evaluación agronómica y económica del programa de agricultura por contrato en maíz en la región de La Barca, Jalisco. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. México.

Capítulo 7

Recursos Energéticos

CARLOS A. GARCÍA BUSTAMANTE

ALBERTO BELTRÁN MORALES

VÍCTOR M. RUIZ-GARCÍA

RENÉ D. MARTÍNEZ-BRAVO

INTRODUCCIÓN

¿Cuáles son las principales fuentes de energía que usamos en México y en el mundo? ¿Podremos contar con estas fuentes de energía para siempre? ¿Cuáles son las consecuencias del uso de las fuentes de energía? ¿Existen fuentes de energía alternativas?

En los capítulos 1 y 2 se presentaron pequeños repases históricos sobre las formas de energía que ha empleado el hombre para satisfacer sus necesidades. Dichas formas de energía han cambiado con el tiempo, desde el uso de la energía humana y animal, hasta el uso de la biomasa, y posteriormente del petróleo, el gas natural, el carbón mineral y el uranio, que son las principales fuentes de energía en la actualidad (ver figura 7.1).

Como veremos en este capítulo, el petróleo, el gas natural y el carbón son combustibles fósiles, denominados así ya que son producto de la energía solar captada en plantas y animales del pasado geológico que han requerido de millones de años para formarse. Como una de sus características principales, dichos combustibles poseen una alta densidad energética. El uso de fuentes de energía con esta característica ha permitido el crecimiento de las ciudades, la industrialización, el aumento de la producción de alimentos, el crecimiento económico, así como la aparición de modos de transporte más rápidos y capaces de llegar más lejos (se puede cruzar el mundo en sólo dos días), el surgimiento de medios de comunicación que permiten enterarnos de lo que ocurre al otro lado del mundo prácticamente de forma instantánea, la aparición de los microchips, de las computadoras y el internet, entre muchos otros beneficios. A su vez, todos estos avances han ocasionado que el consumo energético mundial se haya multiplicado por veinte en los últimos 150 años (GEA, 2012).

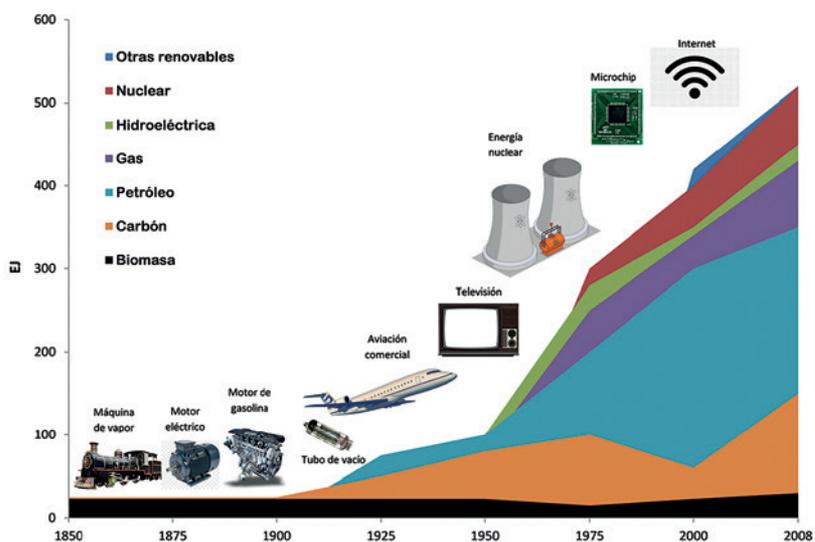


Figura 7.1. Principales fuentes de energía desde la revolución industrial.

Elaboración propia con base en GEA (2012).

Si bien estas formas de energía han permitido las mejoras ya señaladas, su uso tiene también desventajas, algunas de ellas muy importantes. En principio, uno de los problemas con los combustibles fósiles es que están siendo consumidos más rápidamente de lo que tardan en formarse. Ello, en términos prácticos, nos habla de la finitud de estos recursos, de manera que también podemos llamar a estas formas de energía como agotables. Entre los recursos energéticos finitos o agotables encontramos, además de los combustibles fósiles, al uranio, el cual se emplea en plantas nucleoelectricas.

El uso de fuentes agotables de energía tiene también impactos ambientales negativos, como lo es el calentamiento global, producto de los combustibles fósiles ya que durante su combustión se liberan gases de efecto invernadero (GEI), siendo los más importantes el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O) (Para más información ver capítulo 8 de impactos ambientales). Dichos gases contribuyen a la creación de un efecto de retención del calor radiado por la Tierra (y que llega del Sol), tal y como sucede en un invernadero.

Existen cada vez más evidencias de que el aumento en las concentraciones de GEI está incrementando la temperatura promedio de la superficie de la Tierra. Se espera que como consecuencia de esto aumente la frecuencia y la intensidad de eventos climáticos extremos como las sequías y las tormentas, el derretimiento de los polos, entre otros, lo que causaría efectos negativos en los ecosistemas, la agricultura y el bienestar humano.

CAJA 7.1. DERRAME DE PETRÓLEO

Entre los impactos se encuentran los daños ocasionados por los derrames de petróleo, los cuales pueden ocurrir durante su extracción, transporte o refinación. Como ejemplo tenemos lo ocurrido el 3 de junio de 1979, con una explosión durante la perforación del pozo Ixtoc I en la sonda de Campeche en el Golfo de México. Esto provocó un gran derrame de 560 millones de litros de crudo y una gran explosión que ocasionó un incendio por más de 280 días. Se calcula que del derrame solo se recuperó el 5.4%, el resto del volumen se quemó, se evaporó y se dispersó en más de 2,800 km². El derrame ocasionó enormes impactos en la biodiversidad marina y pérdidas en las actividades económicas de los habitantes y pesquería de las costas de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco y Campeche del Golfo de México y de algunas zonas de Texas en Estados Unidos

Por otra parte, la explotación de petróleo, gas natural y carbón requieren de grandes cantidades de agua, así como la generación de desechos que contienen metales pesados, los cuales ocasionan impactos ecológicos. La quema de combustibles fósiles genera emisiones contaminantes como el NO_x, el dióxido de azufre, y compuestos orgánicos volátiles (COV), siendo causantes de la formación de smog y lluvia ácida.

El uso de las fuentes agotables de energía (principalmente el petróleo) también ha sido un factor para el desarrollo de conflictos internacionales debido a que estos recursos se encuentran en manos de unos pocos países (las guerras de Irak en 1991 y 2003 son ejemplos de ello).

Las dificultades mencionadas ponen en evidencia la necesidad del uso de fuentes de energía alternativas que permitan disminuir los riesgos asociados a los recursos agotables (si bien estas también pueden tener sus impactos ambientales

indeseados). Se ha reconocido a las fuentes de energía renovable como formas de energía que pueden cumplir con estas características. Las energías renovables o inagotables, definidas ampliamente como aquéllas cuya tasa de regeneración es mayor a su tasa de consumo, son: eólica, oceánica, hidráulica, solar, bioenergía y geotérmica.

En la primera parte de este capítulo nos enfocaremos a estudiar las fuentes agotables de energía, principalmente sobre su formación, formas de extracción, su disponibilidad física y algunas de las implicaciones de su uso. En la segunda parte se abordan los recursos energéticos inagotables, principalmente su origen, características, algunas aplicaciones y diferencias en comparación con las fuentes agotables de energía.

7.1. FUENTES AGOTABLES DE ENERGÍA

7.1.1 Formación y productos del petróleo

¿Por qué es importante el petróleo? ¿Cómo se forma el petróleo?

El petróleo crudo es un compuesto mineral que existe en forma líquida bajo condiciones normales de presión y temperatura, y que está compuesto de una mezcla de hidrocarburos de origen natural y algunas impurezas asociadas como el azufre.

El petróleo es la principal fuente de energía primaria del mundo con una participación de alrededor del 32% y una aportación del 96% de la energía que consumió el sector transporte en el año 2016 (Sener, 2018; AIE, 2016). En México, el petróleo es también la principal fuente de energía primaria, con una aportación porcentual incluso mayor que a nivel mundial, ya que alcanza poco menos del 62% del consumo energético, y su uso principal reside en los motores de combustión interna que impulsan a los vehículos para el transporte de personas y mercancías (como se vio en la sección de Balance Energético del capítulo 2).

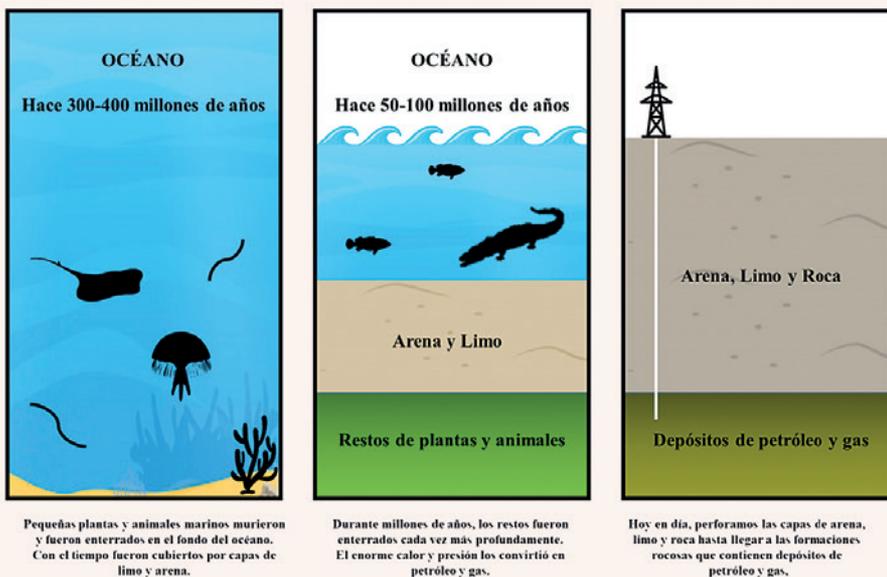
El petróleo es estratégico porque el sector transporte depende casi enteramente de él y tiene encadenamientos productivos muy importantes. De la refinación del petróleo se obtienen la gasolina; la turbosina que emplean los aviones; el diésel (que se emplea en vehículos, barcos, en maquinaria agrícola y en la generación eléctrica); el gas LP que se usa ampliamente en México para la cocción

de alimentos y el calentamiento de agua; parafinas que se emplean en iluminación; combustóleo que se usa en la generación eléctrica y en barcos cargueros; lubricantes; asfaltos que tienen aplicaciones como impermeabilizantes y para hacer caminos, entre otros (ver figura 7.2).

CAJA 7.2. ¿CÓMO SE FORMA EL PETRÓLEO?

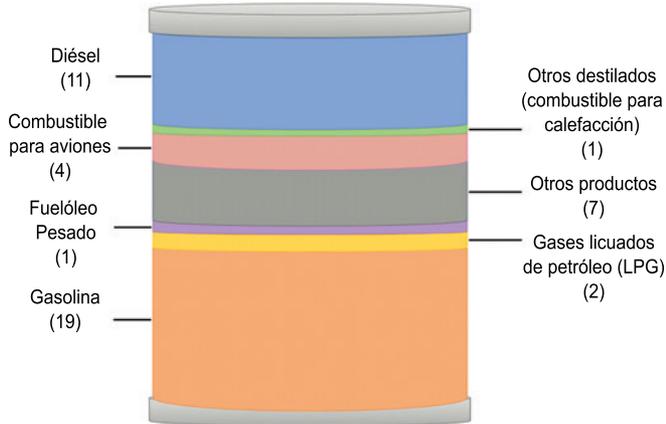
El petróleo y el gas natural se forman a partir de la descomposición de plantas y animales (principalmente microorganismos plantónicos marinos), los cuales fueron enterrados cada vez más profundamente por la acumulación de capas de barro y limo hace millones de años. Para que el petróleo y el gas se pudieran formar se requirieron de grandes presiones y temperaturas, las cuales se alcanzaron a medida que aumentaba el espesor de estos depósitos. El petróleo se forma a menor temperatura que el gas.

FORMACIÓN DEL PETRÓLEO Y GAS NATURAL

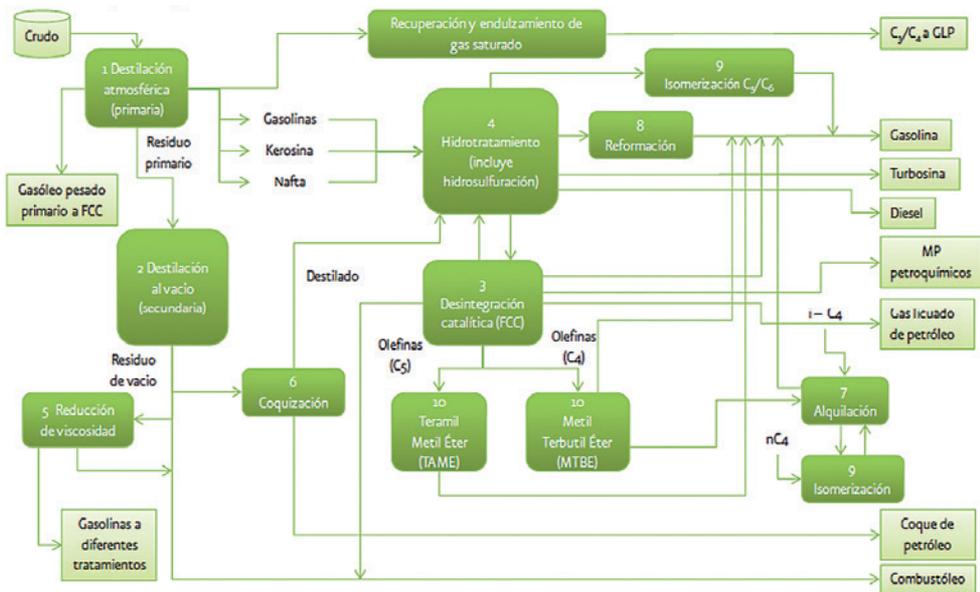


Fuente: Esquema basado en la teoría de Engler (1911) acerca del origen del petróleo en tres etapas (Servicio Geológico Mexicano).

Productos Hechos de un Barril de Petróleo Crudo (Galones) (2011)



Fuente: Departamento de Energía de EUA (<https://www.energy.gov/eere/vehicles/fact-676-may-23-2011-us-refiners-produce-about-19-gallons-gasoline-barrel-oil>)



Fuente: Prospectiva de petrolíferos 2002-2011.

Figura 7.2. Principales productos de la refinación del petróleo.

Además, del petróleo se obtienen las materias primas de la petroquímica, de la cual se deriva una gran diversidad de productos (ver cuadro 7.1 para algunos ejemplos).

CUADRO 7.1
ALGUNOS PRODUCTOS DE LA INDUSTRIA PETROQUÍMICA

MATERIA PRIMA	PRODUCTOS
Propileno	Fibras y filamentos, adhesivos, alfombras, películas, pinturas, aislamientos, laminados, muebles, accesorios, contenedores, revestimientos, entre otros.
Etileno	Bolsas, ropa, botellas de detergente, refrigerantes de carros, cables eléctricos, ductos, poliéster, refrigerantes, tubos, entre otros.
Butadieno	Neumáticos, mangueras y bandas, accesorios de cocina, gomas, juguetes, maletas, partes de automóviles, teclas de teclados, entre otras.
Benceno	Materiales para empaques, teléfonos, nylon, lentes de seguridad, lentes de sol, tiendas, cuchillería, faros de automóvil, trastes, cuerdas de instrumentos, ente otros.
Xileno	Botellas para bebidas, alfombras, películas fotográficas, solventes, ropa de deporte, textiles, electrónicos, entre otras.
Tolueno	Ropa, textiles, botes, envolturas de alimentos, entre otros.

A continuación, abordaremos los aspectos relativos a la exploración y producción de petróleo.

7.1.2. Exploración y producción

¿Cómo se obtiene el petróleo?

Para saber si existe petróleo en algún punto de la superficie terrestre (o bien en algún punto del lecho marino), es necesario perforar pozos exploratorios. Debido al proceso de formación del petróleo y el gas, y al intervalo de presión y temperatura a la que se forman y se preservan, las áreas donde es posible encontrarlo son cuencas marinas someras del pasado que no han padecido grandes incrementos de tempe-

ratura (por ejemplo, por la ocurrencia de volcanismo). Una vez formado, el petróleo tiende a fluir hacia la superficie, pero puede rellenar reservorios de rocas porosas y permeables (arenas o calizas fracturadas) si estas son cubiertas por rocas impermeables (por ejemplo arcillas). Para determinar los mejores lugares donde tienen que perforarse dichos pozos se emplean algunas técnicas geofísicas.

La primera de ellas es el método gravimétrico, el cual hace uso de las variaciones en el campo magnético de la Tierra debido a las diferencias de densidad de las rocas subterráneas. Las rocas sedimentarias, donde generalmente se encuentran los yacimientos de petróleo, tienen una baja densidad, por lo que su presencia indicaría bajos valores del campo gravitacional terrestre. Dicho método puede tener resultados erróneos, ya que otros tipos de roca pueden ocasionar también bajos valores del campo gravitacional.

La segunda técnica es la llamada geomagnética. Esta detecta los campos magnéticos de los yacimientos petrolíferos, los cuales son débiles debido a que las rocas sedimentarias tienen bajos contenidos de minerales ricos en hierro.

Por último, tenemos a la técnica sísmica de reflexión, la cual consiste en generar ondas sísmicas mediante una serie de pequeñas explosiones subterráneas, las cuales son captadas por arreglos de instrumentos llamados geófonos. Estos registros permiten crear un mapa 3D de los contornos de las estructuras subterráneas, los cuales son analizados por equipos de cómputo especiales y por geólogos para determinar la probabilidad de existencia de petróleo. Finalmente se tienen que perforar pozos exploratorios para determinar de manera definitiva la presencia del combustible.

Una vez detectados los campos petrolíferos se procede a la extracción del petróleo, para lo cual existen las siguientes técnicas:

- Recuperación primaria: esta se da aprovechando la presión natural del reservorio, la cual empuja el flujo de crudo.
- Recuperación secundaria: se da cuando la presión natural del reservorio no es suficiente para movilizar al petróleo, de manera tal que se inyecta agua o gas a presión.
- Recuperación mejorada: generalmente se aplica después de la recuperación secundaria y consiste en inyectar químicos, energía térmica o gases para obligar a fluir al petróleo crudo.

7.1.3. Clasificación

El petróleo puede clasificarse en:

Convencional: es el que se encuentra en reservorios permeables y debido a que es líquido en condiciones de presión y temperatura atmosféricas, fluye sin estimulación adicional. Se extrae empleando métodos de perforación de pozos tradicionales.

No convencional: es el que generalmente se encuentra en condiciones de más difícil acceso, por lo que requiere de tecnologías más complejas y costosas (de treinta a noventa dólares por barril). Básicamente es aquel petróleo que no puede obtenerse por recuperación primaria y secundaria. Además del petróleo obtenido por recuperación mejorada, entre las formas de petróleo no convencional también encontramos:

- Petróleo de renas bituminosas, formado por la combinación de arena con material bituminoso. Para poder extraerlo es necesario emplear vapor y maquinaria de grandes dimensiones para remover enormes cantidades de material. Los mayores depósitos de arenas bituminosas están en el área de Athabasca en Alberta, Canadá. Un producto equivalente a las arenas bituminosas son las pizarras arcillosas (*Oilshale*): rocas que contienen hidrocarburos. Para obtener el aceite, la roca debe ser recuperada por medio de minas para posteriormente ser sometida a un proceso de pirólisis para separar el petróleo de la roca.
- Crudos pesados, petróleo que no fluye naturalmente debido a su alta densidad, por lo que requiere de la inyección de vapor para forzarlo a fluir. Las principales reservas de este petróleo se encuentran en la cuenca del río Orinoco en Venezuela. Este crudo tiene un alto contenido de azufre, por lo que debe ser sometido a un proceso de limpieza.
- Petróleo de lutitas (*tigh oil*), son gotas de petróleo atrapadas en el sustrato rocoso de muy baja o nula permeabilidad. Para liberarlas se requiere de la fracturación hidráulica (su nombre en inglés es *fracking*).

7.1.4. Reservas y consumo a nivel global y en México

¿Hay petróleo disponible para los siguientes años? ¿De dónde lo obtenemos?
¿Por cuánto tiempo? ¿Qué es el EROI y por qué es importante?

Las reservas se definen como los volúmenes de petróleo comercialmente explotables e incluyen al petróleo convencional y no convencional (Pulso energético, 2020). Por lo general las reservas se clasifican de la siguiente manera:

- Probadas (1P), son aquellas de las que se tiene una cierta certeza de su existencia física (90% de probabilidad) y que son técnica y económicamente explotables en las condiciones actuales.
- Probadas y probables (2P), incluye a las reservas 1P más las reservas probables, aquellas que no permiten conocer con suficiente certeza el volumen de petróleo que es posible recuperar de forma rentable (50% de probabilidad de poderse extraer).
- Probadas, probables y posibles (3P), incluye a las reservas 2P más las reservas posibles, aquellas donde no se conoce con alta probabilidad (el 10%) el volumen físico, ni el que pueda recuperarse de forma rentable.

Según información de la Comisión Nacional de Hidrocarburos, en enero del 2018, en México las reservas 1P ascendieron a 8,483 millones de barriles de petróleo crudo equivalente (76% petróleo y 24% gas), las reservas 2P contabilizaron 16,162 millones de barriles de petróleo crudo equivalente y las reservas 3P fueron de 25,466 millones de barriles de petróleo crudo equivalente (CNH, 2019).

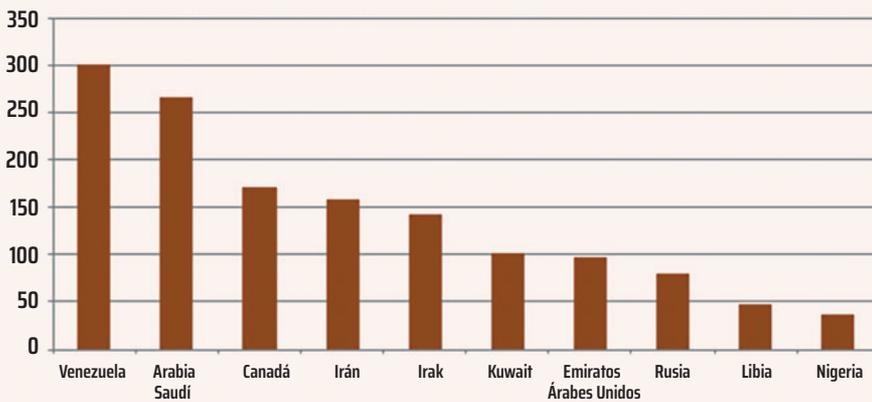
Un indicador importante cuando se habla de recursos petroleros (y también para gas natural y carbón) es la relación de las reservas probadas (R) y la producción (P), esta última se refiere al petróleo que es extraído de forma exitosa de los campos petroleros. Este indicador se calcula dividiendo las reservas probadas entre la producción de crudo (R/P), por lo que nos da información sobre el grado de reposición de las reservas, ya que las empresas petroleras mantienen la búsqueda de petróleo que puedan agregar a sus reservas y eventualmente ser parte de la producción. La relación de reservas producción mundial es de cuarenta años, en tanto que para México es de 9.1 años.

CAJA 7.3. ¿QUIENES POSEEN EL PETRÓLEO?

El petróleo se encuentra concentrado en manos de unos pocos países, principalmente en Medio Oriente, lo que ha tenido implicaciones importantes en las relaciones internacionales. Las crisis petroleras de los setenta y ochenta del siglo pasado son prueba de ello. Los países con las mayores reservas de petróleo se muestran en el siguiente cuadro (BP, 2019).

Países con las principales reservas de petróleo

Reservas (miles de millones de barriles)



Existen discusiones entre estudiosos sobre cuál sería la cantidad real de petróleo que puede descubrirse y producirse ya que, a final de cuentas, este es un recurso agotable. Basado en los datos históricos de la producción de los pozos petroleros en Estados Unidos, M. King Hubbert encontró un modelo matemático que describe muy bien el comportamiento de yacimientos y campos petroleros. Si graficamos la producción con respecto al tiempo, se obtiene una campana prácticamente simétrica, lo que indica que existe un punto máximo de producción, de manera que a partir de este punto sigue un decrecimiento cada vez mayor de la producción.

Este mismo modelo se ha aplicado a la producción mundial de petróleo convencional donde se ha observado un comportamiento de este estilo. No obstante, al agregar la producción de petróleo no convencional encontramos que la producción no declina, sino que, al contrario, aumenta. A partir de estos resultados, los seguidores de la teoría del Pico Petrolero (los que consideran que la producción mundial

seguirá la forma del modelo de Hubbert) estiman que el pico de la producción se alcanzará pronto, en tanto que hay otro grupo que sugiere que ocurrirá mucho más tarde. Lo cierto es que el pico ocurrirá forzosamente tarde o temprano. El pico del petróleo convencional de hecho ya se tocó durante la década pasada, o por lo menos no se han reportado desde 2008 incrementos sustanciales de este tipo de hidrocarburo.

En México, en el año 2004 se tocó el pico de producción de petróleo al llegar a 3.45 millones de barriles diarios y a partir de allí se ha observado un descenso de la producción hasta llegar a 1.62 millones de barriles diarios en enero de 2019. Existe una amplia discusión sobre si es posible revertir esta tendencia, la llamada Reforma Energética del gobierno de Peña Nieto y las acciones del gobierno actual de Andrés Manuel López Obrador tratan de revertirla. Por otra parte, hay quien pone en duda que sea posible revertir este pico. En un estudio de del Río y Magar (2011) se concluye que es muy improbable que se puedan recuperar niveles de producción cercanos a los 3 millones de barriles diarios.

Otro indicador importante es el EROI (*Energy Return on Investment* o Cantidad de Energía Obtenida por Unidad de Energía Invertida), el cual nos ayuda a evaluar la rentabilidad energética, más allá de su factibilidad económica. El indicador fue propuesto por Charles Hall (2017) y se define como:

$$EROI = E_0/E_I$$

Donde E_0 es la energía obtenida (es decir, la energía en el combustible o la fuente renovable) y E_I es la energía invertida (la energía para obtener, transportar y usar dicha energía).

Una fuente de energía con un EROI con valor de 1 indicaría que la cantidad de energía obtenida es exactamente la misma que la energía invertida para obtener dicha energía, por lo que en términos físicos no tendría sentido explotar esa fuente. Cabe señalar que la rentabilidad económica es mucho menor que la rentabilidad energética, es decir, un recurso cesa de ser rentable económicamente mucho antes de alcanzar un EROI de 1. Este indicador es particularmente importante para las fuentes fósiles de energía, ya que más allá de las reservas disponibles del combustible, debe considerarse de qué tamaño es la porción de las reservas que puede ser realmente aprovechada; o bien, si es preferible usar otras fuentes de energía que tienen EROI mucho mayores a 1.

Actualmente, a nivel global, el EROI del petróleo y el gas se encuentra alrededor de 18, en tanto que en la década de los noventa se ubicaba en 30 (Hall *et al.*, 2014), de manera que se ha mostrado una tendencia decreciente en los últimos años, lo que refleja la cada vez mayor dificultad para extraer el petróleo y el gas natural (ver cuadro 7.2). Para México el EROI ha fluctuado en los últimos años, y actualmente se encuentra alrededor de 45 (Hall *et al.*, 2014).

CUADRO 7.2
EROI DE DISTINTAS FUENTES DE ENERGÍA

FUENTE ENERGÉTICA	EROI
Petróleo	18:1 (declinando rápidamente)
Carbón	80:1 - 20:1 (declinando lentamente)
Gas natural	10:1 (declinando)
Nuclear	5:1 (alta incertidumbre)
Hidroelectricidad	267:1 - 12:1
Eólica	18:1
Biocombustibles	1:1 - 18:1
Solar	2:1 - 12:1
Geotérmica	No disponible

Fuente: Boyd, 2013.

ACTIVIDAD

Obtén información histórica del Sistema de Información Energética de la Secretaría de Energía de México y del Statistical Review of World Energy de British Petroleum (disponibles en: <http://sie.energia.gob.mx/> y <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> respectivamente) y realiza lo siguiente:

- Grafica la producción mundial y nacional de petróleo.
- Calcula la tasa media de crecimiento anual de petróleo de 1965 a 1985, 1986 a 2005 y 2006 a 2017.
- Grafica la relación R/P de petróleo para México y para el mundo.
- ¿Qué consecuencias te imaginas que podríamos tener en México si efectivamente hemos alcanzado ya el pico de la producción petrolera?

7.2. GAS NATURAL

¿Qué es el gas natural? ¿Por qué está cobrando cada vez mayor importancia en México y en el mundo? ¿Es sustentable su producción?

7.2.1 Formación y usos

El gas natural (GN) se encuentra en ambientes similares a los del petróleo y está formado por hidrocarburos simples y más ligeros que los presentes en el petróleo crudo. En su mayor parte está compuesto por metano (entre el 60 y 90%), etano, propano, butano (los dos últimos llamados líquidos del gas natural, los cuales se producen con el gas natural pero son líquidos en condiciones de presión y temperatura ambientales), y otros gases cuyas proporciones varían de forma importante según su origen (cuadro 7.3).

CUADRO 7.3
COMPOSICIÓN DEL GAS NATURAL

COMPONENTE	FÓRMULA	GAS NO ASOCIADO	GAS ASOCIADO
Metano	CH ₄	95-98%	60-80%
Etano	C ₂ H ₆	1-3%	10-20%
Propano	C ₃ H ₈	0.5-1%	5-12%
Butano	C ₄ H ₁₀	0.2-0.5%	2-5%
Pentano	C ₅ H ₁₂	0.2-0.5%	1-3%
Dióxido de Carbono	CO ₂	0-8%	0-8%

Nitrógeno	N ₂	0-5%	0-5%
Ácido Sulfhídrico	H ₂ S	0-5%	0-5%
Otros	A, He, Ne, Xe	trazas	Trazas

Fuente: <http://profesores.fi-b.unam.mx/l3prof/Carpetas%20energ%EDa%20y%20ambiente/Gas%20Natural.pdf>

Dependiendo su composición, el gas natural se clasifica en: 1) gas amargo: contiene derivados del azufre; 2) gas dulce: libre de derivados del azufre, se obtiene generalmente al endulzar el gas amargo utilizando solventes químicos o físicos, o adsorbentes; 3) gas húmedo: contiene cantidades importantes de hidrocarburos más pesados que el metano; 4) gas seco: contiene cantidades menores de otros hidrocarburos, es el gas no asociado.

El gas natural (GN) puede encontrarse en los mismos yacimientos en donde hay petróleo crudo, a este se le llama gas asociado, o también puede encontrarse sin la presencia de petróleo, y se le denomina gas seco. Para poderse utilizar, el GN es sometido a un procesamiento para retirarle el agua, el azufre, partículas y para asegurar que su poder calorífico entre dentro de cierto rango de calidad.

Por lo general, el gas natural se transporta por ductos (gasoductos), sin embargo, esto lo hace impráctico para el transporte intercontinental o a grandes distancias. El GN se puede transportar por camiones o barcos si se somete primero a un tratamiento especial, de donde se obtiene el llamado gas natural licuado (GNL). El proceso consiste en eliminar los hidrocarburos más pesados para dejar sólo metano, el cual es enfriado a alrededor de -162 °C a presión atmosférica. Para poder ser utilizado, el GNL debe ser convertido nuevamente a estado gaseoso por medio de plantas de regasificación como la que existe en Altamira, México.

A nivel global, el gas natural representa alrededor del 31% de la energía primaria y sus principales usos son para la generación eléctrica (40%), la generación de calor en la industria y los hogares (24% y 22% respectivamente) y el resto se usa como insumo en los procesos del sector energético y como materia prima en procesos como la fabricación de fertilizantes (AIE, 2016). Por su parte, el GNL representa cerca del 9% del consumo de gas natural a nivel mundial.

En México el gas natural aporta alrededor del 23% de la energía primaria. Su principal uso está en la generación eléctrica con alrededor de 1,750 PJ. El GN

ofrece ventajas sobre otros combustibles fósiles para la generación eléctrica. Las centrales de ciclo combinado con base en GN tienen mayor eficiencia térmica y emiten la mitad de CO₂ en comparación con las centrales termoeléctricas con base en carbón. Además, son más rápidas de construir, poseen menor oposición o resistencia de las localidades aledañas y su costo de capital es inferior. Las plantas de generación de gas también ofrecen mayor flexibilidad que las plantas de carbón en términos de adaptar su nivel de producción a la variabilidad existente en el sistema eléctrico, asociada con el aumento en el uso de fuentes intermitentes de generación (eólica y fotovoltaica). El segundo uso en importancia del GN está en la generación de calor en el sector industrial (alrededor de 619 PJ). Se usa además de forma limitada a nivel residencial y en el sector transporte.

Las unidades en las que se maneja el GN son variadas, por ejemplo, en términos de volumen en Estados Unidos se utilizan los pies cúbicos (pc), donde 1,000 pc equivalen a un promedio de 0.185 barriles de petróleo o a 28.3 metros cúbicos. 100 pc son aproximadamente a 101,500 BTU o 105.5 MJ. El precio se maneja en dólares por millón de BTU (\$/MBTU).

7.2.3. Clasificación y reservas

De acuerdo con las características geológicas de sus fuentes, el gas natural se puede dividir en convencional y no convencional. El GN convencional se encuentra dentro de estructuras de roca porosa y permeable, la cual a su vez tiene por encima una capa de roca impermeable que evita que el gas escape a la superficie. En cambio, el GN no convencional se encuentra entre una acumulación de capas de rocas sedimentarias de baja permeabilidad que atrapan el gas entre ellas y, al igual que ocurre con el petróleo no convencional, su explotación es más difícil y costosa.

Hay tres tipos de gas no convencional: gas de lutitas o *shale gas*, encontrado en depósitos de esquisto (ver caja 4); gas metano de carbón (GMC), extraído de las capas de carbón mineral; y el gas apretado, el cual se encuentra atrapado bajo tierra en formaciones rocosas impermeables. Los últimos dos se han extraído durante décadas, en tanto que el gas de lutitas se ha producido de forma importante desde el año 2005. El gas de lutitas representó en 2014 casi el 54% de la producción total de gas de Estados Unidos o el 11% de la producción mundial de gas de ese año (IEA, 2013; BP, 2019).

En cuanto a México, de acuerdo con información de Pemex, las reservas probadas de gas seco ascienden al equivalente de 2,213 millones de barriles de petróleo crudo, de las cuales el 56% se ubican en campos terrestres y el 44% en campos marinos. El total de las reservas posibles de gas seco equivale a 8,603 millones de barriles de petróleo crudo equivalente.

Los principales países con las reservas recuperables de gas natural son Rusia, Irán, Qatar, Canadá, y China; en tanto que entre los principales países consumidores encontramos a Estados Unidos, Rusia y China (figura 7.3).

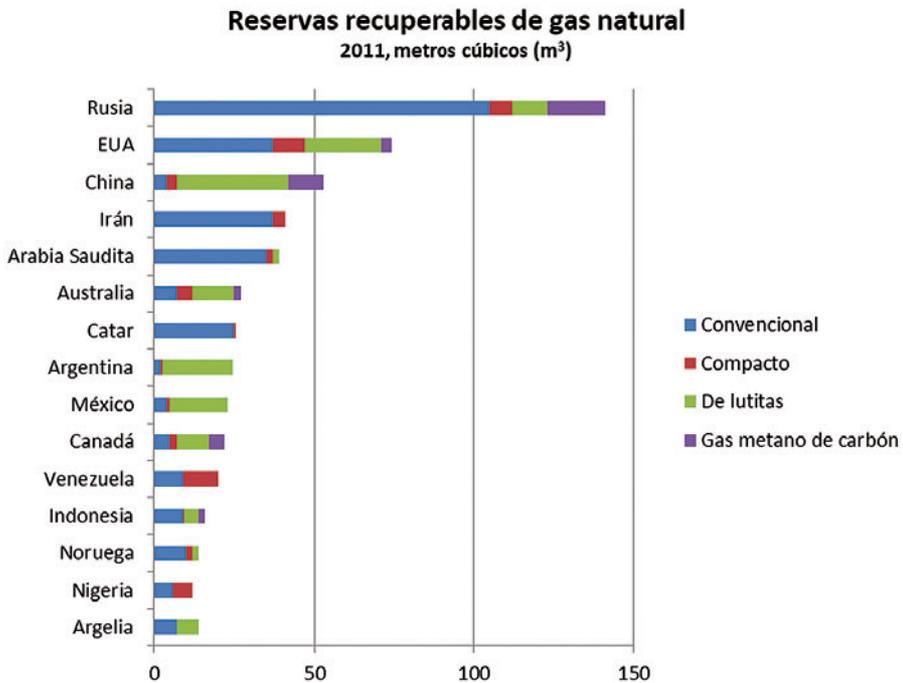


Figura 7.3. Principales reservas de gas natural.

Fuente: IEA (2013).

CAJA 7.4. GAS Y PETRÓLEO DE LUTITAS (SHALE GAS)

El gas y petróleo de lutitas son fuentes no convencionales de gas natural y petróleo que se encuentran en yacimientos de rocas de baja permeabilidad. Esta situación geológica requiere que para recuperar el gas y el petróleo sea necesario fracturar la roca para aumentar su permeabilidad, de manera que sea posible llegar a los poros que contienen el gas. Entre otros avances tecnológicos, la fracturación hidráulica (*fracking*) y la perforación horizontal han permitido la explotación de estos recursos energéticos.

Una vez que se ha determinado la presencia de estos hidrocarburos, el proceso de producción consiste en perforar un pozo vertical hasta alcanzar el depósito de gas o petróleo. De acuerdo con el tamaño de la capa se pueden perforar más pozos verticales o bien se pueden hacer pozos horizontales con el propósito de aumentar el contacto con la capa del hidrocarburo. Para evitar contaminación se introducen tuberías de acero y se sellan con cemento los espacios entre estas y el pozo. Posteriormente se realiza la fracturación hidráulica (con el fin de fracturar las rocas y liberar el gas o el petróleo), la cual consiste en inyectar a alta presión una mezcla de grandes cantidades de agua, arena y químicos. Por último, se lleva a cabo la extracción de los hidrocarburos.

El agua residual del proceso contiene metales pesados, compuestos químicos cancerígenos y radioactivos, los cuales son llevados a la superficie cuando se extraen los hidrocarburos. Esta agua se transporta posteriormente hacia puntos de tratamiento y eliminación.

Los yacimientos de gas y petróleo de lutitas presentan bajos factores de recuperación y altas tasas de declinación, lo que ocasiona que se tengan que perforar una gran cantidad de pozos para mantener la producción.

Por otra parte, para México se han estimado recursos prospectivos (que son recursos de hidrocarburos estimados a cierta fecha, que son potencialmente recuperables a partir de acumulaciones aún no descubiertas) de gas de lutitas en un rango de 545 billones de pies cúbicos a 141 billones de pies cúbicos (Tcf en inglés) de acuerdo con la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH, 2018). Estos recursos son amplios, por lo que su explotación resulta atractiva desde el punto de vista de suministro energético.

No obstante este alto potencial, se han reportado impactos ambientales importantes debido a la explotación del gas de lutitas en Estados Unidos. Entre estos impactos encontramos las emisiones de gases de efecto invernadero debido a las fugas de gas en los procesos de extracción, procesamiento y transporte (Howarth y Santoro, 2011); un gran uso de agua, ya que para la perforación de un pozo se pueden requerir hasta 14.7 millones de litros (De la Vega-Navarro y Ramírez-Villegas, 2015); posibilidades de contaminación de mantos acuíferos con agua contaminada por el proceso de extracción; impactos a la salud por los químicos que son inyectados a los pozos, ya que al menos algunas de las sustancias

empleadas son tóxicas. De igual forma, estudios científicos atribuyen la ocurrencia de sismos a la fracturación hidráulica (Weingarten *et al.*, 2015).

Estos y otros posibles impactos ambientales deben ser considerados antes de explotar el gas de lutitas, sobre todo los impactos en el uso del agua, ya que las principales reservas de este hidrocarburo se encuentran en la zona norte de México, las cuales son zonas con poca disponibilidad de agua. También deben considerarse los posibles impactos sociales, como aquellos que afecten la salud de la población, así como el respeto a la propiedad de la tierra y a otras actividades productivas en aquellas áreas con potencial de explotación.

De igual forma existen grandes cuestionamientos al desarrollo del gas y petróleo de lutitas debido a que, en términos generales, no representan un negocio rentable. De acuerdo con un estudio del Instituto para la Economía Energética y el Análisis Financiero, al estudiar a 29 compañías del gas y petróleo de lutitas en Estados Unidos encontraron que estas, en su conjunto, presentan pérdidas por 184 mil millones de dólares en el periodo de 2010 a principios de 2019 (IEEFA, 2019). El mismo reporte también señala que desde enero de 2015 a diciembre de 2018 se han declarado en quiebra 167 compañías de petróleo y gas de lutitas, lo que ha ocasionado que los inversores hayan disminuido a menos de la mitad las inversiones para esta industria (si se comparan con las inversiones del año 2012).

7.2.4. El gas natural como un combustible “puente” hacia fuentes renovables de energía

El gas natural se ha visto como un combustible de transición hacia fuentes renovables de energía, ya que su combustión implica menores emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en comparación con el petróleo y con el carbón mineral. Además, el GN proporciona potencia firme en la generación eléctrica, lo que permite balancear mejor el sistema eléctrico cuando se incluyen fuentes renovables de energía, las cuales son intermitentes como la energía solar y eólica. Sin embargo, existen serios cuestionamientos a la pertinencia de emplear al GN como un combustible “puente” ya que estudios señalan que podría retardar el uso de fuentes renovables (Davies y Shearer, 2014). Además, las emisiones fugitivas de metano de los campos de explotación y de las estaciones de procesamiento son mayores a las estimadas anteriormente (Brandt *et al.*, 2014; Sánchez y Mays, 2015; Zavala-Araiza *et al.*, 2015), situación particularmente preocupante en términos de su efecto en el

calentamiento global, pues el metano tiene un potencial de calentamiento global (PCG) que es de 21 a 25 veces mayor al del dióxido de carbono. De igual forma, se ha alertado sobre la cada vez mayor cantidad de energía requerida para la explotación de este combustible fósil no convencional en términos del EROI.

Actualmente México no es autosuficiente en cuanto a la producción de gas natural ya que, con base en el Balance Nacional de Energía, se importa alrededor de 1,084 PJ de gas seco (alrededor del 60% de la demanda), principalmente de Estados Unidos. Las importaciones de gas natural han mostrado una tasa de crecimiento promedio anual de 2.4% y se espera que esta situación continúe ya que los proyectos actuales de construcción de gasoductos están estructurados de manera que se pueda facilitar la importación de gas natural desde Estados Unidos (véase los proyectos Los Ramones fase II y Texas-Tuxpan para ejemplificar dicho escenario). También se tiene una situación de venteo de gas natural,¹ con volúmenes que equivalen a la tercera parte de las importaciones de este, lo que ocasiona que no se estén aprovechando los recursos existentes y que se esté afectando al ambiente debido a que este gas es quemado sin ningún tipo de provecho. De igual forma, la política energética actual tiende a favorecer el uso de gas natural, un ejemplo de esto es que el GN está exento del impuesto al carbono que sí aplica para otros combustibles fósiles.

Es importante revisar de manera crítica las posibilidades del incremento de la producción de GN a partir de fuentes convencionales dadas las dificultades financieras de Pemex para realizar actividades de exploración y explotación, así como las condiciones más favorables en términos de infraestructura que presenta la producción de GN en Estados Unidos. De igual forma, debe analizarse la conveniencia de la explotación de fuentes no convencionales de gas natural en México (como el gas de lutitas) dados los riesgos ambientales asociados y a la posibilidad de que sea una actividad que reporte costos más altos que los beneficios (ver caja 7.4). De no incrementarse la producción y seguir la tendencia de un aumento en el consumo de GN, sobre todo para la generación eléctrica, se tendrán impactos negativos en la seguridad energética del país, ya que se requerirían aumentar las importaciones, situación que tiene además impactos económicos importantes como afectaciones

¹ Durante la explotación de petróleo en ocasiones existe gas que no es posible capturar, por lo que para evitar accidentes este se quema en mecheros.

a la balanza de pagos del país y la pérdida de oportunidades de empleo y encadenamientos productivos en México.

7.3. CARBÓN

¿Usamos el mismo tipo de carbón para todas nuestras necesidades? ¿Qué tipo de carbón usas en tus asados de fin de semana?

7.3.1. Formación y tipos

Existen dos tipos de carbón, y se clasifican con base en si el carbón se considera un energético fósil o renovable.

7.3.1.1. Carbón vegetal

El carbón vegetal se produce con madera proveniente de varias fuentes, incluyendo leña, que puede provenir de cambios de uso del suelo, del manejo forestal y de plantaciones. Alrededor del 20% del peso original de la madera se convierte en carbón vegetal, mientras que el resto de la masa es liberada en forma de vapor y gases; así el carbón vegetal tiene alrededor del doble del contenido energético y sólo una cuarta parte del peso de la madera original, lo que hace más fácil su transportación y almacenaje. El principal uso de este biocombustible es la cocción de alimentos.

7.3.1.2. Carbón mineral

Como su nombre indica, es procedente de las minas o pozos y es utilizado en estufas, fraguas, industrias y calefacción. Sirve para producir calor y no es considerado biomasa. El carbón mineral se considera un energético fósil y por lo tanto finito.

Este combustible es una mezcla que se forma de la descomposición de componentes orgánicos acumulados en zonas pantanosas, lagunares o marinas de poca profundidad, cubiertas o sepultadas por sedimentos que, con el paso del tiempo, incrementan las condiciones de presión y temperatura produciendo un progresivo enriquecimiento en carbono. A este proceso se le conoce como carbonificación y da lugar a la formación de los diferentes tipos de carbón mineral.

El carbón mineral es una roca sedimentaria de color negro, muy rica en carbono y con cantidades variables de otros elementos como hidrógeno, azufre, oxígeno

y nitrógeno. Arde fácilmente y es uno de los combustibles fósiles más utilizados, principalmente en las plantas termoeléctricas. Se divide en cinco variedades: la antracita, la hulla, el lignito, la turba y el coque.

CAJA 7.5. CARBONES

Los más utilizados son:

Tajos: este tipo de minado se utiliza en México para recuperar el combustible hasta una profundidad máxima de 50 metros. Consiste en retirar el material estéril para recuperar el carbón.

Minas subterráneas: son utilizadas para recuperar el carbón a profundidades de hasta 300 metros. En el proceso, se emplean rampas que van desde la superficie hasta llegar al manto. Una vez cortado, el carbón es trasladado al exterior a través de bandas. Los desarrollos mineros sobre el manto de carbón llegan a alcanzar varios kilómetros de longitud.

Pozos: sistema rudimentario que consiste en un pozo vertical de aproximadamente 2 metros de diámetro y profundidades de 30 hasta 70 metros. Facilita cortar el manto para desarrollar sobre él una serie de galerías de 50 metros de largo en forma de retícula de donde extraen el carbón; con el uso de carretillas y un pequeño malacate es llevado al exterior. Este tipo de minería es muy insegura y por lo mismo podría desaparecer.

El Balance Nacional de Energía contempla al carbón mineral como energía primaria debido a que se extrae directamente de los recursos naturales. Las cifras de carbón que se registran en el Balance hacen referencia a dos clases de carbón: a) coquizable: carbón con bajo contenido de cenizas, característica que favorece que sea transformado en coque de carbón y b) no coquizable: carbón con alto contenido de cenizas y finos, de flama larga y adecuado para su empleo en la generación eléctrica. Por otro lado, el Balance Nacional de Energía contempla al coque de carbón como energía secundaria. El coque de carbón es un combustible sólido, con alto contenido de carbono, obtenido de la destilación del carbón siderúrgico. Se clasifica de acuerdo con su tamaño en metalúrgico, nuez y fino; las tres variedades se obtienen en hornos de recuperación. El coque imperial es un producto especial obtenido en hornos de colmena a partir de la mezcla de carbón lavado. Se utiliza en la industria siderúrgica.

7.3.2. El carbón desde la revolución industrial hasta nuestros días

¿Qué ha sucedido con el carbón desde su auge hasta nuestros días?

¿Actualmente se usa? ¿Para qué se usa?

En México y el mundo el carbón mineral se utiliza principalmente para:

- a) Generación de energía eléctrica. El carbón suministró en 2015 el 39% de la electricidad de todo el mundo. En México, en 2017, alrededor del 12% de electricidad que se consumió en el país se generó a partir del carbón
- b) Siderurgia. Mezclando minerales de hierro con carbón a altas temperaturas, se obtiene el acero, una aleación en la que el hierro se enriquece en carbono, obteniendo mayor resistencia y elasticidad
- c) Cemento. Los hornos suelen quemar carbón en forma de polvo y consumen cerca de 450 g de carbón por cada 900 g de cemento producido.

En 2018 los principales países productores de carbón mineral fueron: China con 1,828.8 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mton), Estados Unidos con 364.5 Mton, Indonesia con 323.3 Mton, India con 308.0 Mton, y Australia con 301.1 Mton (SE, 2020; World Coal Association, 2015). La información se basa en datos proporcionados por la International Energy Agency, la World Coal Association y la BP Statistical. Actualmente México tiene reservas de alrededor de 1,211 millones de toneladas (BP, 2015) y produce alrededor de 15 millones de toneladas anuales, las cuales se producen casi en su totalidad en el estado de Coahuila. Los otros yacimientos de carbón se localizan en los estados de Sonora y Oaxaca.

El carbón mineral favoreció el surgimiento de la Revolución industrial al emplearse como combustible en las máquinas de vapor, donde se pueden distinguir tres oleadas:

- I. Motores de vapor estacionarios y uso masivo del carbón (1787-1814). Este es el periodo del desarrollo de las máquinas de vapor para bombear agua de las minas de carbón, de la industria textil (con la hiladora de usos múltiples o el telar mecánico) y de la siderúrgica (hornos de coque), junto a una mejora en la comunicación (camino y canales). Esta primera etapa no

fue de grandes inventos, sino de aplicación de ideas sencillas (en muchos casos, antiguas) con una visión comercial. No hubieran sido posibles grandes inversiones de capital en investigación, ni existía fuerza laboral calificada para aplicarlas. En esta fase, a excepción de las industrias del algodón, del hierro y del carbón, la mecanización de las fábricas fue pequeña.

- II. Motores de vapor móviles (locomotoras y barcos de vapor), desarrollo y fuerte expansión de la metalurgia del hierro y mejora de las comunicaciones (telégrafo) (1843-1869). La disponibilidad de hierro fue central, pues sirvió de materia prima para muchas industrias y alentó la extracción acelerada de carbón.
- III. Electricidad comercial, motor de explosión e inicio de la industria química moderna (1898-1924). A finales del siglo XIX empezó a utilizarse la electricidad en las ciudades, construyéndose asimismo los primeros tranvías y metros eléctricos, y se inició su aplicación paulatina en la automatización de la producción industrial. La electricidad era una nueva forma de energía final de alta calidad que se generaba fundamentalmente a partir del carbón, pero también en saltos hidráulicos. Sin embargo, el impacto social de la expansión del motor de explosión y la electricidad vino después de la transición de la hegemonía británica a la estadounidense y del carbón al petróleo. En esta tercera oleada de la Revolución industrial, la mayoría de las innovaciones ya no fueron británicas, sino estadounidenses y alemanas, con el predominio de grandes industrias que operaban a nivel internacional. Por otra parte, las máquinas se empezaron a acoplar a otras máquinas y se inició la producción de máquinas por medio de máquinas (con un gran consumo energético fósil, por supuesto).

**CAJA 7.6. ¿POR QUÉ EL CARBÓN TOMÓ TANTA IMPORTANCIA?...
LA REVOLUCIÓN DEL CARBÓN**

El carbón mineral mostró características que lo hacían claramente distinto a la biomasa: a) su densidad energética es netamente mayor; b) la tecnología y su poder calorífico permitieron un uso muy versátil (sobre todo a partir de la invención de la máquina de vapor); c) su abundancia y bajos costos; d) es fácilmente almacenable. De esta forma el carbón desplazó a la biomasa como la principal fuente de energía a nivel global.

No obstante lo anterior, en el siglo xx el petróleo desplazó al carbón mineral como la principal fuente de energía. Esto se debió a que el petróleo tiene una densidad energética dos veces superior al carbón estándar. Esta situación resultó más evidente con el surgimiento del motor de combustión interna y su uso en automóviles en los que el petróleo significó una fuente de energía superior, situación que continúa hasta nuestros días.

7.3.3. Reservas y consumo de carbón y a nivel global y en México

¿Hay carbón disponible para los siguientes años? ¿Por cuánto tiempo?

¿Es atractivo actualmente el uso del carbón?

A nivel global, el carbón mineral es el combustible más abundante para el cual hay una relación reservas/consumo de 133 años. En el caso del gas natural y el petróleo, esta relación es menor, 60 y 40 años respectivamente (BP, 2019) (ver cuadro 7.4).

Aunque existen grandes reservas de carbón mineral, su uso ha sido sustituido en algunos casos por gas natural y se han disminuido los impactos ambientales, como son las emisiones de gases de efecto invernadero (causantes del calentamiento global), y de azufre (que ocasiona lluvia ácida).

CUADRO 7.4
RESERVAS (R), PRODUCCIÓN (P) Y R/P EN MÉXICO Y EL MUNDO PARA
LOS DISTINTOS COMBUSTIBLES FÓSILES

	MUNDO			MÉXICO		
	RESERVAS	PRODUCCIÓN	R/P	RESERVAS	PRODUCCIÓN/AÑO	R/P
carbón	847,488 Millones ton	6,396 Millones ton/año	133 Años	1,211 Millones ton	12 Millones ton/ año	99 Años

Gas Natural	6,263,000 Millones pc	103,660 Millones pc/año	60 Años	43 miles de Millones pc	~7 miles de Millones pc/año	6.3 Años
Petróleo	1,208,200 Millonesbbls	29,832 Millonesbbls/año	40 Años	11,000 Millonesbbls	1,146 Millonesbbls/año	10 años

Fuente: BP (2019).

7.3.3.1. El pico del carbón y su futuro

¿Actualmente, el carbón es de fácil extracción?

¿En qué momento el carbón pasa de ser barato a costoso, y de fácil a difícil extracción?

Para tener carbón mineral disponible primero hay que extraerlo. La extracción tiene límites que dependen de la cantidad disponible del recurso. Cuanto menos disponible está el energético, más difícil y costosa se vuelve la extracción. El momento en el que la extracción pasa de fácil a difícil y de barata a costosa se conoce como “pico de extracción”. Detallando más lo anterior, en la explotación de un recurso minero, la primera fase tiene forma de curva ascendente. Es una etapa en la que cada vez se puede extraer más cantidad de recurso. En esta fase se encuentran los yacimientos más accesibles y grandes y con la experiencia acumulada se explotan de forma sencilla. Pero inevitablemente llega un momento en el que la capacidad de extracción empieza a declinar, este momento coincide con la mitad de las reservas. El punto de inflexión es el “pico de la sustancia”. Durante la segunda mitad de la curva de extracción, el recurso podrá conseguirse en cantidades cada vez menores, la calidad disminuirá (ya que primero se explotan los mejores, vale la pena mencionar que el antracita ya se ha explotado en gran medida y queda principalmente lignito) y será más difícil de conseguir (ya que al principio se eligen los emplazamientos de más fácil extracción y de mayor tamaño,² y además, la segunda mitad de las reservas de un recurso siempre es más difícil de sacar que la primera).

² Es difícil que los yacimientos pequeños compensen la caída de los grandes, pues su ritmo de extracción decae de forma más rápida. Esto obliga a que se deban poner en explotación cada vez más.

Es importante entender que el “pico de extracción” es un concepto que solo se basa en las características geológicas del recurso, obviando otros factores fundamentales, como los políticos (ayudas públicas, inestabilidad), económicos (inversiones), sociales (resistencias a la explotación), ambientales (falta de recursos e impactos) o tecnológicos (mejoras en la maquinaria). Todos ellos condicionan cuándo será el cénit y, sobre todo, cómo será el descenso de la extracción una vez que se sobrepase.

7.4. URANIO

ORIGEN, TIPOS Y DECAIMIENTO RADIOACTIVO

¿Cómo produce energía un material radiactivo? ¿Hay diferentes elementos radiactivos?

¿Existe relación entre el Uranio y el Plomo?

El uranio es el elemento natural de mayor número atómico, su origen no es conocido, aunque existen teorías al respecto. La más aceptada es que su origen se encuentra en la explosión de supernovas o el mismo *Big Bang*, es decir, desde la formación del universo. El uranio provendría de la desintegración de elementos con un número atómico mayor que probablemente se encontraban presentes en la Tierra o en otra parte del universo.

El uranio natural está formado por tres tipos de isótopos: uranio-238 (238U), uranio-235 (235U) y uranio-234 (234U). De cada gramo de uranio natural el 99.284% de la masa es uranio-238, el 0.711% uranio-235, y 0.0085% uranio-234.

El uranio es un elemento radioactivo y pierde masa atómica a través del tiempo por la emisión de partículas alfa, lo que hace que su número atómico disminuya (decaimiento) y se convierta en otros elementos que poseen otras características. El uranio decae muy lentamente. El periodo de semi desintegración del uranio-238 es de aproximadamente 4,470 millones de años y el del uranio-235 de 704 millones de años. El decaimiento radioactivo puede tener un camino corto o largo al cual se le llama cadena de desintegración (cuadro 7.5) con base en el conjunto de radioisótopos que se generan en el proceso de decaimiento radioactivo, mediante el cual un isótopo decae en otro isótopo (de menor peso atómico y usualmente llamado hijo), y así sucesivamente hasta alcanzar un isótopo estable.

CUADRO 7.5
DECAIMIENTO RADIOACTIVO DE LOS ISOTOPOS DE URANIO
(U238 Y U234)

NÚCLIDO	MODO DE DESINTEGRACIÓN	PERIODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN	PRODUCTO DE DESINTEGRACIÓN	NÚCLIDO	MODO DE DESINTEGRACIÓN	PERIODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN	PRODUCTO DE DESINTEGRACIÓN
U 238	α	4.468×10 ⁶ a	Th 234	Rn 218	α	35 ms	Po 214
Th 234	β ⁻	24.1 d	Pa 234	Pb 214	β ⁻	26.8 min	Bi 214
Pa 234	β ⁻	6.7 h	U 234	Bi 214	β ⁻ - 99.98 %	19.9 min	Po 214
U 234	α	245,500 a	Th 230		α - 0.02 %		Ti 210
Th 230	α	75,380 a	Ra 226	Po 214	α	0.1643 ms	Pb 210
Ra 226	α	1,602 a	Rn 222	Ti 210	β ⁻	1.3 min	Pb 210
Rn 222	α	3.8 d	Po 218	Pb 210	β ⁻	22.3 a	Bi 210
Po 218	α - 99.98 %	3.1 min	Pb 214	Bi 210	β ⁻ - 99.999987 %	5 d	Pb 210
	β ⁻ - 0.02 %		At 218		α - 0.00013 %		Ti 206
At 218	α - 99.90 %	1.5 s	Bi 214	Po 210	α	138 d	Pb 206
	β ⁻ - 0.10 %		Rn 218	Ti 206	β ⁻	4.2 min	Pb 206
				Pb 206	-	estable	-

7.4.1. Usos, beneficios y riesgos del uso del uranio

¿Para que usamos los reactores nucleares? ¿Son más los beneficios que los riesgos por su uso? ¿Tienes idea de cuánto tiempo duran los impactos sociales, ambientales y de salud en accidentes nucleares?

El principal uso del uranio en la actualidad es como combustible para los reactores nucleares de producción eléctrica. El accidente nuclear de Fukushima Daiichi ha afectado a proyectos y políticas de energía nuclear en algunos países, y algunos países defienden que la energía nuclear sigue siendo una parte clave de la matriz energética mundial. Entre sus beneficios y riesgos encontramos:

- **BENEFICIOS:** produce energía eléctrica de forma continua ya que su decaimiento es muy largo y no genera emisiones de gases de efecto invernadero durante su operación.
- **RIESGOS:** es un energético finito; su uso provoca un gran número de residuos radiactivos que se encuentran activos durante millones de años; los accidentes en reactores nucleares provocan consecuencias al ambiente, crisis económicas y sociales, e impactos a la salud que perduran por generaciones (cáncer y mutaciones) y; alto riesgo laboral para quienes lo manipulan.

CAJA 7.7. ¿LA ENERGÍA NUCLEAR ES ENERGÍA LIMPIA?

Los procesos que comprende el ciclo de vida de la energía nuclear son los siguientes (Martínez y Quintana, 2012):

La minería, la molienda y el enriquecimiento; posteriormente, la fabricación del combustible. Entre estos procesos, el que más energía consume es el del enriquecimiento del uranio, pues ocurre en plantas de tratamiento muy grandes que requieren la circulación de millones de litros de agua refrigerante, por lo que consumen una gran cantidad de electricidad para el funcionamiento de bombas y condensadores. Este conjunto de procesos son los que contribuyen con un 38% de las emisiones de CO₂ del ciclo de vida de una planta nuclear.

Proceso de operación. Como una planta nuclear funciona con la fusión de átomos de uranio enriquecido, virtualmente no se emiten gases de efecto invernadero durante su funcionamiento. Sin embargo, se estima que un 17% de las emisiones provienen de plantas eléctricas de respaldo que utilizan combustibles fósiles.

Procesos posteriores. El reprocesamiento del combustible y la eliminación de residuos aporta un 14% de las emisiones totales, y el desmantelamiento de la planta nuclear (una vez terminada su vida útil) emite otro 18%.

7.4.2. Extracción y reservas uranio a nivel global y en México

¿Desde cuándo se explota el uranio? ¿Todos los países en el mundo lo explotan? ¿La extracción de uranio es netamente para producción de electricidad, o hay intereses bélicos involucrados?

A nivel mundial los recursos de uranio aumentaron ligeramente a partir de 2011 a un total de 7.6 millones de toneladas (OECD, 2014). Kazajistán, en la actualidad, es el principal país productor del mundo y diez países representan aproximadamente el 97% de la producción mundial (figura 7.4).

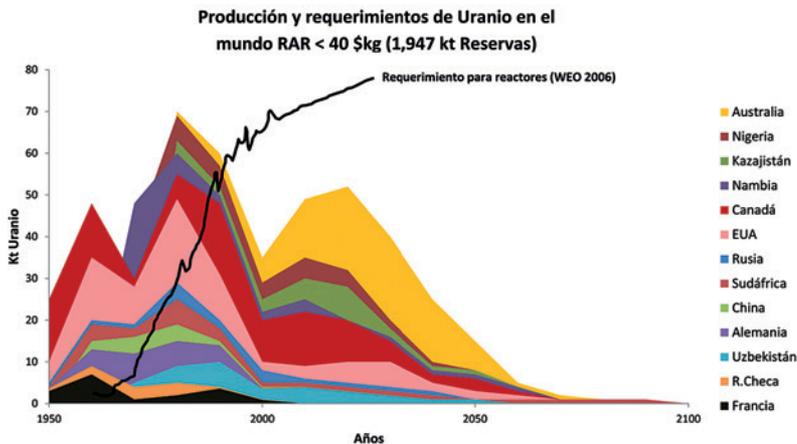


Figura 7.4. Producción mundial de uranio y consumo de reactores.

Fuente: OECD (2014).

En México los principales yacimientos se localizan en los estados de Sonora, Durango, Chihuahua, Coahuila y Oaxaca.

La Constitución mexicana establece que la energía nuclear sólo podrá ser utilizada para fines pacíficos, esto se reitera en la Ley de 1984 sobre las actividades nucleares. México firmó un Tratado de No Proliferación Nuclear (1969, 2004), además somos parte de la Convención sobre la Protección Física de los Materiales Nucleares (1979, 1988) y depositario del Tratado de Prohibición de Armas Nucleares en América Latina (Tratado de Tlatelolco, 1967).

El interés del país en materia de energía nuclear se basa en la necesidad de reducir su dependencia de las fuentes de energía convencionales (básicamente fósiles). En los últimos años la energía eléctrica en México depende cada vez más del gas natural. En 1972 se tomó la decisión de construir la primera central nuclear para generación de energía eléctrica, su objetivo fue generar electricidad con calidad por medios nucleares a un mínimo costo. Debido a varios retrasos, la planta en Laguna Verde, Veracruz, se abrió el 14 de abril de 1990. El proyecto fue en su momento una obra muy importante de la Comisión Federal de Electricidad porque significó una tecnología fuera de lo convencional en materia de generación de energía.

CAJA 7.8. CENTRAL NUCLEAR DE LAGUNA VERDE

La Central Nuclear de Laguna Verde en Veracruz, México, cuenta con dos reactores: la unidad I (1990) y la unidad II (1995) con capacidad de 682 MW cada uno.

- El tipo de reactores es BWR/5 (Reactor de agua ligera en ebullición).
- Potencia térmica por reactor: 2,027MWt.
- Carga inicial de combustible por reactor: 444 ensamblajes; 92tn de combustible (UO₂) al 1.875 U235 en promedio.

7.4.3. El pico del uranio

¿Cuánto tiempo falta para alcanzar el pico del uranio... o ya lo pasamos? ¿Qué se espera cuando ya no exista uranio disponible? ¿El uranio es la respuesta a las necesidades energéticas del ser humano?

El pico del uranio se espera dentro de los próximos diez años, aunque puede alargarse si su precio aumenta en el mercado. El uso de la energía nuclear parece tener más pasado que futuro, es por esto que las energías renovables cobran tanta fuerza.

Actualmente los reactores nucleares consumen más uranio del que se extrae. Su operación continúa debido a que se están utilizando las reservas secundarias, es decir, las reservas que se tenían desde 1980 y antes. Sin el abastecimiento del uranio a las centrales nucleoelectricas, algunas tendrán que cerrar.

Como mencionan Martínez y Quintana (2012), la energía nuclear no es necesariamente una opción adecuada frente a la emisión de gases de efecto invernadero, pues ella misma no está exenta de este tipo de emisiones, si consideramos su ciclo de vida. Además existe el riesgo de accidentes, con daños a la humanidad y al ambiente muy graves como los ocurridos debido al accidente de Chernóbil. De igual forma, hasta el momento no existen repositorios de largo plazo para los desechos radiactivos.

Como hemos visto, en general los combustibles agotables presentan formas de energía de alta calidad (hay que recordar la segunda ley de la termodinámica) por lo cual para hacer un uso más racional de estos recursos es necesario preguntarse cuáles son las tareas para las cuales son más apropiados. Dada su calidad, las tareas más apropiadas para los combustibles fósiles son para realizar trabajo mecánico y para proporcionar calor a altas temperaturas. Otras tareas como el calentamiento de espacios (a bajas temperaturas) o el calentamiento de agua para lavado o para duchas son tareas ineficientes para los combustibles fósiles desde el punto de vista de la segunda ley de la termodinámica. Para tareas como estas últimas existen fuentes de energía que son más acordes (con mayor eficiencia de la segunda ley), como es el caso de la energía solar, una fuente de energía renovable. Los recursos energéticos inagotables se presentan en las secciones subsecuentes de este capítulo.

7.5. RECURSOS RENOVABLES

Como se ha mencionado anteriormente, la seguridad energética constituye un tema crucial en las agendas políticas internas y externas de los países; tiene que ver, principalmente, con la preocupación mundial por el crecimiento poblacional, el agotamiento de los energéticos convencionales, la oscilación de los precios del petróleo y el cambio climático (Coviello *et al.*, 2012). Sin embargo, satisfacer la demanda de energía de la sociedad actual constituye todo un reto tecnológico, sobre todo dado el constante aumento de la demanda energética que se ve impulsado por el crecimiento demográfico (9 mil millones de personas para el 2050) y económico predominante en los países en vías de desarrollo y los altos niveles de consumo en los desarrollados.

Para un sector de la población mundial, la electricidad constituye el recurso energético más valioso con fines de satisfacer necesidades básicas como alimentación, salud, vivienda y transporte; lo que, en combinación con la fuerte dependencia que tiene el sector eléctrico de los combustibles fósiles, hace que su disponibilidad esté condicionada y dependa de factores políticos, económicos y sociales. Al mismo tiempo, la incertidumbre en el éxito de la extracción petrolera en aguas profundas y la grave contaminación asociada a los procesos de transformación energética hacen más complejo el escenario. Para un sector de la sociedad en los países en desarrollo, la marginación social y económica les impide tener acceso a la electricidad, viéndose obligados al uso de leña para satisfacer necesidades tan básicas como la alimentación. Esta situación impacta muchas veces en el deterioro del ambiente al hacer de dicho consumo una actividad desmedida o incluso en problemas de salud al no hacerlo de forma segura y controlada.

Ante esta realidad, los países requieren no solo una transición en su modelo energético basado en fuentes renovables, sino también un cambio en sus consumos, lo que permitiría disminuir los impactos ambientales, reducir los costos de generación y uso de la electricidad, además de resultar de más fácil acceso para todos los lugares ya que su fuente son los fenómenos naturales, como la radiación solar, el viento, el calor interno de la tierra, la fuerza de gravedad, la energía cinética y potencial del mar; por ello, la materia prima puede considerarse gratuita. Una desventaja es su intermitencia; por ejemplo, durante la noche no se tiene radiación solar. Lo anterior vuelve necesario la implementación y uso de sistemas híbridos, es decir, compuestos por uno o más dispositivos capaces de aprovechar distintas fuentes renovables o el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía.

A nivel mundial y según el *Reporte anual de la situación mundial de las energías renovables 2016* (REN21, 2016), el 2015 fue un año récord para las instalaciones de energía renovable, convirtiéndose también en el primer año con reducción de emisiones contaminantes durante un periodo de crecimiento económico global, situación también motivada por la disminución del consumo de carbono por parte de China. La capacidad de generación de este tipo de energía experimentó el máximo crecimiento de todos los tiempos, el cual se estima en 147 gigavatios (GW) añadidos. Del mismo modo, la capacidad moderna de generación de calor mediante fuentes renovables continúa al alza, mientras que el uso de las energías renovables se extendió también en el sector del transporte. La energía renovable distribuida

avanza rápidamente para así reducir la disparidad entre los que tienen y los que no tienen acceso a materia energética. El cuadro 7.6 muestra un acumulado de las inversiones, potencia (GW eléctrico y térmicos) y litros de biocombustible (para el sector transporte) desde 2004 hasta 2013 y 2014.

CUADRO 7.6
COMPARATIVO DEL ACUMULADO DE INVERSIÓN, POTENCIA
(GW ELÉCTRICO Y TÉRMICOS) Y LITROS DE BIOCOMBUSTIBLE
(PARA EL SECTOR TRANSPORTE) DESDE 2004 HASTA 2013 Y 2014

		Inicio 2004	2013	2014
Inversión				
Nueva Inversión (anual) en energía renovable y combustibles	Mil millones de dólares	45	232	270
Capacidad de energía renovable (total sin incluir la hidroeléctrica)	GW	85	560	657
Capacidad de energía renovable (total incluyendo la hidroeléctrica)	GW	800	1,578	1,712
Capacidad Hidroeléctrica (total)	GW	715	1,018	1,055
Capacidad de Bioenergía	GW	<36	88	93
Generación de Bioenergía	TWh	227	396	433
Capacidad de energía geotérmica	GW	8.9	12.1	12.8
Capacidad de energía solar fotovoltaica (total)	GW	2.6	138	177
Capacidad de energía solar térmica (total)	GW	0.4	3.4	4.4
Capacidad de energía eólica (total)	GW	48	319	370
Calor				
Capacidad de calentamiento solar de agua	GWth	86	373	406

Transporte				
Producción de etanol (total)	Mil millones de litros	28.5	87.8	94
Producción de biodiésel (total)	Mil millones de litros	2.4	26.3	29.7

Fuente: REN21, 2016.

¿Qué es el REN21? Publicado por primera vez en 2005, *el Reporte anual de la situación mundial de las energías renovables* es el panorama más completo y actualizado sobre la situación de los avances recientes y las tendencias en los mercados de energías renovables, industrias, inversiones y desarrollo de políticas a nivel mundial. Por su diseño, no proporciona ningún tipo de análisis o pronóstico. Los datos proporcionados se basan en una red internacional de más de 700 colaboradores, investigadores y autores.

En particular para nuestro país, la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés) con base en datos de la Secretaría de Energía (Sener) afirma en su informe anual 2015 (IRENA, 2015), que México podría generar para 2030 hasta el 46% de su electricidad desde fuentes renovables, de los cuales un 26% sería a partir de fuentes eólicas y solares, 12% de hidroeléctricas, 5% de energía geotérmica y 2.5% de biomasa; lo anterior daría como resultado una reducción del 62% en la demanda de carbono, 21% la de gas natural y 6% de petróleo. El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP por sus siglas en inglés) en su reporte “Tendencias mundiales en las inversiones de energía renovable 2016” (figura 7.5) menciona que en 2015, México entró al grupo de los 10 países que más invierten en proyectos de energía renovable, donde se encuentran China, Estados Unidos, Japón, Reino Unido, India, Alemania, Brasil (mayor inversor en América Latina), Sudáfrica, y Chile; alcanzando una inversión histórica de 4 mil millones de dólares (105% más de lo invertido un año antes) de la mano de Nacional Financiera en nueve proyectos de energía eólica, lo que le permitió compartir con Chile y Sudáfrica el título de los tres “nuevos mercados” con mayor inversión en el tema (FS-UNEP, 2016).

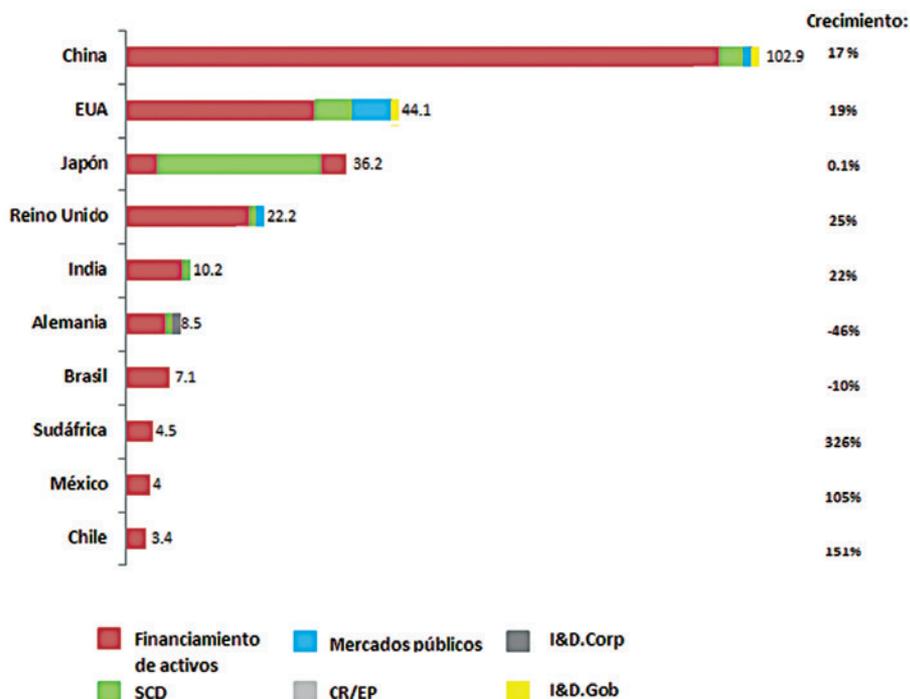


Figura 7.5. Inversiones en energías renovables por país durante 2015 y su porcentaje de crecimiento con respecto a 2014, cifras en miles de millones dólares (usd).

Fuente: UNEP (2016)

En diciembre del 2015 el congreso mexicano aprobó la Ley de Transición Energética (LTE), que establece medidas para acelerar la transición energética hacia fuentes no fósiles, particularmente renovables, a través del uso de tecnologías limpias, con objeto de: aumentar la seguridad energética, aprovechar recursos naturales abundantes en el país, preparar al país ante un escenario de regulación climática internacional y contribuir a la generación de empleo. Para lograr los objetivos previamente mencionados, se cuenta con una meta legal para incrementar el porcentaje de energías no fósiles en el portafolio de fuentes primarias de energía para la generación de electricidad en por lo menos 35% al 2024 y que ese porcentaje aumente a 60% para el 2050 (DOF, 2013).

7.5.1. Energía inagotable

Llamaremos energía inagotable a aquella que se obtiene a partir de corrientes de energía continuas y recurrentes en el mundo natural, y donde dichas corrientes se restablecen al mismo ritmo con el que se utilizan (Twidell y Weir, 1986; Sorensen, 2000). Podemos dividir a las fuentes renovables en cuatro grandes ramas: aquella proveniente de la radiación solar (directa: sistemas de concentración solar, fotovoltaicos, eólicos; e indirecta: biomasa), la que proviene del calor interno de la tierra (geotermia), la que aprovecha la fuerza gravitacional en combinación de reservorios de agua (hidráulica y minihidráulica) y la debida a la rotación de la Tierra (maremotriz).

En las siguientes secciones se darán algunos de los principios físicos básicos que ayudan a explicar y entender los mecanismos de generación y aprovechamiento de cada una de ellas.

7.5.1.1. Radiación solar

Se estima que la radiación solar incidente sobre la Tierra equivale a 170×10^{15} W, de los cuales 50×10^{15} W son reflejados y de los restantes 120×10^{15} W, 80×10^{15} W constituyen radiación fotónica (directa) y 40×10^{15} W son absorbidos por la atmósfera y los mares (difusa), generando procesos de evaporación (responsables de la formación de nubes) y de calentamiento diferencial (responsable de la formación de vientos y estos a su vez de oleaje) (figura 7.6).

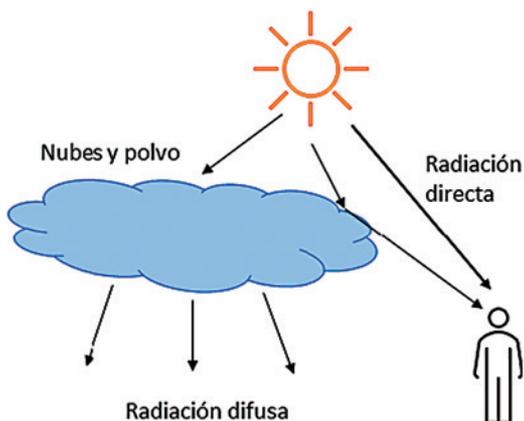


Figura 7.6. Origen de la radiación directa y difusa.

El flujo de energía por segundo debido a dicha radiación solar fuera de la atmósfera y sobre un área unitaria localizada a una distancia media entre la Tierra y el Sol es comúnmente llamado constante solar y tiene un valor de $G = 1367 \text{ W/m}^2$. Dicho valor cobra relevancia dado que en función del área de captación (A), es posible determinar la máxima potencia teórica (P_{max}) que puede obtenerse a través de la siguiente ecuación:

$$P_{\text{max}} = G \cdot A$$

Dependiendo de la tecnología a usar es el valor de la potencia final a obtener, viéndose limitada por la eficiencia del dispositivo; en particular, se tiene la tecnología de sistemas de concentración solar cuyo objetivo va desde la generación de calor residencial o de proceso hasta la generación de electricidad y la tecnología fotovoltaica capaz de generar electricidad en forma directa. Las siguientes secciones abordan las características principales de dichas tecnologías.

7.5.1.2. Sistemas de concentración solar: energía fototérmica

La radiación fotónica tanto visible como infrarroja puede ser aprovechada a través de sistemas o dispositivos que la transforman en calor sensible, el cual a su vez puede ser transferido a un fluido (aire, agua, sales fundidas, etcétera) y de esta forma generar vapor para alimentar una turbina y generar electricidad o mediante concentradores solares para suministrar calefacción o agua caliente a viviendas. Un ejemplo de un calentador solar para casa habitación puede observarse en la figura 7.7.

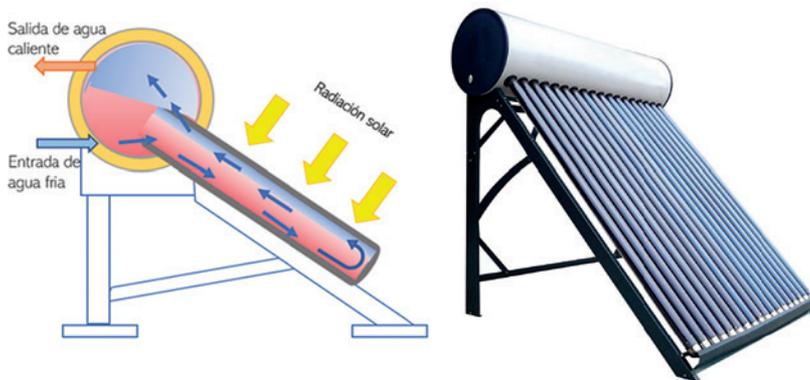


Figura 7.7. Calentadores solares para casa habitación de tubos evacuados y de placa plana.

Sus principales componentes son una placa receptora en contacto con una tubería de cobre con forma de “serpentín” o tubos de vidrio donde internamente se tiene una tubería de cobre por donde circula el agua que, gracias al efecto sifón, asciende y se guarda en un tanque de almacenamiento.

¿Cómo funciona un calentador solar?

Al calentarse el agua que circula en la tubería de cobre y volverse menos densa, asciende hacia el depósito, situado en su parte más alta. Si el agua del depósito está más fría y por lo tanto más densa, desciende por otro conducto a la parte baja del colector.

Por otro lado, el aprovechamiento de la energía fototérmica con fines de generación eléctrica se hace a través de dispositivos como son los sistemas de receptor central (SRC), los discos parabólicos (DP) y los concentradores parabólicos compuestos (CPC), entre otros. Dichos sistemas están constituidos básicamente por un colector (heliostato), un dispositivo que, utilizando el principio óptico de reflexión, concentra la radiación solar sobre una superficie receptora (torre central, motor Stirling, tubería, etc.) que se encuentra en contacto con fluidos de trabajo capaces de absorber calor y cambiar su estado líquido a vapor. Ejemplos de ellos pueden verse en la figura 7.8.



Figura 7.8. De izquierda a derecha: sistemas de receptor (torre) central, disco parabólico y concentradores parabólicos compuestos.

7.5.1.2. Sistemas fotovoltaicos

El efecto fotovoltaico fue reconocido por primera vez en 1839 por el físico francés Becquerel, pero la primera celda solar no se construyó sino hasta 1883 por Charles Fritts y presentaba una eficiencia de sólo un 1%. En 1905 Albert Einstein dio la explicación teórica del efecto fotoeléctrico y en 1946 Russell Ohl patentó la celda solar moderna.

Las actuales celdas, donde la radiación visible es transformada en corriente eléctrica directa, están fabricadas principalmente de un grupo de minerales semiconductores, de los cuales el silicio (Si) es el más usado y, dependiendo de su estructura cristalina, se clasifica en monocristalino, policristalino y amorfo, teniendo dimensiones del orden de centímetros. Las celdas monocristalinas se componen de secciones de un único cristal de silicio (Si) (reconocibles por su forma circular u octogonal, donde se aprecia que los lados son curvos, debido a que es una celda circular recortada), las policristalinas están formadas por pequeñas partículas cristalizadas y en las celdas amorfas el silicio no se ha cristalizado (ver figura 7.9).

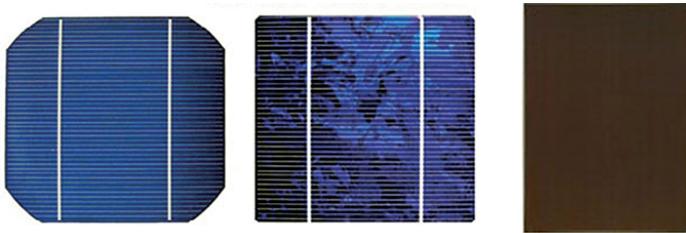


Figura 7.9. De izquierda a derecha: celda de Si monocristalino, policristalino y amorfo.

El rendimiento de una celda de área A_c se calcula sometiéndola en condiciones de laboratorio a una radiación constante de $G_{cte}=1\text{kW}/\text{m}^2$ y midiendo la potencia entregada P_{out} , de tal forma que la eficiencia es:

$$\eta = \frac{P_{out}}{A_c G_{cte}}$$

En la mayoría de las aplicaciones es necesario determinar la P_{out} que pueda entregar una celda en determinada zona geográfica, para lo cual es necesario multiplicar la eficiencia (reportada por el fabricante) por la constante de radiación para dicha zona y por su área. Las celdas se interconectan y ensamblan formando lo que se conoce como módulos o paneles fotovoltaicos (FV) con dimensiones de m^2 . El rendimiento de los módulos con base en Si monocristalino puede ser de hasta 20%, mientras que el de los basados en Si amorfo puede no llegar al 10%; en gene-

ral los módulos comerciales son capaces de entregar potencia eléctrica en el orden de cientos de Watts.

Los módulos se montan sobre estructuras metálicas (típicamente de aluminio para evitar corrosión) en la parte elevada de las edificaciones y con una orientación hacia el sur (si se instalan en algún punto del hemisferio norte), con un ángulo de inclinación igual al ángulo de la latitud del lugar en cuestión. Por ejemplo, para Morelia la latitud es aproximadamente de 19.657° Norte. En la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia de la UNAM se cuenta con un sistema fotovoltaico interconectado (SFVI) a la red eléctrica nacional, con una capacidad máxima de 35 kW obtenida de los 132 módulos fotovoltaicos de silicio policristalino, todos con una eficiencia del 14%. La figura 7.10 muestra parte del SFVI.



Figura 7.10. Parte del SFVI de la ENES Unidad Morelia de la UNAM.

De los SFVI es posible obtener corriente eléctrica continua o directa (CD), la cual a través de un circuito inversor se transforma en corriente alterna (SFVI), que puede ser distribuida a través de la red eléctrica nacional para ser utilizada en nuestras necesidades, por ejemplo, en los sistemas de iluminación, contactos y demás dispositivos eléctricos o electrónicos. La figura 7.11 muestra el inversor usado en el SFVI.



Figura 7.11. Equipo inversor marca Fronius para convertir de CD a CA, instalado en el SFVI de la ENES Unidad Morelia.

La energía fotovoltaica hoy en día tiene un impacto ambiental favorable, ya que no genera ningún ruido o químico contaminante durante su uso, si bien debe considerarse que sí existen impactos en otras etapas de su ciclo de vida como es durante la obtención de sus materiales, su procesamiento, distribución y disposición final. Es una de las tecnologías de energía renovable más viables para su uso en un entorno urbano, en sustitución de los materiales de construcción de revestimientos existentes. Otra característica es que es un recurso limpio de bajo costo de mantenimiento que puede satisfacer la demanda eléctrica en México, por lo que podría ser una solución para disminuir el empleo de energía eléctrica que se genera mediante energía fósil. Sin embargo, vale la pena mencionar la intermitencia en la generación, puesto que la intensidad de la radiación solar varía durante el día y hace que la potencia entregada tenga un comportamiento similar. La figura 7.12 muestra la potencia generada por el SFVI de la ENES el mismo día de dos años consecutivos, claramente se ve una diferencia entre los valores.



Figura 7.12. Generación del sistema FV de la ENES para el mismo día calendario de dos años distintos.

7.5.2. Sistemas eólicos

El principal representante de este tipo de energía es lo que se conoce como aerogenerador o turbina eólica, responsable de transformar la energía cinética del viento (energía eólica) a eléctrica. En general, los aerogeneradores se clasifican en tres tipos de acuerdo con la posición de su eje de giro respecto a la dirección del viento (Manwell *et al.*, 2009): turbinas de eje horizontal (HAWT, por sus siglas en inglés), turbinas de eje vertical (VAWT, por sus siglas en inglés) y aerogeneradores especiales o turbinas eólicas acopladas. La figura 7.13 muestra algunos ejemplos representativos de cada tipo.



Figura 7.13. Parque Eólico Tres Mesas III (Fuente: SENER).

Los aerogeneradores más comunes en aplicaciones a gran escala son los de eje horizontal, cuyos principales componentes son: rotor (palas o álabes y el eje de soporte), tren de transmisión (engranes, partes mecánicas, generador, etc.), cubierta principal, torre, cimientos y cuarto de control. Los desarrollos comerciales pueden ir de unos cuantos kW hasta 500 kW o 2 MW para los instalados en grandes parques eólicos.

La eficiencia teórica de los aerogeneradores es del 59%, valor dado por lo que se conoce como el límite de Betz (Betz, 1996); sin embargo, los desarrollos comerciales más eficientes van desde el 35% hasta el 40%.

Algunos parámetros importantes a considerar para el uso de aerogeneradores son: la velocidad mínima a la cual comienza a trabajar la turbina (normalmente llamada velocidad de corte) que es del orden de 2.5 m/s, la velocidad máxima a la que se detiene (*cut-out*) para protegerse y mantener su operación segura puede ser del orden de 25 m/s, y la velocidad promedio que es a la que se tiene una generación estable. Los valores exactos son reportados por el fabricante y dependerán del tipo y modelo de aerogenerador, usualmente se presentan en forma de tabla o mediante una gráfica como la mostrada en la figura 7.14.

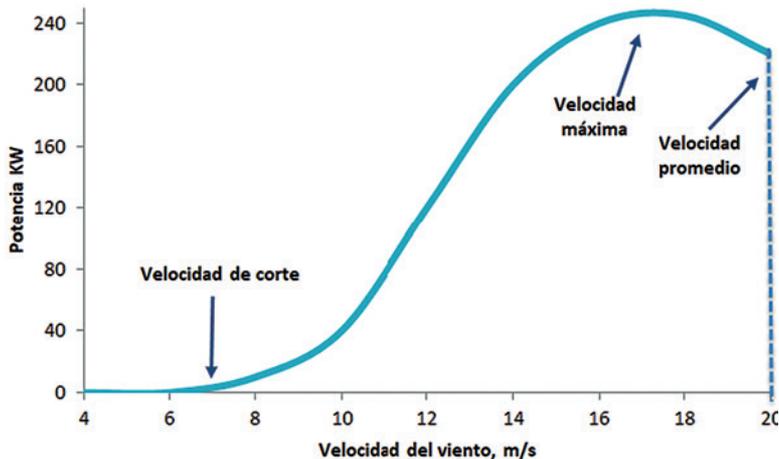


Figura 7.14. Curva potencia vs. velocidad del viento, se muestran los valores para la velocidad de corte, máxima y promedio.

Como puede verse de la figura anterior, la potencia entregada por un aerogenerador Pout depende de la velocidad del viento que incide sobre él; la potencia máxima que puede obtenerse en cierta región donde se encuentra instalado un aerogenerador está dada por la ecuación:

$$P_{max}=(1/2)A\rho V^3$$

donde A es el área de la sección transversal generada por la rotación los álabes, ρ es la densidad del aire y V es la velocidad del viento. De tal forma que a través de la eficiencia reportada por el fabricante es posible determinar la potencia obtenida.

7.5.3. Bioenergía

La bioenergía es otra una forma en la que podemos beneficiarnos de la energía del sol, ya que es, como su nombre lo indica, energía solar capturada en la biomasa. En el reino vegetal, por medio del proceso fisiológico de la fotosíntesis se crea y almacena biomasa a partir de bióxido de carbono atmosférico, luz solar y agua. La biomasa dentro del sector energético refiere al material biológico del que se puede obtener energía. Como definición para este documento, la bioenergía se debe acotar a los diferentes tipos de biomasa que se conocen, dejando de lado, en este caso, la energía biológica del adenosín trifosfato (ATP por sus siglas en ingles) que también es bioenergía, pero a nivel de fisiología celular.

Hablar de la bioenergía es referir a una de las primeras formas de energía que el hombre utilizó. Esta fue determinante para su protección: iluminar espacios, calefacción y para la cocción de alimentos. Se sabe que hace 790 mil años el *Homo erectus* aprendió a producir y controlar el fuego, le costó casi un siglo de aprendizaje, pues antes solo podía desviarlo y ampliarlo cuando era provocado por rayos o la lava de algún volcán. El *Homo sapiens* tomó e imitó este conocimiento de los otros homínidos y lo ha seguido usando hasta el presente.

Previo a la revolución que provocó el uso del petróleo y sus derivados en los siglos del auge de los hidrocarburos, la participación de la bioenergía como fuente de energía a nivel mundial fue mucho mayor que la actual. Sin embargo, el uso de biomasa en el sector doméstico prevalece y ha continuado vigente, sobre todo los biocombustibles sólidos como la leña y el carbón. En la actualidad la bioenergía provee del 10 al 15% del suministro total de energía a nivel mundial (REN21 2016).

De acuerdo con la FAO, la población mundial actual alcanzará 8.3 miles de millones de personas en el 2030 (FAO, 2019), lo que se traduce en una mayor demanda de energía, sobre todo en países en desarrollo donde la biomasa es el principal combustible para satisfacer tareas energéticas, por lo que es difícil pensar en que el uso de la bioenergía vaya a disminuir en el futuro cercano. Volviendo a la leña, este biocombustible es el ancestro de toda la bioenergía.

A diferencia de otras fuentes renovables, la biomasa es más versátil, de manera que a partir de diferentes rutas de procesamiento se pueden obtener de ella biocombustibles tanto líquidos como sólidos y gaseosos. La energía química de los biocombustibles tiene uso directo en aplicaciones térmicas (como fuego a partir de la leña), o indirecto, que implica algunas transformaciones de la biomasa por agentes biológicos para obtener biogás o termoquímicas para producir biocombustibles líquidos y carbón. Técnicamente toda biomasa podría producir biogás, lo cual puede dar pie a aplicaciones térmicas o para producir electricidad.

Una forma adicional de clasificar los tipos de biocombustibles, además de su estado físico, es con base en la tecnología empleada para su fabricación. Por medio de dichas tecnologías se obtienen: biocombustibles de primera, de segunda y de tercera generación (cuadro 7.7) con aplicaciones en los sectores industrial, transporte y doméstico.

CUADRO 7.7
CLASIFICACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES
POR PROCESOS TERMO Y BIOQUÍMICOS

BIOCOMBUSTIBLE	SÓLIDO	LÍQUIDO	GASEOSO
1ª. Generación	Leñas, carbón vegetal, densificados (pellet y briqueta)	Bioetanol, biodiésel, licor negro	Biogás, gas de síntesis
2ª. Generación	Biochar, torrefactos, torpellets	Bioetanol celulósico, syndiésel, aceite de pirolisis	Biometano
3ª. Generación		Biodiésel y bioetanol de algas	Biohidrógeno

Fuente: Tomado de García y Masera (2016).

Un aspecto indisoluble de la bioenergía es la tecnología. Dependiendo del grado de transformación física o química, cada biocombustible requiere de un tipo tecnológico particular para producirlo y otro distinto y especializado para su aprovechamiento. Por lo tanto, es necesario dimensionar a la tecnología y la bioenergía como un binomio que debe fortalecerse para que esta tecnología pueda mejorar su eficiencia y, con ello, se aproveche el mayor potencial de la biomasa.

La tecnología asociada a la bioenergía tiene diferentes niveles de desarrollo y maduración. Por ejemplo, en el caso de los combustibles sólidos; para la generación de energía térmica (calor), la investigación y desarrollo tecnológico (I+D) ha avanzado mucho más con respecto a los líquidos y gaseosos, pero requiere que los procesos y los dispositivos sean más eficientes. Respecto a la electricidad para iluminación y a la movilidad con bioetanol, biodiesel y biogás, es necesaria mayor inversión en I+D para adaptar la tecnología y aumentar la eficiencia.

La bioenergía podría incrementar su participación en el energético mundial bajo los actuales esquemas de crecimiento poblacional y de diversificación de la matriz energética. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía, se estima que para el año 2050 el potencial técnico de la bioenergía será de 500 EJ año^{-1} (IEA, 2012). En México, la participación de la biomasa en la oferta de energía primaria nacional para el 2013 fue de 4.22%; de esta cifra, la leña para usos tradicionales representó el 2.83%, y en segundo lugar, el bagazo de caña para la cogeneración, el 1.37% (Sener, 2013b). Por lo tanto, al igual que en el esquema internacional, México tiene un área con potencial de generación de energía a partir de biocombustibles.

La fuente de biomasa con potencial de crecimiento y participación en la generación de bioenergía es el sector forestal mexicano, principalmente aportando biocombustibles sólidos. La cifra del potencial productivo forestal varía dependiendo del autor, pero se estima entre 56 y 212 millones de $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$ (Chapela, 2012; Johnson *et al.*, 2009). Con base en la productividad, García y Masera (2016) y Rembio (2011) plantean que en México hay un potencial de generación de energía entre 1,135 y 1,923 PJ año^{-1} , derivados del manejo de bosques y de la industria forestal.

En el terreno de los gases de efecto invernadero, se espera un papel único de la bioenergía dentro de la oferta de los energéticos porque sus características naturales y la tecnología para su aprovechamiento, son un binomio para disminuir y sustituir las emisiones ocasionadas por la quema de combustibles fósiles. De acuerdo con el IPCC la mayor emisión de GEI globales provienen del consumo de los

hidrocarburos del petróleo, la cual se estima en 60%. La bioenergía puede ayudar a reducir la cifra, en algunos casos puede sustituirla y en otros escenarios puede capturar carbono atmosférico durante el crecimiento biológico. Por lo tanto, teóricamente, su uso proporciona beneficios ambientales que la hacen particularmente interesante como combustible.

La bioenergía aún enfrenta retos técnicos para cumplir con el papel de la mitigación de gases de efecto invernadero. Primero, el biocombustible debe estar vinculado a una tecnología eficiente; segundo, debe asegurar su producción y disponibilidad; y, tercero, debe superar barreras de percepción socioeconómica como impactos negativos a la salud, al ecosistema y de precios. Johnson *et al.* (2009) estiman que la producción de calor y electricidad a partir de biocombustibles sólidos podría tener una mitigación de 25 Mt CO₂ año⁻¹, una vez superadas las barreras señaladas.

La neutralidad en las emisiones de GEI y la sustentabilidad de la bioenergía siguen siendo temas controversiales. Las respuestas dependen en gran medida de los escenarios, de la tecnología usada, de la cadena bioenergética y del tipo de biocombustible. Un aspecto singular de la bioenergía cuando se clasifica como parte del grupo de las fuentes renovables de energía tiene que ver con su producción. A diferencia de la solar o la del viento, la biomasa no es renovable *per se*, por lo que no se ubica al mismo nivel y para obtenerse depende de luz solar, agua, suelo, clima y la genética de los organismos. Por lo tanto, para hablar de la biomasa como un recurso renovable, se debe plantear primordialmente el manejo sustentable del recurso, tras cumplirse esta condición, la bioenergía puede ser definida como renovable.

7.5.4. Sistemas geotérmicos

La fuente de la geotermia es el calor natural producido en el interior de la Tierra (comúnmente llamado magma), responsable de calentar rocas o reservorios de fluidos confinados, los cuales dan origen a la formación de fumarolas, manantiales termales, géiseres e incluso volcanes; todos ellos conforman los sistemas geotérmicos.

Se estima que el contenido total de calor de la Tierra es de 12.6×10^{12} EJ, mientras que en la corteza terrestre se ha estimado en 5.4×10^9 EJ (Dickson y Fanelli, 2004). Sin embargo, dada la baja conductividad térmica de la roca, el flujo de calor

promedio que se da través de la corteza terrestre es de 59 mW/m^2 (MIT, 2006), situación que garantiza que mientras se aprovechen de forma sustentable, los sistemas geotérmicos constituyen una fuente de energía inagotable.

En México la geotermia se usa para generar energía eléctrica desde 1959, con la primera unidad geotermoeléctrica en el país de 3.5 MW de capacidad, instalada en el campo geotérmico de Pathé, Hidalgo. Actualmente, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) opera 38 unidades con una capacidad instalada total de 965 MW, distribuidas en cuatro campos: Cerro Prieto (Baja California) con 720 MW, Los Azufres (Michoacán) 195 MW, Los Humeros (Puebla) 40 MW y Las Tres Vírgenes (Baja California Sur) 10 MW (Santoyo y Barragán-Reyes, 2020). Recientemente se contempla explotar la zona de Cerritos Colorados (Jalisco).

Hemos revisado las fuentes de energía inagotable y sus principales tecnologías, ahora podemos preguntarnos sobre su desempeño en términos de eficiencia. Desde el punto de vista de la eficiencia de la segunda ley de la termodinámica, los sistemas eólicos e hidroeléctricos cuentan con altas eficiencias (la conversión de energía cinética en energía eléctrica), con valores cercanos al 90%. Las aplicaciones de usos finales más adecuadas son para la generación de trabajo, por ejemplo, en usos en motores o bombas. Por su parte los sistemas fotovoltaicos y termosolares son menos eficientes para convertir la energía solar en energía eléctrica ya que sus eficiencias se encuentran entre el 6 y 25% y 10 y 30% respectivamente (Rosen y Bulucea, 2009). Los sistemas solares para el calentamiento de agua presentan mejores eficiencias al compararse con sistemas basados en gas LP para calentamiento de agua a temperaturas bajas, como sería el caso de calentamiento de agua para aplicaciones a nivel residencial. Es importante que los recursos energéticos sean empleados para satisfacer aquellas necesidades energéticas para los cuales son más adecuados. De esta forma haríamos un uso más eficiente de las fuentes de energía.

7.5.5. Energía del agua

Después de la bioenergía, quizá la segunda forma de energía que el hombre utilizó fue la energía del agua. Los molinos para moler granos debieron ser las primeras transformaciones que la humanidad realizó en el medio acuoso para aprovechar y sacar beneficio de la fuerza del agua de los ríos. Posteriormente y con más tecnología se pudo generar electricidad. En la actualidad estamos explorando

cómo hacer más eficiente la obtención de electricidad aprovechando la energía cinética del agua.

En esta sección hablaremos del potencial energético que contiene el agua para generar electricidad mediante un manejo adecuado. No hablaremos de la separación de las moléculas para obtener energía a partir de hidrógeno atómico, lo cual es técnicamente posible, pero sigue siendo un tema de investigación y de desarrollo tecnológico.

El ser humano ha logrado sacar múltiples beneficios del agua, los cuales van más allá de su consumo directo e indirecto en la agricultura, la ganadería y la industria. Los recursos hídricos nos permiten además obtener energía como la eléctrica por medio de centrales hidroeléctricas y minihidráulicas, mareomotriz y de las olas. Y lo hemos logrado porque como se explicó en el capítulo 1 de termodinámica, aprendimos a generar “contrastos” para obtener la energía del agua.

7.5.5.1. Hidroeléctricas y minihidráulicas

Las centrales hidroeléctricas y las minihidráulicas generan electricidad a partir de los cuerpos de agua continentales, es decir, del agua que fluye por los ríos. En el caso de las hidroeléctricas, se debe crear un salto de agua para aprovechar la energía cinética contenida, por eso está muy relacionado el término hidroeléctrica con una presa, que como su nombre lo indica, se construye una barrera que retiene el cauce de agua. El salto se origina en el momento en que la barrera (pared de la presa) permite fluir un caudal de agua de forma controlada y aprovechar la energía cinética que, al pasar y mover las aspas de una turbina genera electricidad, misma que se incorpora a la red de distribución eléctrica.

Los principales productores mundiales de energía hidroeléctrica son Canadá, Brasil, Estados Unidos y China. Los factores que determinan la cantidad de energía que proporciona una central hidroeléctrica son la altura del salto del agua y el volumen del caudal. La presa del Itaipú (en conjunto Brasil y Paraguay) tiene una altura de 196 metros y 8 km de largo.

Una forma de clasificar a las centrales hidroeléctricas es, a) las de agua fluyente —se construyen las presas para detener y controlar el agua y cauce de los ríos— y b) las de agua embalsada —presas que pueden ser de regulación o de bombeo y en las cuales la energía hidráulica no se usa instantáneamente—. La potencia de generación es el modo de diferenciar a estas de la minihidráulica, ya que en estas últimas la potencia instalada es menor a 10 MW.

7.5.5.2. Energía de las mareas

La energía del agua también se puede obtener a partir de las mareas y las olas del mar, no solamente del cauce de los ríos. A diferencia de la fuerza de los ríos o el embalse del agua en las presas para producir electricidad, el agua para producir energía mareomotriz tiene una inercia un poco distinta. En los grandes cuerpos de agua, el movimiento de la masa de agua es provocado por influencia de los campos gravitatorios, fuerzas de atracción de la luna y del Sol que originan mareas altas y bajas cuando se combinan con la rotación de nuestro planeta. Debido a las fuerzas naturales que están implicadas, también forma parte de las energías renovables.

El aprovechamiento de la energía de las mareas no es reciente; en países europeos como Reino Unido y Francia, a mediados del siglo XVIII ya se tenían registros de la molienda de maíz por medio de la energía mareomotriz. La producción de electricidad es más reciente, a mediados de los años sesenta del siglo pasado es cuando se empieza a utilizar para estos fines.

La energía mareomotriz para generar electricidad se puede producir en instalaciones colocadas en estuarios marinos donde la marea cambia durante el día. El recurso hídrico es predecible, por lo que se puede planear las dimensiones de los sistemas para su aprovechamiento óptimo. Los sistemas utilizan hélices con diseños muy similares a las eólicas, con la salvedad que estas se mueven a menor intensidad por la mayor densidad del agua respecto al aire, de 1,000 veces es la diferencia, lo que no resta eficacia ya que es posible generar energía con estos dispositivos a una velocidad de 1 m/s.

La operación requiere la construcción de represas marinas, las cuales se llenan con la marea alta y ponen a trabajar las hélices situadas en las compuertas cuando se drenan en la marea baja. La energía eléctrica es generada por contraste de alturas del volumen del agua y es transportada al continente por una red de cables. Por ejemplo, la diferencia de altura de La Rance en Francia es de 5 m entre marea alta y baja; esto ha permitido su operación desde 1966, produciendo 6 Mega kWh.

Los impactos ambientales totales de este tipo de alternativa energética no se conocen del todo, más allá de los que se producen por la construcción de la tecnología, incluyendo emisiones de CO₂ y las alteraciones del flujo del agua en la operación, en el resto del sistema no se han evidenciado aún. Sin embargo, algunos grupos sociales y ecologistas ya reclaman impactos en el ecosistema marino por

los desplazamientos de los peces y las aves, la contaminación visual y la ocupación costera de las instalaciones mareomotrices.

El potencial mundial de energía de las mareas es del orden de 44 000 TWh por año (Nihous, 2007). Las restricciones técnicas y la localización de interconexión hacen que el potencial se reduzca considerablemente. A pesar de ello, existe un interés internacional en la construcción de infraestructura para aprovechar la energía en países con grandes zonas costeras como Rusia, Canadá, Estados Unidos, Argentina, Corea del Sur, Australia, Francia, China e India. El potencial se estima alrededor de 300 TWh por año, algunas obras de infraestructura ya están en curso, y otras son aún proyectos de gran escala.

La principal barrera para este tipo de energía es de índole económico porque el precio de producción actual es caro, incluso comparada con otras fuentes renovables.

7.5.5.3. Energía de las olas o energía undimotriz

El aprovechamiento de la energía del mar para producir electricidad a partir del oleaje es una alternativa que ha despertado interés debido al potencial energético que el mar puede proporcionar. La cantidad de energía es determinada por el tipo de oleaje: altura, velocidad, longitud de onda y densidad del agua. Se busca que las tecnologías para la obtención de la energía undimotriz para la generación de electricidad sean alternativas de bajo impacto y poco invasivas como las lagunas de marea, su diseño es en forma de embalses que no bloquean el flujo del agua y los rotores de las hélices se desplazan a menor velocidad. En este tipo de construcción la energía de la marea se obtiene de forma horizontal aprovechando el flujo natural del agua en la línea de costera, por lo que puede ser definido como la energía de las olas.

Las condiciones favorables para instalar tecnología para la obtención de energía de las olas son muy especiales, por lo que solo pueden ser ubicadas en determinadas zonas, donde el flujo y reflujos de las olas aumente la velocidad de la corriente natural y haga que las hélices se muevan de forma horizontal. Esto se logra en constricciones causadas por la cercanía de islas entre sí o con la línea costera que provoquen velocidades entre 2 y 2.5 m segundo⁻¹ en una profundidad de 20 a 35 m. Estas condiciones limitan la viabilidad de la construcción en cualquier zona.

Este tipo de obtención de energía de las olas no es una tecnología madura, se siguen probando prototipos sobre todo en Europa. Debido a las diversas condicio-

nes marinas, se han diseñado diversos prototipos, desde hélices ancladas al sustrato, flotantes, tipo mantarraya o hidropiano, túneles, etcétera. Estos prototipos tienen capacidades de generación diferentes. Al ser una tecnología reciente aún es muy costosa, por lo que las inversiones son a largo plazo.

Ejercicios

1. La planta de generación eléctrica Plutarco Elías Calles tiene una potencia de 2,770 MW y quema carbón bituminoso. La eficiencia global de la planta es de 36%. La planta opera con un factor de capacidad del 65%. a) Calcula la cantidad de carbón (en masa) quemado en la planta. b) Calcula las emisiones de CO_2 de la planta si el 67% de la masa del carbón es carbono y si el 100% del carbono en el carbón se convierte a CO_2 . c) Calcula la mitigación de CO_2 si la energía eléctrica proviene ahora de plantas de ciclo combinado con 57% de eficiencia, un factor de capacidad de 65%, que utiliza gas natural como combustible. Considera que el 74% del peso del GN es carbono y que el 100% del carbono en el gas natural se convierte en CO_2 .
2. Las reservas mundiales de carbón son de 861,000 millones de toneladas. a) Calcula las emisiones de CO_2 si todas las reservas de carbón se quemaran para producir energía. Considera que el 80% de la masa del carbón es carbono. b) ¿Cuánto aumentaría la concentración (en partes por millón en volumen, ppmv) de CO_2 en la atmósfera por la quema de todas las reservas de carbón? Recuerda que la masa de la atmósfera es de 5.2×10^{18} kg. c) Si la concentración actual de CO_2 en la atmósfera es de 400 ppmv, ¿qué porcentaje del carbón se podría quemar sin sobrepasar las 450 ppmv?
3. Las reservas de petróleo probadas de México son de 9,812.1 millones de barriles. a) Calcula las emisiones de CO_2 si todas las reservas se quemaran para producir energía. Considera que el 85% de la masa del petróleo es carbono, que el 100% del carbono se convierte en CO_2 y que la densidad del petróleo es de 0.85 kg/litro. b) ¿Cuánto aumentaría la concentración (en ppmv) de CO_2 en la atmósfera por la quema de todas las reservas?

4. Calcula la densidad de potencia que corresponde a un viento de 40 km/h. Justifica si dicha velocidad es suficiente para mover un aerogenerador.
5. ¿Con qué velocidad debe soplar el viento para poder obtener una P de 2000 W/m²? Si la velocidad del viento se redujese en un 10%, ¿en qué porcentaje se reduce la potencia? Densidad= 1,293 kg/m³.
6. Rayos de Sol con una irradiancia de 800 W/m² inciden durante 20 minutos sobre una superficie horizontal de 3.5 m² de área, formando un ángulo de 70° con la normal.
 - a) ¿Cuánta energía recibe dicha superficie?
 - b) ¿Para qué valor del ángulo la energía sería máxima?
 - c) Asumiendo el ángulo anterior, ¿cuánta energía se recibiría durante una hora?

Para discutir:

1. En México, ¿cuál es la central geotérmica con mayor producción de electricidad?
2. Menciona un instrumento para medir la radiación solar y unidades en que se mide.
3. Menciona al menos dos tipos de celdas solares basadas en la tecnología de silicio.
4. Menciona al menos dos marcas de fabricantes de aerogeneradores.

Para saber más

Se tienen registros históricos de que el petróleo era conocido y utilizado en la antigua Babilonia y en la región del Mar Caspio. Posteriormente, en el siglo XVIII se hicieron experimentos de destilación de bitumen y se observaron sus posibilidades para iluminación. En 1959 el petróleo fue descubierto en Norteamérica (en Titusville, Pennsylvania) por Edwin Drake, lo que dio origen a la industria petrolera moderna.

7.6. BIBLIOGRAFÍA

- AIE (Agencia Internacional de Energía). 2019. Unconventional Gas database. <https://www.iea.org/ugforum/ugd/united%20states/>
- AIE (Agencia Internacional de Energía). World Energy Outlook 2016: Transportation sector energy consumption. <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/transportation.pdf>
- BETZ, A. 1966. *Introduction to the Theory of Flow Machines*. D. G. Randall (trad.). Pergamon Press. Oxford.
- BOYLE, G., B. EVERETT, y J. RAMAGE. 2003. *Energy systems and sustainability*. Oxford University press. Oxford.
- BOYD, R. 2013. *Energy and the Financial System: What Every Economist, Financial Analyst, and Investor Needs to Know*. Springer. New York-London.
- BP (British Petroleum). 2015. *Statistical Review of World Energy 2015*. 64a edición
- BP (British Petroleum). 2019. *Statistical Review of World Energy 2019*. <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- BRANDT, A. R., G. A. HEATH, E.A. KORT, F. O'SULLIVAN, G. PETRON, S. M. JORDAN, P. TANS, J. WILCOX, A. M. GOPSTEIN, A. ARENT, S. WOFSY, N. J. BROWN, R. BRADLEY, G. D. STUCKY, D. EARDLEY, y R. HARRIS. 2014. Methane leaks from North American gas systems. *Science* 343: 733-735.
- CHAPELA, G. 2012. *Estado de los bosques de México*. Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible A. C. México.
- CNH (Comisión Nacional de Hidrocarburos). 2018. *El sector del Gas Natural, algunas propuestas para el desarrollo de la industria nacional*. Gobierno de México. México
- CNH (Comisión Nacional de Hidrocarburos). 2019. *Reservas de Hidrocarburos en México, Conceptos fundamentales y análisis 2018*. Gobierno de México. México.
- COVIELLO, M. F., J. GOLLÁN, y M. PÉREZ. 2012. *Las alianzas público-privadas en energías renovables en América Latina y el Caribe*. Colección Documentos de proyectos. CEPAL. Santiago.
- DAVIES, S., y C. SHEARER. 2014. A crack in the natural-gas bridge. *Nature*. 514: 436-437.
- DE LA VEGA NAVARRO, A., y J. RAMÍREZ-VILLEGAS. 2015. El Gas de Lutitas (Shale Gas) en México. Recursos, explotación, usos, impactos. *Economía UNAM*. 12(34): 79-105.
- DEL RÍO, F., y R. MAGAR. 2011. La encrucijada de la energía: 1. El pico del petróleo. En *Panorama Energético de México*. J. Flores Valdés. Consejo Consultivo de Ciencias. Presidencia de la República. México.

- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2013. Ley de transición energética, <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LTE.pdf>
- DICKSON, M. H., y M. FANELLI, 2004. *¿Qué es la energía geotérmica?* Istituto di Geoscienze e Georisorse / CNR / International Geothermal Association. Pisa.
- EIA (Energy Information Administration). 2013. *Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries Outside the United States*. EIA. Washington.
- ENERGY WATCH GROUP. 2006. Uranium resources and nuclear energy. EWG-Series No 1/2006. EWG-Paper No 1/06. Germany.
- ESTRADA, C., y J. ISLAS. 2010. *Energías alternas: Propuesta de investigación y desarrollo tecnológico para México*. Academia Mexicana de Ciencias. México.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2019. *El estado actual de la agricultura y la alimentación. Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma.
- FERNÁNDEZ, R., y L. GONZÁLEZ. 2014. *En la Espiral de la Energía Vol. 1: Historia de la humanidad desde el papel de la energía (pero no solo)*. Libros en Acción, Madrid.
- FERNÁNDEZ R., y L. GONZÁLEZ. 2014. *En la Espiral de la Energía Vol. 2: Colapso del capitalismo global y civilizatorio*. Libros en Acción, Madrid.
- FS-UNEP Collaborating Centre. 2016. *Global trends in renewable energy investment*. New Energy Finance. Bloomberg.
- GARCÍA, B., y O. MASERA (eds). 2016. *Estado del Arte de la Bioenergía en México*. Red Temática de bioenergía (RTB) del Conacyt. Imagia. México.
- GEA (Global Energy Assessment) 2012. *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*. Cambridge University Press / International Institute for Applied Systems Analysis, Cambridge-New York-Laxenburg.
- HALL, C. A. S. 2017. *Energy Return on Investment: A Unifying Principle for Biology, Economics and Sustainability*. Springer. New York-London.
- HALL, C. A. S., J. G. LAMBERT, y S. B. BALOGH. 2014. EROI of different fuels and the implications for society. *Energy Policy*, 64: 141-152.
- HOWARTH, R. W., y R. SANTORO. 2011. *Methane and the greenhouse-gas footprint of natural gas from shale formations*. School of Civil and Environmental Engineering-Cornell University. Ithaca.
- IEA (International Energy Agency). 2012. *Technology Roadmap. Bioenergy for heat and power*. IEA. Paris

- IEEFA (Institute for Energy Economics and Financial Analysis). 2019. Energy Market Update: More Red Flags on Fracking Cash Flows Still Negative – Disappointing Results for U.S. Frackers Continued Through Q4 2018. *Sightline*. http://ieefa.org/wp-content/uploads/2019/03/Q4-2018_More-Red-Flags-on-Fracking_March-2019.pdf
- IRENA (International Renewable Energy Agency). 2015. *REmap 2030. A Renewable Energy Roadmap*. IRENA. Abu Dhabi.
- IRENA (International Renewable Energy Agency). 2015. *Renewable Energy Prospects: Mexico, REmap 2030 analysis*. IRENA, Abu Dhabi. www.irena.org/remap
- JOHNSON, T. M., C. ALATORRE, Z. ROMO, y F. LIU. 2009. *México: Estudio sobre la disminución de emisiones de carbono*. The World Bank. Washington.
- MANWELL, J. F., J. G. MCGOWAN, y A. L. ROGERS. 2009. *Wind energy explained: Theory, design and application*. 2a edición. Wiley. USA.
- MARTÍNEZ, M. y M. QUINTANA, 2012. *Crisis e imperialismo*. Colección El mundo actual. Serie Construcción social alternativa. Universidad Nacional Autónoma de México-Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades. México.
- MIT (Massachusetts Institute of Technology). 2006. *The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century*. MIT. Cambridge, http://www.eere.energy.gov/geothermal/future_geothermal.html
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development). 2014. *Uranium 2014: Resources, Production and Demand*. NEA 7209. Paris.
- ORDAZ, A., M. FLORES, y G. RAMÍREZ. 2011. Potencial geotérmico de la República Mexicana. *Geotermia*, 24(1): 50-58.
- PEMEX (Petróleos Mexicanos). 2015. *Memoria de Labores 2014*. Pemex. México.
- REMBIO (Red Mexicana de Bioenergía). 2011. *La Bioenergía en México: situación actual y perspectivas*. Rembio. México.
- PULSO ENERGÉTICO. 2017. ¿Qué son las reservas y para qué sirve contarlas? <https://pulsoenergetico.org/que-son-las-reservas-y-para-que-sirve-contarlas/>
- REN21. 2016. *Renewables 2016 Global Status Report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*. REN21. Paris.
- ROSEN, M., y C. A. BULUCEA. 2009. Using Exergy to Understand and Improve the Efficiency of Electrical Power Technologies. *Entropy*, 11: 820-835.
- SÁNCHEZ, N., y D. C. MAVS. 2015. Effect of methane leakage on the greenhouse gas footprint of electricity generation. *Climatic Change*, 133: 169-178.

- SANTOYO, E., y R. BARRAGÁN-REYES. 2020. Energía Geotérmica. *Ciencia*. Abril-junio: 40-51.
- SE (Secretaría de Economía). 2020. *Perfil del mercado del carbón*. Dirección de Desarrollo Madero-Secretaría de Economía. México.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano). Origen y formación. https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Origen-y-formacion.html
- SENER (Secretaría de Energía). 2013a. *Prospectiva de Gas natural y Gas L.P.* Sener. México.
- SENER (Secretaría de Energía). 2013b. *Prospectiva de energías renovables 2013-2027*. Sener. México.
- SENER (Secretaría de Energía). 2015a. *Balance Nacional de Energía 2014*. Sener, México.
- SENER (Secretaría de Energía). 2015b. *Prospectiva de Energías Renovables 2015-2029*. Sener. México.
- SENER (Secretaría de Energía). 2018. *Balance Nacional de Energía 2017*. Sener. México.
- SORENSEN, B. 2000. *Renewable Energy*. 2a edición. Academic Press. London.
- TWIDELL, J., y T. WEIR. 2006. *Renewable Energy Resources*. 2a edición. Taylor & Francis. London.
- UNEP. 2016. *Tendencias mundiales en las inversiones de energía renovable 2016*. UN. New York.
- WEINGARTEN, M., S. GE, J. W. GODT, B. A. BEKINS, y J. L. RUBINSTEIN. 2015. High-Rate Injection Is Associated with the Increase in U.S. Mid-continent Seismicity. *Science*, 348: 1336–1340.
- ZAVALA-ARAIZA, D., D. R. LYON, R. A. ALVAREZ, K. J. DAVIS, R. HARRIS, S. C. HERNDON, A. KARION, E. A. KORT, B. K. LAMB, X. LAN, A. J. MARCHESI, S. W. PACALA, A. L. ROBINSON, P. B. SHEPSON, C. SWEENEY, R. TALBOT, A. TOWNSEND-SMALL, T. YACOVITCH, D. J. ZIMMERLE, y S. P. HAMBURG. 2015. Reconciling divergent estimates of oil and gas methane emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112: 15597-15602.

Capítulo 8

Impactos ambientales por el uso de energía

RENÉ D. MARTÍNEZ-BRAVO

*¿Qué tipo de impactos ocasiona el sector energético?
¿En qué parte del ecosistema ocurren?*

En este capítulo ponemos atención a los impactos al ambiente que el sistema energético en sus diferentes sectores y el uso de la energía ya sea de manera directa o indirecta, ocasionan sobre el ecosistema. Un primer abordaje acerca de los impactos ambientales hace referencia por consenso a que la crisis ambiental global es resultado del abuso que las actividades humanas ejercen sobre los recursos del ecosistema; por ejemplo, el sistema energético provoca alteraciones e impacta en varias partes y componentes del ecosistema durante el ciclo de producción de energía independientemente de cuál sea la fuente.

La suma de las afectaciones del sistema energético y el resto de las actividades humanas han crecido frenéticamente en los últimos años, ocasionado el cambio climático global. De seguir la misma trayectoria de deterioro del ecosistema, se pone en riesgo la sustentabilidad de los recursos naturales y con ello la supervivencia de las generaciones futuras. Por lo tanto, es necesario reconocer y atender los efectos de las formas de producción, uso y disposición de la energía y su incidencia sobre los recursos naturales para, con información, actuar de forma responsable y proponer alternativas viables de mitigación de los impactos que el sector energético ha ocasionado.

En este capítulo se plantea revisar la importancia de las actividades humanas y su efecto en el ecosistema para posteriormente identificar los impactos que se generan y cuáles de ellos están relacionados con el sistema energético. Con esa información trataremos de catalogar los daños y sus escalas de afectación. Al finalizar, entenderás la importancia del cambio de modelo energético y las ventajas del enfoque de usos finales como alternativas para disminuir los impactos ambientales.

8.1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Cuando se habla de impactos al ambiente, inmediatamente se piensa en el cambio climático global como el mayor resultado de las afectaciones y de la contaminación del planeta. El cambio climático global es el resultado de la alteración de sistemas naturales como el clima mundial, es producto de las actividades que históricamente el hombre ha realizado en el planeta, ya sea usando desmedidamente los recursos naturales o contaminándolos.

Las actividades humanas impactan al ecosistema, por ejemplo, sobre y debajo del suelo, el aire, el agua, la biota y en un nivel de complejidad mayor, las interacciones ecológicas. Por lo tanto, la forma en que se extraen, se procesan y utilizan los recursos naturales es parte de los impactos; además la falta de planeación para confinar los desechos y la basura cierran el ciclo de impactos. El dispendio es otro factor que se añade a los impactos ambientales; la velocidad y los tiempos de consumo de los productos son factores aditivos.

Los hechos demuestran que los impactos en el ecosistema son de naturaleza antrópica, por lo tanto, un primer paso para su resolución consiste en identificar cuáles son las actividades vinculadas al sector energético que causan daños y afectaciones y encontrar alternativas que disminuyan sus efectos y que permitan un tránsito hacia un mejor uso de la materia y de la energía.

Sabías que...

Los gases de efecto invernadero (GEI) son gases localizados en la atmósfera que, debido a su capacidad de retención de la energía térmica proveniente del Sol, son capaces de conservar la superficie del planeta a temperatura adecuada para la vida. De todas las actividades que se pueden citar a nivel mundial, el sector energético es uno de los principales emisores directos de GEI. El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) a través del Protocolo de Kioto definió al bióxido de Carbono (CO₂), al metano (CH₄), a los óxidos nitrosos (NOx) y a los flouorocarbonos (HFC y PFC) como los principales gases de efecto invernadero. En las negociaciones internacionales y para fines comparativos de los diferentes GEI, se utiliza el bióxido de carbono equivalente (CO₂e), el cual funge como base comparativa de los diferentes potenciales de calentamiento que tiene cada uno de los principales GEI.

El vapor de agua también es un GEI abundante, sin embargo, como no es producido directamente por las actividades humanas no forma parte de los inventarios de emisiones.

A nivel internacional, históricamente han sucedido varios acontecimientos importantes en los que se han destacado los impactos al ambiente y sus efectos que los seres humanos estamos provocando. De todos ellos destacamos dos por su incidencia mundial. El primero es el reporte Brundtland llamado “Nuestro Futuro Común”, publicado en 1987 por la ONU. En él se hace un llamado urgente para replantear el modelo de desarrollo mundial mediante un manejo sustentable de los recursos naturales pensando en el futuro de la humanidad. El término desarrollo sustentable es referido por primera vez en este trabajo y se usa para analizar, criticar y replantear las políticas y el modelo de desarrollo económico global. En el reporte se identifican las fuerzas que encausan a la humanidad para provocar el deterioro ambiental.

CAJA 8.1. DESARROLLO SUSTENTABLE

El término Desarrollo sustentable (DS) ha sido referido por científicos, biólogos, físicos, ecólogos y algunos economistas como T. R. Malthus y J. Hicks.

De acuerdo a la ONU (1987) las diferentes definiciones y conceptos de DS apelan a un reconocimiento de los diferentes constituyentes, por encima del “desarrollo y el ambiente”, por ejemplo:

- Desarrollo sustentable es donde los recursos renovables no se deben utilizar a un ritmo superior al de su ritmo de regeneración (Daly, 1994).
- Desarrollo sostenible es satisfacer las necesidades humanas fundamentales al tiempo que se preservan los sistemas que soportan la vida del planeta (Kates *et al.*, 2001).

El segundo acontecimiento mundial en el que se reconoce el estado de crisis ambiental fue la Cumbre de la Tierra (1992) que dio paso al Protocolo de Kioto. Esta cumbre mundial señaló que el aumento de GEI en la atmósfera repercute a nivel

global alterando el sistema meteorológico mundial y afectando a los diferentes sectores productivos. Por lo tanto, los efectos pueden acarrear graves problemas a la humanidad y a los ecosistemas alterando los ciclos de gases y de energía, ocasionando un cambio climático global. Ante esta serie de resultados, la Organización de las Naciones Unidas creó a la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático (UNFCCC) en el mismo año que se realizó la cumbre.

CAJA 8.2. CONVENCION MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Fue creado en 1992 para coordinar los tratados internacionales sobre el clima. Tiene como objetivo fundamental desarrollar esfuerzos internacionales para buscar soluciones al cambio climático global.

- Establece responsabilidades comunes pero diferenciadas en torno a las emisiones, para lograrlo: se distingue a los países de acuerdo con su responsabilidad histórica en la emisión de GEI y con su nivel de desarrollo.
- Lo ratificaron 180 países. México firmó en 1992 y lo ratificó a principios de 1993.

Protocolo de Kioto

Surge en 1997 como un conjunto de metas obligatorias para los países industrializados y compromisos más firmes y específicos de reducción de GEI respecto a los acordados en la Convención y que no se habían alcanzado. Para su cumplimiento clasifica a los países en Anexo I y No Anexo I. México quedó como país No Anexo I y lo ratificó en el 2000. En el país entró en vigor en 2004.

En el Anexo I se establecen compromisos cuantitativos de limitación y reducción de emisiones específicos para países desarrollados durante el período de 2008 a 2012.

- **Compromisos:** niveles de reducción de emisiones cuantificados y jurídicamente vinculantes para países del Anexo I (países desarrollados) que reducen en promedio, para el periodo 2008-2012, no Menos del 5% de sus emisiones GEI con respecto al año 1990.
- **Ejecución:** incluye las medidas nacionales de mitigación de gases de efecto invernadero y tres mecanismos de flexibilidad:
 - Comercio de Permisos de emisión de GEI.
 - Acciones de Implementación Conjunta (JI).
 - Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).

En el Protocolo de Kioto se avala que las emisiones de GEI son de origen antropogénico y que han contribuido directamente al calentamiento global. Un resultado del Protocolo fue el consenso internacional de una reducción urgente de las emisiones de GEI como meta principal. Las emisiones debían estar por debajo de las ocurridas en 1990 en los países desarrollados. Para alcanzar esta meta, se debían adoptar estrategias de mitigación por fuente emisora, y se sugerían al resto de los países firmantes del Protocolo mecanismos de desarrollo limpio (MDL), que implicaban promover el desarrollo de los países con bajas emisiones de GEI. Estas estrategias trazarían rutas para disminuir el efecto invernadero y mitigar el calentamiento global.

A pesar del impacto mundial que ambos eventos tuvieron, hasta el momento no han sido capaces de gestar un cambio significativo, por lo que los problemas ambientales globales aún están vigentes en nuestros días producto de diversos factores como el modelo económico internacional que empuja al “crecimiento y desarrollo” de los países y de continuar bajo el mercado energético, el cual soslaya los costos e impactos ambientales que ocasiona.

La energía forma parte de la sociedad moderna, la usamos en todas las actividades cotidianas y el modelo hace impensable un mundo sin ella. Se requiere para satisfacer principalmente alimentación, transporte, servicios, y otras necesidades en la vivienda. La utilizamos en procesos productivos, de salubridad y de desarrollo e investigación. Es innegable que la sociedad actual hace un mayor consumo de los recursos energéticos y de otros recursos naturales. Esta inercia de consumo es ascendente en la medida que la población mundial también crece con las mismas expectativas.

La desmedida necesidad de energía que la sociedad demanda es la causa central de la crisis ambiental que se presenta en este capítulo. Para abordarla, se parte desde la crítica al diseño de la satisfacción de necesidades materiales por medio del consumo de más energía; estas necesidades son adicionales a las básicas (fisiológicas) como son la alimentación y la protección de nuestros cuerpos. Pero ¿por qué llegamos hasta este nivel de afectaciones al ecosistema? Para responder es necesario recrear la historia del uso de la energía por la humanidad y ampliar el horizonte de análisis.

Para saber mas

Acerca de la definición de desarrollo sustentable o sostenible

¿Cuál es el termino correcto?

<http://www.un.org/es/ga/president/65/issues/sustdev.shtml>

<https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v24n2/art13.pdf>

¿Históricamente, desde cuándo surgen los impactos en el ambiente a causa de los energéticos?

8.1.1. Principales impactos ambientales en la historia

Conforme ha evolucionado la humanidad, el uso y la demanda de los recursos naturales ha sido cada vez mayor ¿Es el uso de los recursos naturales lo que ocasiona impactos en el ecosistema? Los recursos naturales del planeta se integran en dinámicas y flujos balanceados entre lo biótico y lo abiótico, forman parte de redes e interacciones que moldean la complejidad del ecosistema, por lo que son fundamentales para el equilibrio ecológico. Por tal motivo, cualquier intervención humana (antropocéntrica) ocasiona alguna modificación de este complejo balance generando alteraciones cuyas magnitudes de impacto pueden ser complicadas de evaluar en su totalidad. El resultado de estos efectos es lo que definimos como impactos ambientales.

Los impactos y afectaciones a los recursos naturales surgen con la aparición de los primeros grupos de humanos en la tierra, principalmente del *Homo erectus*, *Homo sapiens* y *Homo neanderthalensis* (cuadro 8.1). Entre los 100,000 y los 13,000 años atrás, cuando los grupos de humanos eran cazadores nómadas que seguían a las grandes manadas para proveerse de comida, herramientas de cacería y protección a la tribu, estrictamente hablando, se presentaron los primeros impactos ambientales cuya escala fue muy baja porque el desarrollo de tecnología para la cacería y para construir refugios comenzaba a desarrollarse.

En el periodo Neolítico (10,000 a. C.), las tribus dejaron de ser nómadas y se volvieron sedentarias y domesticaron algunas plantas y animales, también a este momento de la historia del hombre se le conoce como el origen de la civilización. El daño al ambiente aumentó, pasó de la escala local a la regional porque se cambió

el uso de suelo para fomentar la agricultura, ganadería y se establecieron pequeños centros poblacionales en varias regiones de la tierra antigua. Durante este periodo se estima que la población mundial paso de uno a cinco millones.

Al año 5,000 a.C. se le conoce como la Edad de los Metales. El hombre descubrió el valor de uso del cobre, el bronce y el hierro. Se crearon centros mineros y se produjo una novedosa forma de impacto ambiental por los desechos de la minería. Cerca de los centros mineros, surgieron núcleos de población que trajeron otros impactos ambientales para satisfacer sus necesidades básicas y otras creadas. La escala de impacto es regional.

La Revolución industrial (1800) fue el parteaguas de impactos ambientales porque ocurrieron a escalas superiores a la regional. El procesamiento y la extracción de la energía contenida en la materia fue clave en este momento de la historia. El origen y la demanda de materia prima (madera, carbón mineral, agua para producir calor y vapor para la mecanización de procesos en la nueva industria de producción intensiva de bienes) ocasionó la deforestación de grandes superficies boscosas, la apertura y explotación de minas y el desvío de cauces de agua. Esta nueva dinámica generó la aparición de enormes volúmenes de desechos en el suelo y en el agua y emisiones de gases tóxicos como CO₂ y el CO en la atmósfera.

Durante este mismo periodo histórico surgió también la necesidad de satisfacer de alimento y refugio a la nueva y creciente clase obrera. La frontera agrícola y la deforestación se expandieron para atender esta demanda, sumando sus afectaciones ambientales a las de la producción de energía. No hay cifras exactas de los impactos ocasionados, pero desde ese momento en la historia, los aproximadamente 700 millones de personas que habitaban, sobre todo en Europa, iniciaron la deuda ambiental, misma que no ha dejado de crecer hasta nuestros días.

El uso del petróleo como energético fue otro gran acontecimiento de impactos ambientales. Antes del siglo XIX, el petróleo tenía aplicaciones distintas al uso energético actual. La primera destilación de petróleo para uso como combustible (queroseno) ocurrió en Canadá en 1846. Poco después, en 1859, se perforó el primer pozo petrolero en Pensilvania, Estados Unidos. Esta fecha puede considerarse como la de inicio de los impactos ambientales y la emisión de gases de efecto invernadero por el uso de los hidrocarburos.

CUADRO 8.1
HISTORIA DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES VINCULADOS
A LA EVOLUCIÓN DEL HOMBRE

ÉPOCA	EVENTO	NIVEL DE IMPACTO			ESCALA		
		BAJO	MEDIO	ALTO	LOCAL	REGIONAL	GLOBAL
Paleolítico Medio 100,000 -13,000	Tribus nómadas fabrican herramientas y construyen viviendas móviles	X			X		
Neolítico (10, 000)	Las tribus se vuelven sedentarias. Aprenden a cultivar y la ganadería. Se crean pequeños poblados y surge el cambio de uso de suelo. Población mundial aproximada a los 10 millones de personas.	X	X		X	X	
Edad de los metales (5000 a.C.)	Inicia la minería. Los impactos por cambio de uso de suelo se incrementan. Aumenta la demanda de combustible para la fundición. Aparecen los residuos tóxicos y la contaminación de suelos y agua. Se crean poblados alrededor de las minas.	X	X		X	X	
Revolución industrial (año 1800)	Las fabricas inician producción en serie de bienes. Se reconoce el valor energético de los recursos mineros, forestales y de las corrientes de agua. Se descubre la capacidad del vapor para producir trabajo. Se deforestan bosques completos, se abren minas de carbón mineral, se desvían ríos. Incrementa la población y sus necesidades básicas. Se emiten grandes volúmenes de gases tóxicos a la atmósfera, aumenta considerablemente la contaminación de cuerpos de agua y del suelo. Aparecen nuevas afectaciones a la salud y enfermedades.	X	X	X	X	X	X

Ante un ambiente con serios problemas de contaminación, a finales del siglo XVIII se realizaron movimientos sociales para frenarlos. Diferentes sectores de la sociedad evidenciaron los problemas de salud pública y de provisión de alimentos que el sector energético estaba ocasionando, sobre todo en los centros urbanos. En 1798 Thomas R. Malthus planteó en su obra *Ensayo sobre el principio de la población* una disparidad entre el crecimiento de la población y la producción de alimentos. Explicó el modelo de crecimiento poblacional como un crecimiento de tipo geométrico (exponencial), mientras que la producción de alimentos mantiene un crecimiento aritmético (lineal). Esto quiere decir que la población aumentó en intervalos de 1, 2, 4, 8, 16, 32, etc., mientras que la producción de alimentos tiene una progresión de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, etc. En su trabajo propuso que el crecimiento poblacional debe ser controlado o de lo contrario se terminará en la miseria y en la pobreza extrema por la falta de alimentos y con severos daños ambientales. Casi 200 años después, en 1968, Paul Ehrlich y John Holdren publicaron *La bomba poblacional*, texto que expone argumentos sobre las implicaciones del crecimiento poblacional desmedido y cómo se verán afectados el bienestar humano y los recursos naturales (figura 8.1).



La bomba poblacional

Figura 8.1. Recreación de la bomba poblacional del libro de Paul Ehrlich y John Holdren (1968).

Fuente: Elaboración propia.

Derivado de las teorías de Ehrlich y Holdren y con el objetivo de cuantificar los impactos ambientales ocasionados por el crecimiento poblacional y su consumo, se construyó la ecuación IPAT:

$$I = P \times A \times T$$

Donde:

I = Impacto total

P = Tamaño poblacional

A = Afluencia (que se puede medir como el consumo per cápita)

T = Tecnología (contaminantes emitidos por el consumo).

Sin manejar unidades, la ecuación establece una relación directamente proporcional entre el tamaño de la población (per cápita), la afluencia (consumo per cápita) y la tecnología; es decir, si la población de un país aumenta el consumo de bienes y servicios, también incrementa su acceso a la tecnología, lo que se traduce en impactos ambientales. La solución que plantea la ecuación es frenar el aumento poblacional como única alternativa para la disminución de los contaminantes y que la tecnología ofrezca otra faceta en la que ayudará a mitigar los impactos ambientales.

Por su parte, Barry Commoner en el libro *El círculo que se cierra* (1971) postuló que las tecnologías que promueven el consumo eran las responsables en gran parte de la degradación ambiental, porque a mayor provisión de bienes y servicios para la población, mayores son los impactos al ambiente. Este enfoque del problema difería de la tesis de los límites del crecimiento (presión demográfica de Ehrlich y Holdren) como medida de reducción de los problemas ambientales, por lo que respalda a la ecuación IPAT. Además, Commoner recomienda la previsión de los posibles impactos negativos sobre los seres humanos derivados de los desarrollos tecnológicos.

En un intento de contextualizar la ecuación del IPAT, Commoner sustituyó la tecnología "T" por tecnología sustentable "S", porque una mejora en la afluencia (crecimiento económico) de la población permite el acceso a tecnologías de bajo impacto, de tal forma que mientras S sea más grande, menor será su impacto ambiental. La ecuación resultante fue:

$$I = P \times A/S$$

Donde:

- I = Impacto ambiental
- P = Tamaño poblacional
- A = Afluencia (Bienestar *bien económico*)
- S = Tecnología sustentable

Con el planteamiento de Commoner quedó claro que, si no se modifica la tecnología, el impacto ambiental será alto, dado que la población tiene un crecimiento continuo, lo mismo que la renta producida. Ahora sabemos que la aspiración a una afluencia similar a la de las sociedades de los países desarrollados por parte de los países en vías de desarrollo, aproximaría a una catástrofe ambiental con repercusiones a nivel mundial porque igualar las rentas económicas de todos los países del mundo requiere de altos costos en el capital natural (figura 8.2).

La medición de los impactos al ambiente hasta ese momento necesitaba indicadores con parámetros y magnitudes. Para ello, se incorporaron estimaciones de las pérdidas económicas o en el terreno energético, la falta de eficiencia o los niveles de contaminación que se provocan durante la producción.

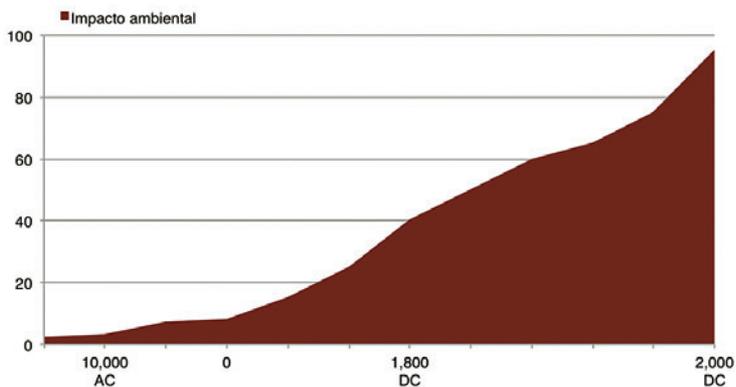


Figura 8.2. Crecimiento histórico de los impactos ambientales en la tecnificación de las sociedades humanas.

Fuente: Elaboración propia.

Notas Curiosas

Las opciones energéticas y tecnológicas novedosas no están exentas de impactos ambientales. Por ejemplo, se quiere promover la energía nuclear como una energía libre de emisiones de CO₂, por lo que se podría considerar limpia; sin embargo, la disposición de los residuos radioactivos son el problema ambiental más grave de este tipo de energético.

Otro ejemplo similar deriva de las tecnologías utilizadas para aprovechar los recursos renovables. El caso de los paneles solares para generar electricidad a partir de la energía del sol comienza a evidenciar problemas ambientales por la acumulación de los desechos y su disposición final en varias partes del planeta.

https://www.ecoportal.net/temas-especiales/basura-residuos/residuos/paneles-solares-basura-toxica/?fbclid=IwAR213TjGFJyOW-l91lQw_jcB7VW2Yu-PX7Q48N-1JCAI9hOIRp6CJUHoaoaM

8.2 ¿CÓMO IDENTIFICAR UN IMPACTO AMBIENTAL?

Para reconocer los impactos al ambiente, el primer punto es tener claridad acerca de qué es el ambiente. La palabra ambiente deriva del latín *ambiens*, que significa “que rodea”, es decir, el entorno en el que coexistimos y donde se condicionan las circunstancias en las que desarrollamos nuestra vida. Por lo tanto y para este tema, el ambiente se debe entender como el binomio ecosistema y humanidad.

El ecosistema consta de uno o varios parámetros físicos, biogeoquímicos y naturales. Se define como el conjunto de organismos vivos y el medio físico y químico donde coexisten e interactúan intra e interespecíficamente. Otra manera de definirlo es como las relaciones que suceden entre elementos bióticos y abióticos, tangibles e intangibles, en un espacio y tiempo determinado.

Algunos ejemplos tangibles de los componentes del ecosistema son agua, suelo, aire y seres vivos (incluyendo al hombre si hablamos de ambiente). Un ejemplo de los componentes intangibles son los ciclos de los gases. La humanidad es codependiente del ecosistema, se beneficia de sus recursos y los transforma, debido a esto podemos referir a otros elementos intangibles como la cultura, que incluye la valoración de la belleza escénica, entre otros.

La acción directa o indirecta del hombre sobre el ambiente afecta con diferentes intensidades a sus componentes (organismos vivos, clima, relieve, agua, suelo, aire, etc). Cuando ocurre un impacto ambiental se alteran los ciclos de la materia y de la energía del ecosistema (figura 8.3). Por lo tanto, los impactos ambientales son de origen antropogénico.

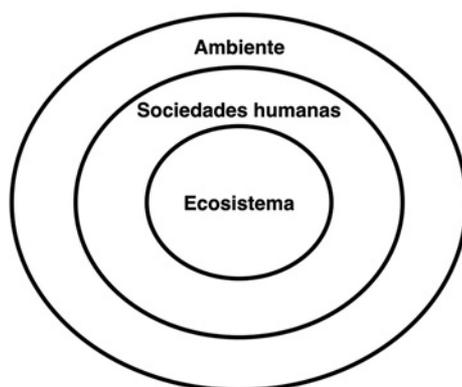


Figura 8.3. Componentes del ambiente.

Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, se reconoce un impacto ambiental cuando sus resultados afectan al hombre. Los impactos ambientales pueden ser directos o indirectos en las personas o en sus bienes. Los daños a la salud humana son los impactos directos. Los impactos indirectos son algunas afectaciones del ecosistema que inciden sobre los bienes o servicios y sus resultados afectan el bienestar y la salud de las personas de forma retardada, es decir, tardan más tiempo en mostrar sus efectos negativos en comparación con los impactos directos. Un ejemplo de impacto indirecto es la contaminación del agua con sustancias tóxicas a causa de la minería cuenca arriba; otro ejemplo es la lluvia ácida, producto de la contaminación del agua por el aumento de azufre en la atmósfera. Ambos casos son ocasionados por actividades del sistema energético y se manifiestan con un tiempo de retardo después del momento de la alteración (figura 8.4).

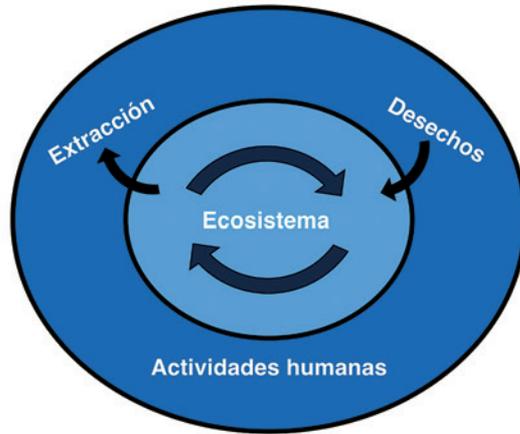


Figura 8.4. Los efectos de las actividades humanas en el ambiente. Fuente: Elaboración propia.

CAJA 8.3. DERRAME DE PETRÓLEO EN EL GOLFO PROVOCÓ MUERTE DE DELFINES

LOUISIANA, ESTADOS UNIDOS (20/MAY/2015)

Un equipo de científicos afirma en un nuevo estudio que existe un vínculo concreto entre el masivo derrame de petróleo de la compañía BP en 2010 y una cifra récord de muertes de delfines a lo largo de la parte norte del Golfo de México. Los científicos dijeron que la enorme cifra de delfines nariz de botella muertos que fueron encontrados en la costa desde que ocurrió el derrame sufrían de lesiones pulmonares y suprarrenales ocasionadas por nadar en aguas contaminadas por petróleo. El pozo Macondo de BP explotó el 20 de abril de 2010, ocasionando a su vez explosiones mortales en la plataforma petrolera Deep Water Horizon y el mayor derrame de crudo en altamar en los Estados Unidos.

El documento de investigación respalda hallazgos previos que vinculan la muerte de delfines con el derrame de crudo. El estudio involucró a científicos federales de la Administración Nacional para el Océano y la Atmósfera. BP ha refutado esta aseveración, y el miércoles dijo que el nuevo estudio no demostró el vínculo entre las muertes y la contaminación por petróleo. En lugar de ello, señaló la empresa, los delfines probablemente sufrieron de enfermedades respiratorias comunes.

De 2002 a 2009, se registró un promedio de 63 delfines muertos anualmente en el Golfo de México. La cifra aumentó a 125 en los siete meses posteriores al derrame de crudo en 2010 y a 335 en total en 2011, promediando más de 200 por año desde abril de 2010. Esa es la mayor mortandad de delfines y la más prolongada que se haya registrado en el Golfo. La cifra de muertes ha comenzado a disminuir, según científicos federales. <http://www.informador.com.mx/internacional/2015/593170/6/derrame-en-el-golfo-provoco-muerte-de-delfines.htm>

CAJA 8.4. RELACIÓN DE LA ENERGÍA EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS, LA POBLACIÓN Y LOS IMPACTOS AMBIENTALES

- Los sistemas alimentarios consumen actualmente el 30% de la energía disponible en todo el mundo, más del 70% de este consumo se produce fuera de las explotaciones agrícolas y genera más del 20% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (alrededor del 31% si se incluye el cambio del uso de la tierra).
- Más de un tercio de los alimentos que producimos se pierde o se desperdicia, y con ello el 38% de la energía consumida en los sistemas alimentarios.
- Los sistemas alimentarios modernos dependen en gran medida de los combustibles fósiles. Actualmente, el 85% de la energía primaria se basa en combustibles fósiles.
- Casi una de cada cinco personas en todo el mundo actualmente no tiene acceso a servicios energéticos modernos, y aproximadamente tres mil millones dependen de la biomasa tradicional para cocinar y calentarse. Este uso de la biomasa para producir energía suele ser insostenible con graves consecuencias adversas para la salud, el medio ambiente y el desarrollo económico.
- Por último, en las próximas décadas habrá un aumento significativo y simultáneo en las necesidades de agua, energía y alimentos que se necesita cubrir con una base de recursos naturales degradados y agotados.

En resumen, a diferencia de un ecosistema en el que existen flujos e interacciones que le dan estabilidad en su sentido estricto, en el ambiente, los seres humanos intervienen sobre los elementos del ecosistema para su propio beneficio, lo que ocasiona impactos. Los impactos ambientales tienen diferentes escalas y las afectaciones pueden ser temporales o permanentes. Por su parte, en el sistema energético, los impactos pueden ocurrir en cada uno de los eslabones del sistema de producción, desde la extracción hasta el uso final, incluida la etapa de disposición de los desechos del proceso. Por si fuera poco, los daños son provocados por la mala planeación y por un excesivo consumo de los recursos, actividades que pueden corregirse para evitar los efectos secundarios de la producción de energía (figura 8.5).

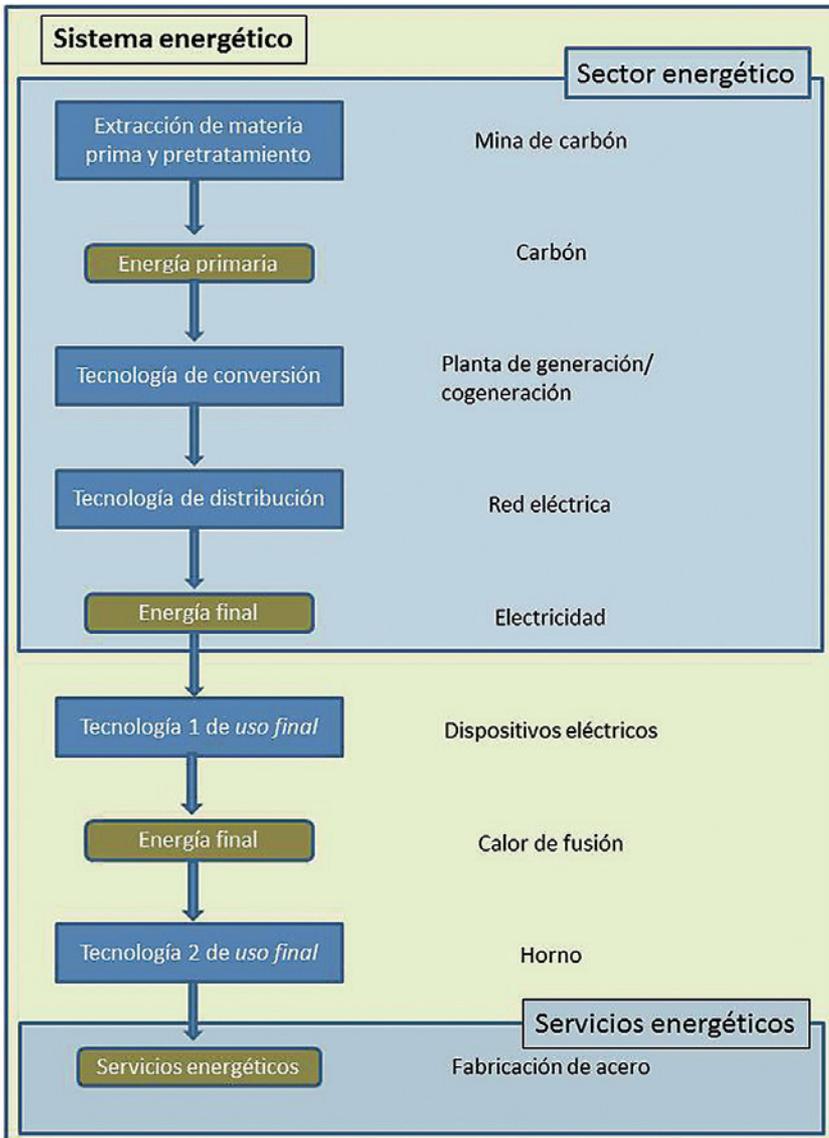


Figura 8.5. Ejemplo de los impactos de la cadena tecnológica derivadas del sector energético.

Fuente: Elaboración propia basada en WEA (2000).

CAJA 8.5. ¿SE PUEDEN CLASIFICAR LOS IMPACTOS AL AMBIENTE?

Los impactos ambientales pueden tener diferentes intensidades y magnitudes, por lo que la identificación de sus atributos permite clasificarlos para su evaluación. Los más comunes son:

- **Positivo o negativo:** cualquier actividad humana tiene consecuencias que pueden ser positivas o negativas para el ecosistema. Un atributo positivo sería que el impacto favoreciera a un componente del ecosistema, por ejemplo, el aprovechamiento del vapor residual proveniente de una planta geotérmica para producción de plantas en invernaderos. Por otro lado, un atributo negativo sería la contaminación del suelo por el depósito de azufre producido por la industria petrolera en sus actividades de refinación de hidrocarburos. Existen otros ejemplos en los que el tipo de efecto cambia en el tiempo comportándose como positivo y después como negativo o viceversa, sobre todo en procesos de larga duración y con varios componentes. Por lo tanto, la tipificación del impacto debe incorporar contexto de la etapa y el momento de la evaluación.
- **Directo o indirecto:** este tipo de atributo ya se había descrito en términos generales. Un ejemplo del impacto directo es el padecimiento de enfermedades de las vías respiratorias provocado por la contaminación de interiores a causa de la exposición por combustión de leña a fuego abierto en sitios cerrados, principalmente en áreas rurales. Por otro lado, un ejemplo para describir los efectos indirectos es la contaminación de los cuerpos de agua subterráneos, la cual no afecta directamente a los humanos cuando estos no consumen de esa agua, pero la contaminación puede afectar a los cultivos que se transforman en forraje para el ganado o al ganado mismo si llega a ingerirla. Así, el daño afectará de forma retardada en el futuro cercano a los humanos.
- **Acumulativo:** este tipo de impactos son la suma parcial de "pequeños impactos" ocurridos ya sea en el pasado o en diferentes componentes del ecosistema, cuya adición llega a un nivel de disrupción que supera la resiliencia del sistema y el resultado se expresa como daño ambiental. Un ejemplo de impactos acumulativos es la acidificación y pérdida de la estructura edáfica provocada por la acumulación y oxidación de sulfuros y por la dispersión de partículas finas a través del viento. Todo esto ocurre por el depósito paulatino de desechos de la minería, los cuales contaminan el suelo y dañan a la microfauna. Como consecuencia se afecta la actividad del reciclado de nutrientes en el suelo, además, el depósito de las partículas acidifica y compacta el suelo.

- **Sinérgico:** se reconoce que un impacto sinérgico tiene un efecto mayor que el acumulativo porque en este se da un resultado con mayor intensidad tras la suma de los impactos individuales en una o en varias partes del ecosistema. El mejor ejemplo de este tipo de impacto es el cambio climático global, porque en él confluyen atributos de diferente tipología; es el resultado de varias fuentes parciales de impactos y de diferentes escalas. Se podría ubicar como un macro atributo por la complejidad intrínseca que lo constituye.
- **Residual:** es definido por la persistencia de un daño previo. En este impacto, a pesar de haberse establecido medidas de mitigación, su efecto es una secuela que mantiene su efecto en el ecosistema. Un ejemplo de este tipo de impacto son las emisiones radioactivas provenientes de los residuos de la industria termonuclear, las cuales persisten activas y continúan afectando el ambiente a pesar de ser tratados y confinados.
- **Temporal o permanente:** refiere a que los efectos se pueden controlar y llevar a su mínima expresión para que el ecosistema se pueda recuperar de la afectación. Tal es el caso de la contaminación de los ríos, los cuales mediante medidas de contingencia y saneamiento pueden ser restaurados en el mediano plazo. A estos impactos también se les puede otorgar el atributo de reversibles. Por su parte, los impactos permanentes refieren a cambios unidireccionales en el ecosistema, los cuales son irreversibles. El ejemplo es la minería, porque sus actividades modifican el relieve geográfico y con ello afectan gravemente al ecosistema del cual no se puede recuperar y el daño se hace permanente.

Como se ha visto, hay diferentes atributos para clasificar a los impactos ambientales aplicables en todos los sectores productivos o de desarrollo humano, además del sector energético. Entonces ¿cómo diferenciamos los impactos ocasionados por el sistema energético? Debido a que la energía no es únicamente la que utilizamos en nuestras actividades cotidianas o en nuestro entorno inmediato, es necesario revalorar toda la interconexión del sector energético con los demás sectores productivos para ir paso a paso identificando desde dónde inicia la cadena de impactos de la energía. Hacer este análisis es importante para mostrar cómo un estilo de vida cómodo sin considerar los impactos que ocasiona, trae graves consecuencias cómo la contaminación y el calentamiento global.

8.3. ¿CUÁLES SON LAS FUENTES ACTUALES DE LA ENERGÍA?

En la actualidad el petróleo es nuestra principal fuente de energía. La energía del petróleo es en sí energía solar transformada por procesos fotosintéticos en biomasa que formó parte de la red trófica del pasado. Esta biomasa fue almacenada y transformada en yacimientos de hidrocarburos que se conservaron dentro de la corteza terrestre por miles de años. Ahora es la energía que extraemos, transformamos y utilizamos para satisfacer nuestras necesidades.

Los hidrocarburos se constituyen en una mezcla de gases y petróleo crudo principalmente. El petróleo, que es la materia prima, se localiza en las capas inferiores de la corteza terrestre y bajo el mar, que para acceder a ellos se debe alterar el ecosistema. Los combustibles como la gasolina, el diésel, el queroseno y la turbosina para los motores representan cerca del 84.89% de la energía usada a nivel nacional en el transporte principalmente.

Por otro lado, la electricidad se produce a partir de centrales termoeléctricas (2.32%), hidroeléctricas (1.78%), carboeléctricas (7.48%) y nucleoeeléctricas (2.16%) principalmente. El aporte de fuentes distintas al petróleo como la fotovoltaica, la eólica y la bioenergía aportan en su conjunto (1.37%) a la matriz energética nacional, complementando el 100% de la producción de energía (cuadro 8.2). Independientemente del nivel de participación en la oferta energética, se debe reconocer que cada fuente ocasiona diferentes impactos ambientales.

Los impactos ambientales del sector energético mantienen una doble característica: por un lado, tienen un impacto directo en el mismo sistema energético, y por otro lado también tienen un efecto indirecto en otros sectores como el alimentario, donde incide en los procesos como la cosecha mecanizada, el empaque de los productos, el transporte de los productos a los centros de consumo o de la energía necesaria para la conservación de los productos.

Actualmente disponemos de la tecnología necesaria para transformar la energía del sol en energía fototérmica y fotovoltaica, para aprovechar la energía cinética de las corrientes de agua, de la velocidad del viento y de la presión del vapor del subsuelo, e inclusive para aprovechar de manera directa la energía de la biomasa. Otras formas de energía en el ecosistema son a partir de algunos elementos químicos contenidos en la corteza terrestre como minerales de litio y uranio, por señalar algunos. Esto significa que la humanidad ha logrado replicar a la naturaleza intervi-

niendo en los procesos naturales para tomar y transformar la energía para nuestro propio beneficio. Sin embargo, los costos ambientales son cada vez más elevados dependiendo de las transformaciones que la materia prima requiera para obtener la energía de uso final.

CUADRO 8.2
INSUMOS DE ENERGÍA PRIMARIA, AÑO 2013 (PJ)

ENERGÍA		2013	(%)
USO FINAL	TOTAL	5,666.24	100
Combustible	Petróleo crudo	2,825.89	49.87
	Condensados	92.16	1.63
	Gas natural	1,892.16	33.39
Electricidad	Biogás	1.97	0.03
	Nucleoenergía	122.6	2.16
	Hidroenergía	100.66	1.78
	Geoenergía	131.33	2.32
	Energía eólica	15.07	0.27
	Bagazo de caña	60.3	1.06
	Solar	0.38	0.01
	Carbón	423.72	7.48

Fuente: Sener, 2014.

Notas Curiosas

En promedio un litro de gasolina representa 23 toneladas de materia orgánica fosilizada.

En 1997 se calculó que la energía fósil usada a nivel mundial representó 400 veces la Productividad Primaria Neta terrestre, esto quiere decir que la producción de los ecosistemas para mantener las redes tróficas naturales quedó cuatrocientas veces por debajo que el dispendio de hidrocarburos, lo que es altamente insostenible.

173 peta watts provenientes del Sol llegan a la tierra diariamente, de los cuales solo el 23% es aprovechado en la fotosíntesis.

Se calcula que el cénit de la curva de producción petrolera en México se alcanzó en 2004.

8.4. ¿EN QUÉ PARTE DEL SISTEMA ENERGÉTICO SE PRODUCEN LOS IMPACTOS AMBIENTALES?

La energía que utilizamos requiere de una serie de transformaciones desde la materia prima hasta convertirse en la energía útil o de uso final. Como se ha explicado, en cada etapa del sistema ocurren impactos ambientales y dependiendo del tipo de fuente, estos pueden ser clasificados de diferentes formas según el nivel de afectación. A todo lo anterior hay que añadir que el diseño actual del sistema energético contribuye en gran medida a la generación de otro nivel de impactos durante su distribución, porque el sistema actual hace que la energía recorra grandes distancias desde los sitios de transformación para llegar a los usuarios finales. Por lo tanto, los impactos ambientales ocurren durante la extracción, la transformación, la distribución, el almacenamiento, el uso final y la disposición de los residuos energéticos, es decir en el ciclo completo de la energía.

Un ejemplo del impacto ambiental por el procesamiento del petróleo durante el ciclo completo es: durante la extracción del hidrocarburo en la geografía continental hay una alteración y contaminación del suelo al romperse su estructura; en esta parte del proceso además se libera el gas asociado al petróleo, ocasionando emisiones contaminantes que afectan al agua y al aire. En la etapa de transporte del hidrocarburo a los centros de transformación y refinación pueden ocurrir derrames; cuando esto sucede, el crudo liberado contamina el entorno in-

mediato, dañando no solo la flora y la fauna, sino también contaminando el suelo y los mantos freáticos.

En la transformación del petróleo se contamina el aire por la emisión de gases como el CO, CO₂, CH₄ y azufre (Z) principalmente. También hay liberación de otras sustancias al aire, contaminación térmica por el calentamiento de agua de los ríos y contaminación auditiva por los ruidos generados en los centros de proceso. Ya convertido el crudo en otros combustibles, los impactos ambientales ocurren durante su distribución y su combustión final al emitir gases tóxicos. Como pudo verse, los impactos ocurren sobre el suelo, debajo del suelo, en los cuerpos de agua y en el aire con efectos a escalas locales, regionales y globales.

En varias ocasiones no se perciben los impactos al ecosistema ocasionados por la energía. Por lo tanto, cuando ocurren las evaluaciones de impacto, estas se realizan dividiendo el proceso en etapas, por ejemplo, se puede realizar una evaluación del impacto durante la extracción o la minería de la materia prima y otra evaluación diferente puede ocurrir para el proceso de transformación. Sin embargo, pocas son las evaluaciones que incluyen las externalidades, como los impactos de la energía por la distribución y uso final o las que incluyen el ciclo completo.

Nota Curiosa

La eficiencia en el uso del petróleo inició con políticas para eliminar las prácticas de derroche. Para 1985, los Estados Unidos y Japón eran 25% y 31% más eficientes en el uso de energía y 32% y 51% más eficientes en el caso del petróleo respectivamente, tomando como año de comparación 1973.

8.5. ¿CUÁL ES LA CONTRIBUCIÓN DEL SECTOR ENERGÉTICO EN MATERIA DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS?

El sector energético desde 1990 (año que se estableció como referencia para la evaluación de las emisiones de GEI por la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático) se ha reconocido como el de mayores emisiones respecto a los sectores agrícola, forestal, de desechos y procesos industriales (Semarnat,

2013). La emisión de gases y partículas contaminantes como el nitrógeno (NOx), óxidos de sulfuro (SO₂), la presencia de plomo (Pb), la lluvia ácida (H₂SO₄ y HCl) y de ozono troposférico (O₃) y el carbono negro son las más frecuentes desde este sector. En conjunto, son precursores de acidificación y eutrofización de suelos y cuerpos de agua, daños a los cultivos y a los bienes materiales. Los efectos del daño se aprecian en diferentes ámbitos como en la producción primaria, en la cadena trófica, en los cultivos y ganadería y en la salud de los seres humanos ocasionando enfermedades y en algunos casos, la muerte inmediata (WMO, 2014).

En la evaluación realizada hasta 1996 las emisiones de GEI por producción y consumo de energía equivalieron al 47% del total nacional (Semarnat, 2001). En la actualización del inventario de emisiones de México al año 2002, las emisiones del sector generaron el 72% de las totales (INE, 2006). Para el año 2010 la energía tuvo un descenso en sus emisiones respecto a la evaluación previa, aportando el 67% del total (Semarnat, 2013). Los porcentajes son concluyentes, el sector energético es el mayor emisor de GEI en México con casi la mitad de los contaminantes arrojados al ambiente. A nivel internacional el 70% de las emisiones de CO₂ a la atmósfera es de origen antropogénico por la combustión de los combustibles fósiles, la producción de cemento y las actividades de cambio de uso de suelo (IPCC, 2015).

Los efectos de las emisiones contaminantes son alteraciones atmosféricas por el aumento de la concentración de gases y se suman a las afectaciones del sistema meteorológico global, provocando, entre otros eventos, el calentamiento global, la lluvia ácida y eventos catastróficos. Además, como hemos revisado, los impactos ambientales no se restringen únicamente a las emisiones de GEI, también incluyen otros efectos que deben ser considerados en la contabilidad de afecciones (cuadro 8.3).

¿Cómo se distribuyen las emisiones entre los diferentes combustibles?

De acuerdo con las cifras del inventario de GEI del año 2010, son las emisiones de CO₂e por el consumo de las gasolinas y del gas natural las responsables del 25.4% y del 31% del total de emisiones del sector energético. Durante el periodo de 1990 a 2010 la demanda de combustible del subsector transporte creció 74.9%, lo que representó el 34.2% del consumo final de energía (Semarnat 2013). Bajo este enfoque, sin duda, los combustibles para el sector transporte son los responsables de los mayores impactos ambientales por la emisión de GEI en México.

CUADRO 8.3
EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES DE GEI PROVENIENTES DEL SECTOR
ENERGÍA DE MÉXICO

AÑO	PARTICIPACIÓN S. ENERGÍA (%)	EMISIÓN CO ₂ e (Gg)
1990	58	319,173.8
1996	47	319,590.0
2002	72	389,496.7
2010	67	503,817.6

Fuente: Elaboración propia con datos de Semarnat (2001, 2013) e INE (2006).

La producción de energía eléctrica requiere de combustibles como materia prima en las plantas de transformación convencionales. Los combustibles más comunes para la generación eléctrica son: diésel, combustóleo, carbón mineral, coque de carbón y petróleo. Las emisiones de CO₂e para producir electricidad representan el 44.5% según lo reportado al año 2010 (Semarnat 2013).

La forma de presentar los resultados de las emisiones en porcentajes en el balance de energía del sector eléctrico impide identificar cuál materia prima tiene mayor participación en la generación de electricidad y, en consecuencia, cuáles son los impactos ambientales.

8.6. ¿EL SECTOR ENERGÉTICO CONTRIBUYE AL CALENTAMIENTO GLOBAL?

Sin duda, la conclusión más importante del Protocolo de Kioto (1996) fue el situar al uso de los energéticos y de la tecnología como los principales responsables de la actual crisis ambiental. El modelo de desarrollo global pone en riesgo el futuro de los recursos naturales y con ello a la economía mundial. El cuarto reporte de evaluación del IPCC concluyó que es necesario reducir las emisiones actuales

del 50-80% para el año 2050 para evitar efectos severos del calentamiento global (IPCC, 2015).

Mediante una estrategia de cooperación internacional (norte-sur) se intenta evitar superar las 400 ppm de CO₂ en la atmósfera. Para lograrlo se espera que el sector energético desarrolle un esquema de producción que incluya bajas emisiones de carbono y mejoras en la eficiencia sistémica y en los dispositivos (IPCC, 2007; WMO, 2014) (cuadro 8.4).

CUADRO 8.4
EMISIONES DE GEI POR SECTORES EN MÉXICO

INVENTARIO DE EMISIONES POR SECTOR CO ₂ e (Gg)						
AÑO	ENERGÍA	PROCESOS INDUSTRIALES	AGRICULTURA	S. FORESTAL	RESIDUOS	TOTAL
1990	319,173.8	30,265.6	92,785.9	111,784.0	16,529.1	570,538.4
1996	319,590.0	43,121.0	55,674.0	161,422.0	61,710.0	641,517.0
2002	389,496.7	52,102.2	46,146.2	89,854.0	65,584.4	643,183.5
2010	503,817.6	61,226.9	92,184.6	45,670.0	44,130.0	747,029.1

Fuente: Elaboración propia con datos de Semarnat (2001, 2013) e INE (2006).

Las medidas de reducción de las emisiones de gases que causan impactos ambientales deben considerar, además, la disminución de los precursores de ozono, la reducción de carbono negro y los forzadores climáticos de vida corta.

Nota curiosa

En el 2007 las emisiones per cápita de EUA fueron las más altas del mundo, alcanzando 18.7 ton/año.

CAJA 8.6. DETERMINACIÓN DE LOS IMPACTOS DE ACUERDO CON HOLDREN Y SMITH (2000)

A escala de casa, el esmog y otros contaminantes provenientes de la combustión de leña.

A escala del lugar de trabajo, los daños a la salud por las minas de carbón o la extracción de petróleo.

A escala de comunidad, la emisión de contaminantes por los vehículos

A escala regional, la lluvia ácida por la emisión de óxido de azufre, óxidos de nitrógeno por estaciones de carga.

A escala global, por la presencia de los gases de efecto invernadero que originan cambios en los patrones climáticos.

Las emisiones de CO₂ provenientes del sector energético derivan principalmente de la combustión. Esta ocurre en varios momentos del proceso de la energía y no únicamente en la combustión de la energía de uso final. De acuerdo con las investigaciones, el CO₂ tiene un potencial de calentamiento global de 1 en un horizonte de 100 años. En cambio, si se usa biomasa para la producción de energía, las emisiones pueden ser mitigadas si esta proviene de un manejo sustentable desde la materia prima, a tal grado que las emisiones de CO₂ pueden neutralizarse por la captura de carbono en el crecimiento de la biomasa.

Son pocas las emisiones de CH₄ provenientes del sector energético convencional, ya que la mayoría son originadas por los procesos biológicos, por lo que la tecnología no es directamente responsable de su aumento en la atmósfera. Sin embargo, las emisiones de metano representan el 20% del total de GEI y siguen aumentando. De acuerdo con el IPCC, el metano tiene un potencial de calentamiento de 25 en un horizonte de 100 años y su tiempo de residencia como molécula en la atmósfera es de 10 años.

El dióxido de azufre (SO₂) es considerado un contaminante criterio y forzador radiativo negativo, es decir, tiene propiedades de enfriamiento climático en la atmósfera, es un acidificador acuático y terrestre y un precursor de enfermedades respiratorias (OMS, 1999). Su emisión comprende en gran medida los procesos humanos (procesos industriales) y naturales por las erupciones volcánicas. El 70% de las emisiones de SO₂ son de origen antropogénico.

Los óxidos de nitrógeno ($\text{NO} + \text{NO}_2$) son gases con un rol importante en la troposfera porque pueden reaccionar foto químicamente y provocar la aparición de ozono. En los ecosistemas los NO_x se pueden depositar en forma seca o húmeda y causar la acidificación. El monóxido de carbono (CO), de manera similar a los NO_x , es un precursor de ozono en la troposfera. Respecto a la formación de ozono, hay un conjunto más de precursores denominado NMVOC (*non methane volatile organic compounds*, componentes orgánicos volátiles distintos del metano).

El carbono negro (*black carbon*) y el carbono orgánico son compuestos que promueven el forzamiento radiativo negativo, alterando el clima por su efecto de enfriamiento. Se producen por la combustión incompleta de combustibles fósiles y de biomasa (principalmente en los incendios forestales). Dentro del sector transporte, los motores a diésel son los que más emiten estas partículas, sobre todo en Estados Unidos y Europa. En países en desarrollo, el sector residencial es un emisor constante de este tipo de carbono, su impacto más importante es en la salud por las afecciones respiratorias que ocasiona a las personas.

Cuando la energía proviene de nucleoelectricas, los impactos ambientales tienen diferentes connotaciones, pues provocan la contaminación radioactiva de cuerpos de agua y del suelo por la disposición de los desechos radioactivos; en el aire se pueden pronosticar trazas de radioactividad por la fuga de vapor. Sin embargo, los mayores impactos (desastres) ocurren cuando suceden accidentes nucleares. El ejemplo más reciente es en Fukushima, Japón en 2011, donde el desastre afectó no solo a la salud de los trabajadores de la planta, sino que orilló a una evacuación necesaria en un radio de 30 kilómetros de 150 mil pobladores para evitar riesgos de exposición a la radiación sobre todo de yodo y cesio (I-131 , Cs-134 y Cs-137). El accidente provocó además un gran daño en el ambiente y afectaciones en la economía y la política del país a escalas temporales y espaciales de largo plazo. Otro evento de referencia es el caso del accidente ocurrido Chernóbil en 1986 en el cual, a pesar del tiempo, aun en el 2020 las secuelas continúan afectando el ambiente. Este conjunto de afectaciones ha provocado que la energía nuclear sea motivo de fuertes discusiones cuando se propone como fuente alterna de energía.

Debido a los impactos ambientales del sector energético, ahora las fuentes de energía renovable se observan como alternativas de mitigación de la concentración de GEI en la atmósfera. El argumento a favor es que no queman combustibles fósiles durante varias fases de su procesamiento. Sin embargo, es importante reconocer

que ningún proceso energético, incluyendo a las energías renovables, está exento de provocar impactos ambientales. El procesamiento puede llegar a producir menores impactos respecto a los que provienen directamente del petróleo o carbón mineral, pero no debe soslayarse, porque es innegable que, en alguna fase de su procesamiento, requieren combustibles fósiles o generan otro tipo de impactos. Además, es necesario insistir en que la solución debe ser la disminución del consumo de cualquier tipo de energía, sea cual sea su fuente.

Nota curiosa

En México el sector transporte emite 18% de los GEI. En la Ciudad de México esta proporción llega al 43%, y son los autos particulares los principales emisores.

Fuente: Estrategia Nacional de Cambio Climático, 2007.

Las entidades federativas con más alta concentración de emisiones provenientes de fuentes móviles son el Estado de México, la Ciudad de México, Jalisco, Nuevo León y Veracruz.

Fuente: Inventario Nacional de Emisiones, INE, 2006.

En la actualidad tenemos grandes avances para la producción de electricidad con huellas de carbono mucho menores, gracias a las energías renovables (ER). Sin embargo, la energía para el transporte mantiene una tésitura diferente a la generación de electricidad porque hasta el momento la sustitución por fuentes de bioenergía (etanol y biodiésel) no han logrado incorporarse como una alternativa real y es el sector transporte el que más emisiones de GEI ocasiona. Como se vio en el capítulo 3, la solución debe construirse a partir de una estrategia basada en un cambio del modelo de transporte actual que incluya: a) políticas que favorezcan el transporte colectivo, b) rediseño de rutas para disminuir la movilidad de personas y mercancías, c) mejorar la eficiencia de los motores, y d) la conversión de motores para el uso híbrido de combustibles, entre otros. Se espera que con estos cambios en el transporte los impactos al ambiente disminuyan notablemente.

CAJA 8.7. POTENCIALES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE FUENTES RENOVABLES

El potencial eólico en México se encuentra entre 5 mil y 50 mil MW. Por ejemplo, en el Istmo de Tehuantepec la Comisión Federal de Electricidad pronostica un potencial de cerca de 10 mil MW instalados en el mar y en la línea litoral (Fuentes renovables de energía en América Latina y el Caribe, Cepal-gtz, 2004).

En México la generación de energía eléctrica por medio de minihidráulicas tiene un potencial de producción de 3,450 MW a partir de 252 sitios explotables.

Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas, (<https://www.ineel.mx/boletin022013/breve02.pdf>).

En la parte norte de México se ha detectado un potencial de producción de electricidad a partir de la radiación solar. La densidad promedio de radiación solar es de 5 kWh por metro cuadrado al día. A diferencia de los potenciales anteriores, la generación de energía eléctrica a partir de la energía solar depende del tipo de tecnología instalada, por lo que no se puede proporcionar un potencial de producción, pero se enfatiza en que la mayor parte del país puede ser beneficiado a nivel de la red nacional o a partir de pequeños productores, inclusive a nivel doméstico (Cepal, 2004).

El potencial geotérmico aun es amplio en México. De acuerdo con estudios realizados por el Cemie Geo hay un potencial adicional de producción de 1,200 MW en diversas zonas geotérmicas del país.

Fuente: Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (<http://www.cemiegeo.org/index.php/geotermia-en-mexico>).

CAJA 8.8. ¿CÓMO SE PUEDEN CLASIFICAR LOS IMPACTOS POR EL USO DE LA ENERGÍA?

Para la sistematización de los impactos al ecosistema ocasionados por el sector energético existen varias formas de clasificación y el resultado del impacto dependerá de los elementos considerados. Algunas opciones son las siguientes:

I) Por tipo de fuente o tipo de generación

Las fuentes o tipo de generación de energía son muy variadas, como hemos visto ninguna se considera 100% limpia. Por ejemplo, la extracción de hidrocarburos en altamar ocasiona impactos en varias etapas del proceso y de varios tipos. La generación de energía eléctrica en parques eólicos, que se denomina fuente renovable, también provoca impactos ambientales. La diferencia entre ellas es que afectan en diferentes partes del ecosistema y a diferentes escalas espacio temporales.

II) Por tipo de contaminante

En el sector energético, el abanico de contaminantes es amplio e incluye sustancias líquidas, gaseosas y sólidas, las cuales, en función del tipo de energético, tienen mayor o menor presencia. En algunos casos es claro reconocer el tipo de contaminantes que con mayor frecuencia emanarán como desechos, por ejemplo, en una central termonuclear los contaminantes más peligrosos son las sustancias radioactivas derivadas de cesio y yodo que contaminan el suelo y el agua y, en menor proporción, los gases o calor emitidos. Un caso diferente lo representa la industria carboeléctrica cuya materia prima para la producción de electricidad es el carbón mineral. Los contaminantes más abundantes de este proceso son los gases tóxicos, destacando el CO₂ y CO, así como otros gases producto de la combustión cuyas emanaciones van a formar parte de la atmósfera. Si la evaluación de los impactos se hiciera por el ciclo completo de producción, al conjunto de daños resultante se deben sumar las afectaciones al suelo, a los cuerpos de agua y a la biodiversidad.

El tipo de residuos que origina el sector energético es otra forma de agrupar y clasificar los impactos ambientales.

III) Por escala

Las escalas espaciales y temporales son otra forma de clasificar los impactos de la energía en el ecosistema. El impacto medido en el espacio se puede referir a impactos locales, regionales y globales. Mientras que los impactos en la temporalidad se pueden clasificar en momentáneos, periódicos y constantes.

Hasta el momento, para esta dimensión de impactos no se han desarrollado metodologías de evaluación robustas que permitan dar resultados fiables debido a la complejidad del sistema a evaluar.

En el tema de los impactos ambientales provocados por otras actividades humanas, existen otras formas de clasificación que pueden servir para valorar los impactos del sector energético. A continuación se describen tres grandes tipos.

- a) Manejo de los recursos del ecosistema (renovables y no renovables). Un ejemplo de manejo renovable es el silvícola para la producción de bioenergía; y en el caso de los no renovables, la extracción de petróleo.
- b) Aprovechamiento y ocupación del paisaje o territorio. El ejemplo inmediato de los aprovechamientos es el cambio de uso de suelo para la minería de carbón.
- c) Contaminación. Los impactos por contaminación son producto de la operación de proyectos de los dos tipos de impactos anteriores y algunos otros que ocasiona la emisión de residuos sólidos, líquidos y gaseosos.

8.7. ¿QUÉ HERRAMIENTAS PODEMOS USAR PARA LA EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES?

La amplia tipología de impactos que ocasiona el sector energético y los sectores no energéticos ha dado origen al diseño y propuesta de diversas herramientas de evaluación. La mayoría de los esquemas de evaluación refieren sus resultados a indicadores económicos para la evaluación de costos; otros presentan sus resultados en emisiones de CO₂e. Las herramientas de evaluación de los impactos al ecosistema más frecuentes son:

- a) Huella ecológica.
- b) Mochila ecológica.
- c) Huella de carbono.
- d) Indicadores de sustentabilidad.
- e) Análisis de ciclo de vida.
- f) Análisis tecnoeconómico.
- g) Análisis de riesgo.
- h) Análisis multicriterio
- i) Manifestación de impacto ambiental.

En la lista anterior destaca la huella ecológica, creada por Wackernagel y Rees (1996) como una herramienta de contabilidad que nos permite calcular el consumo de recursos y los requerimientos de asimilación de desechos de una población humana definida o en términos económicos de una superficie de terreno productiva (www.footprintnetwork.org).

El objetivo de la evaluación de la huella ecológica es desarrollar unidades de medición para reportar el estado del ambiente (indicadores ambientales o de desarrollo sustentable). Para ello se requiere establecer denominadores comunes de superficie de impacto o dañadas, en este caso la superficie de suelo necesaria de mitigación para la huella ecológica o kilogramos de CO₂ para la huella de carbono.

El cálculo de impacto bajo el análisis de la huella ecológica se puede realizar a nivel individual o en escalas superiores. Es necesario identificar cuáles son las acti-

vidades de consumo en determinados periodos de tiempo. Las variables implícitas en la evaluación son:

- Actividades de consumo.
- Uso de suelo necesario para que las actividades sean posibles.
- Agrícola, pastizales, casas-espacio/materiales de construcción.
- Energía-conversión de otras áreas.

Parámetros que requiere:

- Crecimiento de la población.
- Pérdida de suelo fértil.
- Deforestación.
- Agotamiento de recursos.
- Aumento de consumo.

Con la información necesaria para los parámetros anteriores, la huella ecológica mide la biocapacidad demandada por el consumo final de todos los implicados en la evaluación, incluso se puede evaluar con todos los residentes de un país. Esto incluye sus consumos asociados a sus hogares, así como los consumos colectivos, como son las escuelas, calles, brigadas de servicios (ambulancia, bomberos, etc.). La biocapacidad de un país se refiere a la superficie continental o al agua que es capaz de mantener capacidad fotosintética y acumulación de biomasa suficiente para neutralizar los impactos. La huella de carbono es una medida de la productividad del suelo que se puede describir mediante la siguiente ecuación.

$$BC = A * YF * EQF$$

Donde:

- BC = Biocapacidad
- A = Área disponible para un tipo de uso determinado
- YF = Factor de campo
- EQF = Factor de equivalencia

Para determinar la huella se delimita la dimensión humana del estudio. Se cuantifica cuánto se consume de energía, alimentos, materias primas y de suelo. Aquí lo más complicado es el cálculo de la superficie de terreno, por lo que se recurre a tablas estandarizadas y, finalmente se realiza la sumatoria de todas las superficies y el resultado se divide entre la población total.

La producción de una huella ecológica es la suma de las parcialidades de todos los recursos cosechados y todos los desechos originados dentro de los límites geográficos establecidos. Esto incluye todos los productos primarios (cultivos, pastizales, bosques, áreas de pesca), infraestructura, generación hidráulica y el área necesaria para capturar el CO₂ de los combustibles fósiles, por lo que se puede transformar en la huella de carbono mediante la sustitución de variables. La ecuación queda de la siguiente forma:

$$EF_c = EF_p + EF_I - EF_E$$

Donde:

EF_c = Huella ecológica del consumo

EF_p = Huella ecológica de la producción

EF_I = Huella ecológica de la importación

EF_E = Huella ecológica de la exportación

Nota curiosa

Huella ecológica per cápita a nivel país en el 2002:

Canadienses: 7.5 ha

Italianos: 4.0 ha

Mexicanos: 2.4 ha

Hindúes: 0.7 ha.

La demanda global es de 2.2 ha, mientras que 1.8 ha per cápita de tierra/mar está disponible.

La biodiversidad también depende de esta área y no está contabilizada.

La demanda global $2.2/1.8 = 1.2$ o en este caso el 20% que excede la capacidad de la Tierra. Si se quiere ver de otro modo, se requiere de 1 año y 2 meses para regenerar lo que los humanos consumen y para estabilizarlo, se debería parar el consumo global.

A pesar de ser una herramienta que goza de popularidad para medir los niveles de impacto a diferentes escalas, en la actualidad la huella ecológica tiene algunos puntos débiles en su diseño metodológico, por ejemplo, pasar por alto la calidad y tipo el suelo que es más importante que solo estimar la cantidad de superficie que se requiere para compensar el impacto y en los últimos tiempos un tema que cobra cada vez mas valor y el cuál no se ha logrado superar es como determinar los impactos humanos sobre la biodiversidad, tema totalmente complejo pero de alta prioridad en las evaluaciones.

Como se dijo al principio de la sección, hay más herramientas que permiten la evaluación de los impactos al ambiente ocasionados por el sector energético, cada una con un propósito establecido desde su diseño. Como en el caso de la huella ecológica, todas y cada una, tienen fortalezas y debilidades, por lo que su uso depende de qué se quiere evaluar y los resultados deben siempre referir la fuente para evitar confusiones o interpretaciones erróneas.

8.8. NOTAS PARA UNA REFLEXIÓN FINAL

Durante el presente capítulo se ha expuesto al sector energético como un conjunto de actividades humanas vinculadas al desarrollo, las cuales son responsables de grandes alteraciones al ecosistema en diferentes escalas de tiempo y espacio. Estas alteraciones han sido valoradas a partir del momento en el que afectan la salud y los bienes y servicios de las comunidades humanas y en un contexto político internacional en el clima mundial.

Desde el terreno estrictamente energético, los países basan su economía en el petróleo a pesar de su efecto altamente contaminante, por lo que para otros países con menos oportunidad de desarrollo se propone una política internacional de desarrollo tangible con bajas emisiones de carbono y con el impulso de energéticos renovables, además de la aplicación de límites globales de emisiones de GEI.

Las herramientas de valoración del impacto ambiental deben contemplar el ciclo completo, incluyendo todas las escalas y niveles implicados en el sector de la energía, es decir, mapear el efecto que la humanidad ejerce sobre el ecosistema, desde la extracción de las materias primas, el procesamiento, la transformación en energía útil, la distribución, su uso final y el confinamiento de los desechos.

Esta es la mejor manera de estimar las consecuencias ecológicas que ocasiona este sector.

Sobre el comportamiento humano se promueve un cambio de paradigma respecto a la sociedad de consumo mundial. El sector energético está íntimamente ligado a la provisión de bienes materiales, que como se ha planteado, ocasiona grandes afectaciones al ecosistema. La tesis desde esta disciplina plantea que se debe redefinir el significado de satisfacción de necesidades, de los estadios de bienestar y confrontar el desmedido deseo de acumulación de bienes materiales en las sociedades de los países desarrollados y en vías de desarrollo.

Se reconoce que el cambio de visión a partir de los usos finales de la energía no es la única vía para mitigar los impactos al ecosistema, pero indudablemente cambiaría las reglas de consumo establecidas en el mercado internacional y bajaría la presión a los recursos naturales que son materia prima para la producción de energía, a la vez que elevaría la calidad del consumo, lo cual permitiría un crecimiento y desarrollo con bajas emisiones de carbono.

Es necesario volver a definir el concepto de desarrollo porque su significado cambia entre naciones y con el paso del tiempo. El desarrollo debe integrar de una forma diferente a la actual una serie de condiciones como eliminar la pobreza económica, establecer criterios para que la moral sea un eje rector de la política y de la economía, prioridades básicas de la humanidad. Esto es diferente a pensar el desarrollo como un proceso de industrialización o como el fortalecimiento de las capacidades productivas para incentivar el crecimiento económico y, de este modo, alcanzar el bienestar de unos a partir de las carencias de otros. Mientras estos cambios no sucedan junto a otros en el modelo económico actual, el concepto de desarrollo sostenible seguirá siendo solo una retórica vacía carente de incidencia y sin significado.

Finalmente, pueden surgir propuestas desde diferentes nichos para mitigar los impactos ambientales, pero lo cierto es que ni la ciencia ni la tecnología tendrán capacidad de mitigarlos si no ocurren grandes cambios en el modelo económico mundial y en los patrones de consumo de las élites que provoquen un cambio de enfoque sobre las aspiraciones y deseos del resto de la humanidad. La historia demuestra que la naturaleza ha superado las capacidades humanas cuando se recurre al desarrollo de la tecnología para mantener patrones de uso y extracción de recursos naturales por encima los ciclos naturales o para mitigar impactos como el calentamiento global. Las evidencias demuestran que las posibilidades humanas

de controlar el entorno sin energía y tecnología son mínimas, de tal forma que la única oportunidad de supervivencia es la aceptación de que las comunidades humanas deben volver a prácticas sostenibles y adaptarse a las condiciones que hemos provocado, esperando que el equilibrio natural suceda en el futuro.

8.9. BIBLIOGRAFÍA

- AUBRECHT, G. J. 2006. *Energy, Physical, Environment, and Social Impact*. 3a edición. Pearson Education. New York.
- BLASCHEK, H., T. EZEJI, y J. SCHEFFRAN. 2010. *Biofuels from agricultural wastes and by products*. Wiley-Blackwell. New York.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2004. *Fuentes renovables de energía en América Latina y el Caribe Situación y propuestas de políticas*. GTZ. México.
- CICC (Comisión Intersecretarial de Cambio Climático). 2007. *Estrategia Nacional de Cambio Climático 2007 Síntesis Ejecutiva*. Semarnat. México.
- COMMONER, B. 1971. *The closing circle: Nature, Man, and Technology*. Knopf, New York.
- EHRlich, P. y J. HOLDREN. 1968. *The Population Bomb*. Sierra Club Books. Toronto.
- DALY, H. 1994. Investing in natural capital. *The ecological economics approach to sustainability*, 22.
- DOPPLELT, B. 2008. *The power of sustainable thinking How to create a positive future for the climate, the planet your organization and your life*. Earthscan, London.
- FERNÁNDEZ, D. R. y L. GONZÁLEZ. *En la espiral de la energía*. Vol. 2. Libros en Acción, Madrid.
- FOWLER, J. M. 1984. *Energy and the environment*. 2a edición, McGraw-Hills. New York.
- GEA (Global Energy Assessment) 2012. *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*. Cambridge University Press / International Institute for Applied Systems Analysis, Cambridge-New York-Laxenburg.
- GOLDEMBERG, J. et al. 1996. *Energy, Environment and Development*. Earthscan, Ginebra.
- HOLDREN, J. y K. SMITH. Capítulo 3. En: UNDP. 2000. World Energy Assessment. UNDP. USA.
- INE (Instituto Nacional de Ecología). 2006. *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002*. SEMARNAT-INE, México.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. *Energy sector*. IGES.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change The Physical Science Basis, Report WG I*. IPCC. IGES.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2015. *Climate Change 2014. Synthesis Report Summary for Policymakers*. IPCC. IGES.

- KATES, R., W. CLARK, R. CORELL, J. MICHAEL, C. JAEGER, I. LOWE, J. MCCARTHY, H. JOACHIM, B. BOLIN, N. DICKSON, S. FEUCHEUX, G. GALLOPIN, A. GRÜBLER, B. HUNTLEY, J. JÄGER, N. JODHA, R. KAPERSON, A. MABOGUNJE, P. MATSON, H. MOONEY, B. MOORE III, T. O'RIORDAN, y U. SVEDIN. 2001. Sustainability Science. *Science*, 292(5517): 641-642.
- LEE, R. 2002. Environmental impacts of energy use. En *Energy Science, policy, and the pursuit of sustainability*. R. BENT. L. ORR, y R. BAKER (eds.). Island Press. New York.
- LETCHER, T. M. 2014. *Future Energy, Improved, Sustainable and Clean Options for Our Planet*. 2a edición. Elsevier. New York.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). 1999. *Guías para la calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud*. OMS. Ginebra.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). 1987. *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo "Nuestro futuro común"*. ONU. New York.
- RISTINEN, R. A. y J. J. KRAUSSHAAR. 1998. *Energy and the Environment*. John Wiley & Sons. New York.
- RIVEROS, H. G., E. JIMÉNEZ, y D. RIVEROS. 2004. *Cómo mejorar mi clase de Física Nivel medio superior*. Trillas, México.
- SENER (Secretaría de Energía). 2014. *Balance Nacional de Energía 2013*. Sener, México.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2001. *México, 2a Comunicación Nacional ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Semarnat. México.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2013. *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010*. Semarnat. México.
- SIOSSHANSI, F. P. 2011. *Energy, sustainability, and the environment: technology, incentives, behavior*. Elsevier. New York.
- SORENSEN, B. 2011. *Renewable Energy physics, engineering, environmental impacts, economics & planning*. 4a edición. Elsevier. New York.
- WAKCERNAGEL, M., y W. REES. 1996. *Our ecological footprint: Reducing human impact on the earth*. Gabriola Island, BC. New Society Publishers. Philadelphia.
- WEISSENBACHER, M. 2009. *Sources of power How energy forces human history*. ABC Clío. California.
- WEA (World Energy Assessment). 2000. *Energy and the challenge of sustainability*. UNDP. New York.
- WEA (World Energy Assessment). 2004. *Part III Energy and Major Global Issues*. UNDP. New York.
- WMO (World Meteorological Organization). 2014. *How the United Nations System Supports Ambitious Action on Climate Change*. UN-WMO. New York.

Ejercicios

1. En el siguiente cuadro identifica los impactos al ecosistema, el tipo y si son directos o indirectos.

		SUELO	ATMÓSFERA	AGUA	BIODIVERSIDAD	LOCAL	REGIONAL	GLOBAL	DIRECTO	Indirecto
Producción de electricidad	Carboeléctrica									
	Termoeléctrica									
	Nucleoeléctrica									
	Molino eólico									
	Fotovoltaica									
Combustibles líquidos	Gasolina/diésel									
	Bioetanol									
	Biodiesel									

2. En el cuadro de la página siguiente complementa la columna A con la B.

A	B
1. La temporalidad y el conocimiento del espacio de ocurrencia de los impactos ambientales, ¿qué parámetros son?	1. Manejo de escalas
2. En los combustibles de uso final, ¿cuál es la principal causa de emisión de gases contaminantes al ambiente?	2. La combustión
3. ¿Cuál es la unidad de equivalencia para referirse a los GEI?	3. CO ₂ equivalente
4. ¿Cuáles son los principales componentes del ecosistema que se ven afectados por la producción de energía?	4. Agua, aire y tierra
5. De acuerdo con el consumo de energía, ¿cuál es el uso final de energía más utilizada en México?	5. Los combustibles para el transporte
6. ¿Cuál es el porcentaje de emisión de GEI proveniente del sector energético desde 1990?	6. Mas del 50%
7. Los daños al ambiente pueden ser en dos momentos diferentes, ¿cuáles son estos?	7. Inmediatos y diferidos
8. Los daños como el depósito de ácidos, formación de ozono troposférico y partículas suspendidas, ¿a qué escala son más evidentes?	8. Regional
9. ¿Cuál es el origen de todos los daños e impactos por el uso de energía?	9. Las actividades humanas
10. ¿Cuáles son los principales gases de efecto invernadero?	10. Bióxido de carbono CO ₂ , Metano CH ₄ , Óxidos nitrosos NO _x y vapor de agua H ₂ O.
11. ¿Cuál es la importancia de la deforestación en el ciclo del carbono?	11. Se pierden los almacenes naturales y se pierde mitigación.
12. ¿A qué compuestos se les considera forzadores radiativos?	12. Al carbono negro y a los SO _x .
13. ¿Cómo se definen los efectos retardados de las alteraciones en el ecosistema que inciden en el bienestar de las personas?	13. Impactos indirectos.
14. ¿Cuáles son los procesos humanos que causan impactos en el ecosistema?	14. La extracción de recursos y el depósito de desechos.
15. ¿Cuál es la energía de uso final que puede generarse con el uso de derivados de petróleo y de energías renovables?	15. La energía eléctrica.

Preguntas abiertas

1. ¿Qué componentes debe incluir una evaluación ideal de los impactos ambientales provocados por el sector energético?
2. ¿Cuáles son las escalas de impacto que deben ser consideradas en la evaluación del sistema energético?
3. ¿Cuáles son las vías de mitigación de impactos ambientales que se pueden implementar en el sector energético?
4. ¿Cuál es la vía de desarrollo que plantean los países que no cuentan con reservas de petróleo?
5. ¿En qué tipos de indicadores basan sus resultados las herramientas de evaluación de los impactos ambientales?

Capítulo 9

Escenarios energéticos

JORGE M. ISLAS SAMPERIO

GENICE K. GRANDE ACOSTA

PALOMA MACÍAS GUZMÁN

9.0. INTRODUCCIÓN

¿En qué contexto surgen los escenarios de planeación energética? ¿Por qué es importante elaborar este tipo de escenarios en el ámbito de la producción y el consumo de energía?

La década de los sesenta del siglo xx marcó el auge de los procesos de planeación realizados a partir del análisis de escenarios (Fortes *et al.*, 2015). Si bien los orígenes de este tipo de análisis se remiten a la esfera militar, su posterior traslado a los ámbitos de la política pública y de la gestión estratégica empresarial determinó su difusión como un enfoque recomendado para enfrentar la incertidumbre y mejorar la toma de decisiones.

Esta tendencia se observó en una vasta gama de disciplinas y usuarios pertenecientes a ámbitos como: la planificación de negocios, el diseño de políticas, procesos de gestión local, el análisis ambiental a nivel global y la evaluación de alternativas energéticas. Y es en este último tema en donde el análisis de escenarios posibilita la ponderación de diferentes opciones de producción, distribución y consumo de fuentes de energía, proyectando contextos energéticos alternos y examinando su factibilidad e implicaciones en distintos horizontes de planeación (Leydon *et al.*, 1996 citado por Battacharyya, 2011).

La investigación sobre escenarios energéticos alternativos (es decir, aquellos que consideran fuentes energéticas distintas de los combustibles convencionales) que enfatiza el papel de las fuentes renovables de energía, se remonta principalmente a la última década del siglo xx, con la publicación a nivel internacional de los trabajos de Corbus *et al.* (1993); Johansson *et al.* (1993); WEC (1994); Palz (1994); Honji *et al.* (1994); EC (1997); Mourelatos *et al.* (1998); Nakicenovic *et al.* (1998);

Wohlgermuth (1999), y Suganthi y Williams (2000). Durante las primeras décadas del siglo XXI sobresalen los trabajos de Hadley y Short (2001) Raskin *et al.* (2002); Aitken *et al.* (2004); GACGC (2004); GACE (2011); WWF (2011), y GI (2012).

México también se destaca por la investigación para desarrollar escenarios de energía renovable, como lo muestran los trabajos de Manzini y Martínez (1999a y b); Manzini *et al.* (2000); Sheinbaum (2000); Islas *et al.* (2002, 2003, 2004, 2006, 2008, 2015); McKinsey y CMM (2009); Santoyo *et al.* (2014), y Vidal *et al.* (2015).

La problemática energética y ambiental observada a nivel mundial durante las últimas décadas vuelve imprescindible la elaboración de escenarios energéticos alternativos que fundamenten el proceso de transición de las fuentes convencionales hacia sistemas sustentables de producción, distribución y consumo de energía. Esto implica un proceso minucioso de evaluación y diagnóstico de la situación actual, así como el conocimiento de los principios metodológicos para la construcción de escenarios, junto con la ponderación de las posibilidades reales de operación de distintas alternativas. Bajo estas premisas, este capítulo se estructuró en cuatro secciones: la primera de ellas describe y analiza la problemática de los sistemas energéticos actuales, lo que constituye fundamento para el desarrollo de escenarios alternativos de energía hoy en día. La segunda sección presenta algunos métodos para el análisis de la oferta y la demanda energética estableciendo un perfil de su situación y tendencias actuales. La tercera sección describe y fundamenta la construcción de escenarios base y alternativos, en los que se manejan diferentes opciones de incorporación de las energías renovables. Finalmente, en la cuarta sección se presentan y discuten ejemplos de escenarios energéticos que cumplen con los principios de la sustentabilidad, haciendo énfasis en el caso de México y en las políticas que pueden permitir que el país encamine su desarrollo hacia un sistema energético sustentable.

9.1. PROBLEMÁTICA ACTUAL DE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS

¿Cuáles son los combustibles fósiles? ¿Por qué se volvieron tan importantes durante el siglo XX? ¿Cómo se integra el concepto de sustentabilidad en un sistema energético? ¿Cuál es el vínculo entre la energía y el desarrollo humano? ¿Cuál es el vínculo entre la energía y el crecimiento económico? ¿Qué elementos afectan la seguridad energética de un país o una región?

Además de los temas que vinculan a la energía con otros como el desarrollo sustentable, el cambio climático y con la incorporación de fuentes de energía renovable, el análisis de la problemática actual de los sistemas energéticos requiere abordar temáticas fundamentales para la elaboración de escenarios sobre energía, las cuales se analizan a continuación.

9.1.1. Establecimiento del modelo de producción y consumo de energía basado en recursos fósiles

La satisfacción de las necesidades humanas a lo largo del tiempo se ha realizado gracias a la conformación de diversos sistemas de organización social que están históricamente determinados y que han requerido de fuentes específicas de energía, de acuerdo con el nivel de desarrollo tecnológico y social vigente. A nivel global, la tendencia histórica de estos requerimientos muestra un carácter ascendente que mantuvo cierta uniformidad hasta registrar un gran salto durante la Revolución industrial, momento en el que se reemplazó el uso de la fuerza física y en buena medida el consumo de la biomasa tradicional por los combustibles fósiles.

¿Qué tipo de dispositivo marcó el surgimiento de la Revolución industrial?

¿En qué rama productiva se aplicó por primera vez y qué combustible utilizaba?

La figura 7.1 del capítulo 7 muestra el crecimiento explosivo en el consumo de la energía primaria global desde 1850 y su desarrollo acelerado en las décadas subsecuentes. El aspecto más destacable de este comportamiento es el fin de la dependencia de las fuentes tradicionales a favor del carbón como resultado de una innovación tecnológica determinante, que fue el uso de las máquinas de vapor alimentadas con este combustible.

A partir del siglo xx inició el consumo masivo y creciente de petróleo y gas, impulsado por la introducción de nuevas tecnologías como el motor de gasolina y los sistemas de generación termoeléctrica. Con esto cambiaron definitivamente los patrones de transporte de carga y de pasajeros, así como los de iluminación y el uso de potencia eléctrica para diversos procesos productivos, lo que al cabo de algunas décadas generó una fuerte dependencia de los combustibles fósiles.

La creciente demanda de electricidad provocó que a mediados del siglo xx la energía hidroeléctrica se fortaleciera, y del mismo modo, la energía nuclear alcanzó su auge después de la Segunda Guerra Mundial. Estas nuevas tendencias provocaron una caída en la participación de la biomasa en el consumo energético total, aunque en términos absolutos esta fuente permaneció sin variaciones. La disponibilidad de energía fósil a precios relativamente accesibles determinó que el uso de otras energías renovables, como la solar, eólica, geotermia y los nuevos aprovechamientos de la biomasa, mantuviera proporciones marginales respecto al consumo total a lo largo del siglo pasado (Islas *et al.*, 2004; GEA, 2012).

El mantenimiento de estas tendencias del consumo energético durante las primeras décadas del siglo XXI explica por qué en la actualidad el consumo mundial de energía primaria depende fuertemente de los combustibles fósiles. En 2013 estas fuentes representaron el 80.4% del consumo mundial, lideradas por el carbón que representa el 30.5%, seguido del petróleo con el 27.3% y el gas natural con el 22.6%. Y aún más significativo resulta el aumento del consumo de carbón en la última década, impulsado principalmente por los requerimientos de países con un importante crecimiento económico, como China.

Por otra parte, si bien las fuentes renovables de energía incrementaron su uso en los últimos años, sólo representan el 14.2% de los requerimientos energéticos mundiales y su consumo todavía está dominado por el uso de la biomasa tradicional y en menor medida, por la energía hidráulica.

¿En qué se diferencia de las nuevas fuentes de energía renovable?

Las nuevas fuentes de energía renovables tales como: energía solar, eólica, geotérmica, oceánica y biocombustibles muestran más dinamismo en su consumo, pero tanto el monto demandado, como su participación en los requerimientos totales de energía son aún reducidos (IEA, 2015a).

9.1.2. El acceso a la energía y los límites del actual sistema energético

El acceso a los servicios básicos de energía es considerado como un derecho humano universal y a la vez, la energía es un elemento fundamental para el desarrollo socioeconómico. Los requerimientos de energía incluyen las siguientes necesida-

des básicas: producción y cocción de alimentos, calentamiento de agua, iluminación, acondicionamiento ambiental (calor o enfriamiento), transporte de alimentos y personas, entre muchas otras. Aun cuando los servicios energéticos son considerados como cruciales para la satisfacción de las necesidades básicas humanas (He y Reiner, 2016), los requerimientos de energía varían significativamente entre países y regiones y dependen de diversos parámetros, tales como las condiciones climáticas, estilos de vida, tipo de equipamiento, etcétera.

Actividad. Explica las diferencias básicas en los patrones de consumo energético en el ámbito urbano y en el rural.

En general, se puede decir que las necesidades que deberían ser cubiertas en todos los hogares mediante el uso de energía incluyen: la cocción y la conservación de alimentos; el acceso al agua potable; el acondicionamiento de espacio; el aseo personal; la iluminación, la educación (p.e. a través del uso de computadoras); el entretenimiento; la recolección de basura; la conducción y tratamiento de aguas residuales, así como la operación de dispositivos o enseres domésticos, las telecomunicaciones y el transporte en general. Sin embargo, el explosivo incremento en el consumo de energía para satisfacer las necesidades básicas no está exento de diversas problemáticas derivadas del patrón de producción y consumo que predomina a nivel mundial, las cuales se enuncian a continuación:

1. A nivel mundial existe un gran número de personas (aproximadamente 2,700 millones) que todavía utilizan biomasa tradicional, desechos orgánicos y carbón vegetal para satisfacer sus necesidades de energía para cocción de alimentos y para calentamiento de sus viviendas, utilizando dispositivos tradicionales poco eficientes. Esta situación provoca, entre otras consecuencias, una gran cantidad de muertes prematuras (2 millones al año), principalmente de mujeres y niños por contaminación proveniente del uso de estos combustibles. Asimismo, aproximadamente el 20% de la población mundial no tiene acceso a la electricidad (GEA, 2012).
2. Los hidrocarburos que cubren la mayor parte del consumo energético doméstico y de servicios tienen previsto un periodo de tiempo relativamente corto en cuanto a la relación de reservas/producción, lo cual puede poner

en riesgo la disponibilidad en el mediano y largo plazo de estas fuentes de energía con consecuencias económicas previsiblemente de índole mayor.

3. Los impactos ambientales negativos que genera el uso los combustibles fósiles, tales como la lluvia ácida, la contaminación del agua, aire y suelo, así como el problema del cambio climático, tienen efectos adversos en la población, tales como afectaciones en la salud, desplazamiento de personas, menor disponibilidad de agua, riesgos de desastres, etcétera.
4. Los riesgos asociados con problemas geopolíticos, ataques terroristas, accidentes catastróficos en los sistemas de aprovisionamiento energético a partir de los combustibles fósiles y la energía nuclear, tienen importantes efectos adversos desde el punto de vista ambiental, económico y social.

Ante tales problemas y retos, desde hace décadas se plantea que los sistemas energéticos deben cambiar su patrón de producción y consumo de energía hacia fuentes energéticas, tecnologías, modos, usos, etc., que contribuyan a resolver los retos energéticos, económicos y ambientales del actual modelo basado en recursos fósiles. En ese sentido, se ha planteado que los sistemas energéticos deben girar hacia formas más sustentables de energía.

Actividad. Define brevemente el término sustentabilidad y explica de forma general cómo se aplica dentro del ámbito de la energía.

Una parte de las soluciones a esta problemática comenzó a abordarse desde hace algunos años a través de crecientes inversiones en fuentes de energía renovable; tecnologías de alta eficiencia; diseño de edificaciones con un consumo cero de energía; autos eléctricos; sistemas de energía “inteligentes”; estufas de biomasa avanzadas y más eficientes, y muchas otras opciones eficientes y de menor impacto ambiental, como el uso de bicicletas, de transporte público sustentable, etc. Como plantea GEA (2012) “el desafío de la política es acelerar, ampliar y ayudar a que la implementación de estos cambios posibles sea generalizada y asequible”, no importando que esta acción sea en un principio intensiva en capital, pero sabiendo que en el largo plazo será redituable para la sociedad.

9.2. ENERGÍA Y DESARROLLO HUMANO

El acceso a la energía es una condición para la satisfacción de necesidades humanas, por lo que el desarrollo socioeconómico se relaciona con el uso de la energía. De esta forma, la figura 9.1 muestra una correlación positiva entre el consumo de energía y el Índice de Desarrollo Humano (HDI)¹ y, por consiguiente, la falta de acceso a servicios energéticos confiables y asequibles representa un obstáculo para el desarrollo humano, social, económico y de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).²

El objetivo 7 de los ODS indica que se debe “garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sustentable y moderna para todos” en donde las energías renovables son una opción que además se vincula con otros ODS como el objetivo 13, que implica “adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos” (ONU, 2016). Según la ONU (2016) una de cada cinco personas en el mundo no tiene acceso a electricidad. En este contexto existen dos vertientes de análisis, por un lado, el acceso a servicios energéticos y, por el otro, la pobreza energética.

En el cuadro 9.1 se muestra a nivel regional la población en términos absolutos y relativos que carece de acceso a la energía eléctrica, así como el porcentaje de habitantes que utiliza leña de forma tradicional, principalmente para la cocción de alimentos.

¹ El HDI es una medida para evaluar el bienestar humano. Es un índice compuesto de tres dimensiones del desarrollo humano: 1) vida larga y saludable, medida en esperanza de vida al nacer; 2) la habilidad para adquirir conocimiento, medido en años de escolaridad y expectativa de años de escolaridad, y 3) la habilidad para alcanzar un estándar digno de vida, medido en producto nacional bruto per cápita. Su límite superior es 1.0 (UNDP, 2015). (https://www.mx.undp.org/content/mexico/es/home/ourwork/povertyreduction/in_depth/desarrollo-humano.html)

² Estos objetivos forman parte de la nueva Agenda para el desarrollo de 2015 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) establecida en septiembre de 2015 por los países miembros. Esta Agenda se conforma de 17 objetivos de desarrollo sostenible y 169 metas para los próximos 15 años (ONU, 2016).

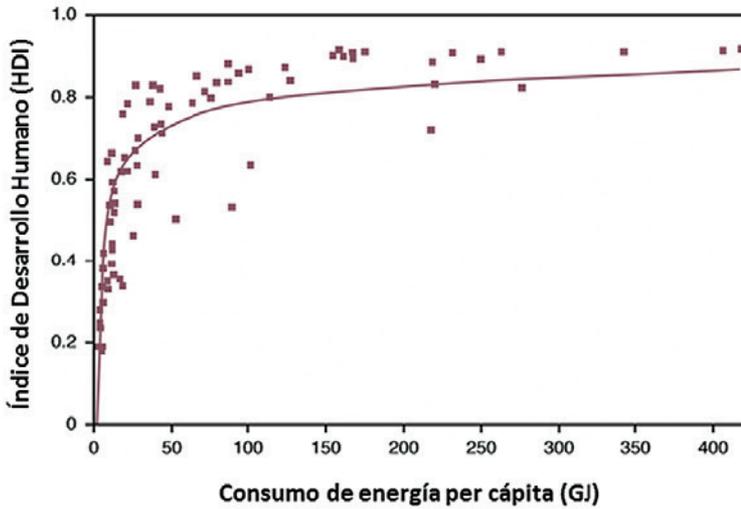


Figura 9.1. Interrelación entre el consumo de energía y el Índice de Desarrollo Humano

Fuente: Adaptación de GACGC (2004).

CUADRO 9.1

POBLACIÓN CON Y SIN ACCESO A LA ELECTRICIDAD Y POBLACIÓN QUE USAN BIOMASA TRADICIONAL POR REGIÓN

REGIÓN	ELECTRICIDAD		BIOMASA TRADICIONAL	
	POBLACIÓN SIN ELECTRICIDAD MILLONES	ELECTRIFICACIÓN %	POBLACIÓN MILLONES	USO DE BIOMASA TRADICIONAL %
África	635	43%	754	68%
Asia en desarrollo	526	86%	1,895	51%
América Latina	22	95%	65	14%

Medio Oriente	17	92%	8	4%
Países en desarrollo	1,200	78%	2,722	50%
Mundial	1,201	83%	2,722	38%

Fuente: IEA (2015b).

Como puede verse en el cuadro 9.1, el 17% de la población mundial carece de acceso a la electricidad. De ese total el 53% se encuentra en África, el 44% en países asiáticos en desarrollo, en tanto que los países de América Latina (LA) y los del Medio Oriente (ME) representan el 3% en conjunto (2% en AL y 1% en ME). En cuanto al consumo tradicional de leña para cocción y calefacción, el 50% de la población en países en desarrollo utiliza este tipo de energéticos para subsistir. Aproximadamente el 70% se encuentra en países asiáticos en desarrollo, en tanto que África representa casi el 28%, y América Latina y Medio Oriente representan el 2%.

¿Qué conclusión puedes obtener del cuadro 9.1?

¿El acceso a los servicios energéticos en el mundo es o no es equitativo? ¿Por qué?

Frente a esta situación, el acceso a la electricidad y a los sistemas de cocción y combustibles más limpios se plantea como solución para mejorar la salud de la población (p. e. con la reducción de la contaminación del aire en las viviendas), así como una oportunidad para propiciar la producción agroindustrial y de alimentos y la creación de empleos. Las tecnologías energéticas que se necesitan son relativamente asequibles y pueden ser fabricadas localmente (como las estufas mejoradas de leña).

Una ventaja adicional es que en muchas ocasiones no se requiere de opciones de suministro de energía centralizada o a gran escala, cuya infraestructura se asocia con altos costos de inversión, operación y mantenimiento. Esto es posible porque actualmente existen opciones tecnológicas y dispositivos de conversión para uso final que operan de forma distribuida, es decir, son tecnologías y dispositivos de conversión que están cerca del usuario final.

Actividad. Escribe un ejemplo de fuente energética cuya producción y distribución sea centralizada y argumenta por qué.

La operación de estos sistemas también implicaría una mejora en el nivel educativo y en la escolarización gracias a los mejores servicios de energía, tales como iluminación, calefacción, refrigeración, etc., y que son de menor costo social.

Las tecnologías y dispositivos de conversión distribuidos también permiten realizar la electrificación rural y mejorar los servicios médicos, ya que los medicamentos se pueden conservar mejor y es posible utilizar equipos médicos más avanzados (GEA, 2012).

9.3. ENERGÍA Y CRECIMIENTO ECONÓMICO

El consumo de la energía en un país está estrechamente relacionado con el crecimiento económico, sin embargo, dado que el actual patrón de consumo energético está basado en combustibles fósiles, se plantea que para preservar el crecimiento económico sustentable de un país, se deben generar políticas que impulsen la eficiencia energética junto con la inversión en fuentes de energía renovable.

¿Cómo defines a la eficiencia energética? ¿Cuál es su indicador más común?

La causalidad entre el dinamismo económico y el consumo de energía se puede analizar a partir de cuatro hipótesis (Chiou-Wei *et al.*, 2016):

1. La hipótesis de conservación: si hay una causalidad que va del crecimiento económico al consumo de energía, entonces el crecimiento económico es una directriz para modificar el consumo de energía; por lo que es posible implementar políticas encaminadas a la eficiencia energética con efectos muy reducidos o nulos en el crecimiento económico.
2. La hipótesis del crecimiento: si el consumo de energía incide en el crecimiento económico, entonces la aplicación de políticas favorables a la eficiencia energética podría tener un efecto desfavorable en el crecimiento de la economía.

3. La hipótesis de retroalimentación: existe una causalidad bidireccional entre consumo de energía y crecimiento económico.
4. La hipótesis de neutralidad: no existe causalidad entre el consumo de energía y el crecimiento económico, por lo que las políticas de conservación de energía no afectan al crecimiento de la economía.

En un estudio reciente realizado para China y otros países asiáticos, se encontró que entre los años 1965 y 2008 la hipótesis de neutralidad se cumplía, lo que significa que las políticas de ahorro y uso eficiente de la energía pueden reducir la alta dependencia respecto a la energía fósil y, por consecuencia, reducir los impactos ambientales sin impedir el crecimiento económico (Chiou-Wei *et al.*, 2016).

Otros estudios (Apergis y Payne, 2010a, 2010b, 2011; Dogan, 2016) demuestran que si se examina la relación entre el consumo de energía renovable y el crecimiento económico (medido a través de las variaciones en el Producto Interno Bruto – PIB–), así como de capital y trabajo, existe una relación de tipo retroalimentación (en el corto y largo plazo), por lo que hay un impacto positivo entre el consumo de energía renovable y el crecimiento económico en el largo plazo.

9.4. SEGURIDAD ENERGÉTICA

El modelo energético actual, basado en combustibles fósiles, plantea cuestiones políticas acerca del acceso a estas fuentes, cuyas reservas y centros de producción se ubican en muchos casos en lugares distantes de los centros de consumo, por lo que garantizar su abasto involucra diferentes actores y requiere de planeación de corto y largo plazo, así como la puesta en práctica de diferentes capacidades técnicas que en ocasiones tienen lógicas y perspectivas contrapuestas (Dyer y Trombetta, 2013).

Se puede decir que la seguridad energética requiere del suministro ininterrumpido de los servicios vitales de energía, lo cual es fundamental para todas las economías del mundo. Para la mayoría de los países, los principales desafíos de seguridad energética provienen de una alta dependencia de combustibles fósiles importados, el rápido crecimiento de la demanda energética, y la confiabilidad de la infraestructura de suministro energético (GEA, 2012).

¿Por qué las importaciones netas de energía son un indicador de dependencia energética?
¿Cómo se calculan? Aporta un ejemplo para una energía fósil utilizando datos reales.

En este sentido la seguridad energética está determinada por cuatro elementos principales:

- 1. Disponibilidad:** se refiere a la independencia relativa y la diversificación de los energéticos y servicios relacionados. También considera la procuración de una oferta ininterrumpida y suficiente, así como la minimización de la dependencia de combustibles y energéticos importados. En el tema de la diversificación se incluye la prevención de ataques o sabotaje en infraestructura crítica (centrales, ductos, redes de transmisión y distribución, etc.); la utilización de una mezcla de diferentes fuentes energéticas y no depender preponderantemente de una o dos (p. e. el transporte utiliza principalmente gasolina y diésel o la dependencia de un solo energético principal para la generación eléctrica, etc.); el desarrollo de múltiples puntos de producción y suministro de energía (p. e. evitar que la compra de gas natural sea a partir de una o dos compañías solamente), además de que esos puntos de producción y suministro estén ampliamente distribuidos geográficamente. Un aspecto importante es el acceso a recursos físicos suficientes, inversiones, tecnologías, así como la existencia de marcos legales y regulatorios adecuados.
- 2. Asequibilidad:** se refiere a que no sólo se tengan precios bajos de energía, de tal manera que los consumidores puedan acceder a los servicios energéticos disponibles, sino también a que los precios sean estables (p. e. variaciones drásticas en el precio hacen que no se puedan planear inversiones prudentes por parte de los oferentes y suministradores), además de un acceso equitativo a los servicios energéticos.
- 3. Eficiencia:** la eficiencia energética implica realizar una actividad minimizando el uso de recursos energéticos por unidad de salida, lo cual también resulta económicamente eficiente. Lo anterior incluye la sustitución de recursos o combustibles; el cambio en los hábitos y preferencias, y cambios en la mezcla de bienes o servicios favorable a los que demanden

menos energía. Se relaciona con la mejora en el funcionamiento y un mayor desarrollo de equipos y tecnologías eficientes, así como con el cambio en los patrones de uso comportamiento de los consumidores.

- 4. Sustentabilidad:** se refiere a minimizar los daños e impactos negativos a la sociedad, al ambiente y a la economía que pueden resultar de la instalación y operación de infraestructura energética. También se refiere a asegurar que los sistemas energéticos sean socialmente aceptables; que la tasa de explotación de los recursos renovables no exceda su tasa de regeneración; que la contaminación y la degradación ambiental no exceda las capacidades de asimilación de los ecosistemas, y finalmente, establece como prioridad que la operación de los sistemas energéticos se realice con daños mínimos al ambiente.

Dado el patrón de uso de energía que predomina actualmente, la seguridad energética en el mundo enfrenta diversos retos que se pueden dar a tres escalas: a) a nivel macro, que implica amenazas nacionales, supranacionales, transnacionales y globales (p. e. amenazas geopolíticas y guerra, barreras para inversiones globales, externalidades transnacionales –como el cambio climático–); b) a nivel micro, lo cual incluye amenazas locales como la seguridad de procesos industriales; el funcionamiento de equipos a nivel doméstico, etc.); y c) a nivel medio, lo cual abarca amenazas a instalaciones, centros de producción o transformación de energía, infraestructura e instalaciones industriales.

De los tres niveles de reto para la seguridad energética planteados en el texto ¿Cuál es el más probable para México? Explica brevemente por qué.

Las políticas encaminadas a promover la eficiencia energética, así como el uso de energías renovables son una herramienta para disminuir el riesgo que representan algunas de las amenazas identificadas en los tres niveles mencionados. Por ejemplo, reducir el nivel de importaciones de combustibles y energéticos, así como reducir la tasa de agotamiento de recursos fósiles finitos.

En todos los temas expuestos hasta ahora, el ahorro y el uso eficiente de la energía y el aprovechamiento de las fuentes de energía renovable son temas transversales que pueden representar una solución a los problemas actuales y futuros

de suministro de energía que enfrenta la sociedad y más aún, convertirse en pilares para la transición hacia un sistema energético sustentable, limpio y seguro.

9.5. HACIA LA IMPLEMENTACIÓN CONJUNTA DE OPCIONES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES

La mejor combinación para descarbonizar y hacer más sustentables a los sistemas energéticos en general es la implementación de medidas de eficiencia energética y el uso de energías renovables. Se ha demostrado que la aplicación conjunta de medidas en ambos aspectos es muy relevante, tanto por su potencial de reducción de contaminantes y de gases de efecto invernadero (GEI), como por los importantes beneficios económicos que implican.

*¿Por qué se habla de descarbonizar un sistema energético?
Explica el origen del término y argumenta tu respuesta.*

La eficiencia energética puede definirse como la utilización de cantidades decrecientes de energía para obtener el mismo monto de un servicio energético. Por ejemplo, en la iluminación se pueden utilizar dispositivos como los focos incandescentes, que convierten aproximadamente el 5% de la energía eléctrica que consumen en luz, en tanto que una lámpara fluorescente compacta convierte hasta un 65% de la energía eléctrica en luz, y existen los focos que utilizan los diodos emisores de luz (LED por sus siglas en inglés) que pueden convertir hasta el 95% de la electricidad que consumen en luz para iluminación.

Si se comparan con otras opciones de descarbonización de los sistemas energéticos, las medidas de eficiencia energética son costo-efectivas y rápidas de implementar, ya que en muchas ocasiones estas opciones tienden a arrojar costos negativos (que representan beneficios) e implican importantes reducciones de mitigación de emisiones de GEI y de otros contaminantes. Aun cuando algunas de estas opciones enfrentan la situación de tener costos incrementales altos, estos pueden ser subsanados frecuentemente con los ahorros provenientes de los menores requerimientos de combustibles convencionales.

9.6. MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS DE LA OFERTA Y LA DEMANDA DE ENERGÍA

¿Cuál es la utilidad de un escenario base? ¿Qué es una sustitución inter-energética? ¿Qué enfoques se utilizan para analizar la demanda energética?

La elaboración de escenarios de energía requiere de conocer la estructura y las tendencias actuales en la evolución tanto de la oferta, como de la demanda energética. Esto es particularmente importante para determinar lo que se denomina el escenario base o tendencial, que refleja el *statu quo* del sistema energético y de las políticas energéticas vigentes, así como las que se desea modificar para lograr las nuevas metas y objetivos establecidos para un sistema energético determinado. En la siguiente sección se abordarán algunos de los métodos más usados para hacer el análisis de la oferta y la demanda eléctrica.

9.7. ANÁLISIS DE LAS SUSTITUCIONES INTER ENERGÉTICAS

El término de *transición energética*, según Guidolin y Guseo (2016), se refiere a un cambio estructural mayor en los sistemas energéticos, especialmente en la oferta de la energía primaria (Marchetti, 1977). De acuerdo con este enfoque, es posible registrar sustituciones inter energéticas a gran escala lo largo de la historia de los sistemas energéticos.

Según Percebois (1989) “toda elección tecnológica es al mismo tiempo una elección energética”. Las inercias observadas hasta ahora en los cambios tecnológicos y la renovación de los equipos, tanto de la oferta como de la demanda energética explican que el paso de una forma dominante de energía a otra opera a un ritmo relativamente lento.

En ese sentido, como se vio al principio del capítulo, a partir de la Revolución industrial que se originó en el siglo XVIII, se observa que las fuentes de energía se sustituyen entre sí a un ritmo que puede ser calculado y extrapolado con cierta aproximación. Este precepto fue desarrollado por Marchetti (1977) quien representó la evolución de los sistemas energéticos como un proceso de sustitución de fuentes primarias de energía, indicando que existe una sucesión de “ondas de energía” con cierta periodicidad y “fatalidad” en la que emergen y se sustituyen la leña, el carbón,

el petróleo, el gas natural, la energía nuclear, etc. Este autor señaló que las transiciones energéticas coevolucionan con el desarrollo de innovaciones tecnológicas, cuya difusión es esencial para la consolidación de una nueva fuente de energía (Marchetti, 1977 citado por Guidolin y Guseo, 2016).

¿Qué componentes tecnológicos puedes asociar con las sustituciones inter energéticas ocurridas entre el siglo XVIII y el siglo XX?

De acuerdo con Percebois (1989), Marchetti mostró que a nivel mundial las sustituciones energéticas son y siguen siendo progresivas, por lo que una nueva fuente de energía requiere de un siglo para ir del 1% a 50% del balance de energía primaria. Es decir, una fuente de energía reemplaza a otra antes de que se hayan agotado los recursos conocidos de esta última, y su tasa de penetración se puede expresar matemáticamente como:

$$\frac{dF}{F} = \alpha (1 + F) \text{ o } \text{Log} \left(\frac{f}{1-F} \right) = \alpha t + \beta$$

Donde F es la parte del mercado cubierto por una fuente dada, α es un parámetro específico para cada mercado energético y β es una constante positiva.

Así Percebois (1989) plantea que, para medir las sustituciones inter energéticas se tienen tres indicadores, a saber:

- 1. Coeficiente de velocidad.** Si Q indica la cantidad total de la energía consumida en un año para un sistema energético o un sector específico y Q_i es uno de los componentes de esta cantidad, donde $Q = \sum Q_i$ con $i = c, p, g, e$ (donde c representa a los combustibles minerales sólidos, p a los productos derivados del petróleo, g al gas natural y e a la electricidad) y si se adopta una forma exponencial para la función $Q(t)$, se obtiene entonces una expresión de la tasa de progresión o de regresión de Q_i en términos del análisis de la evolución temporal de Q_i/Q , que se puede denotar como:

$$R_{it} = \frac{Q_{it}}{Q} = a_i t + b_i$$

- 2. Coeficiente de magnitud.** Este indicador complementa la información proporcionada por el anterior y ayuda a identificar las sustituciones inter energéticas (es decir, cambios en el uso de combustibles o energéticos). Se expresa por un componente de energía en expansión, y el papel que desempeña este componente en el cambio en la estructura del consumo de la energía durante un período dado. De esta forma, suponiendo que entre el año base (Q_{i0}) y el año final (Q_{in}), Q se incrementa con ΔQ (i.e., $Q_n - Q_0$) y Q_i con ΔQ_i (i.e., $Q_n - Q_{i0}$) y al mismo tiempo, ciertos componentes disminuyen en un volumen total expresado como ΔS . Entonces se adopta como un indicador de magnitud del componente i la siguiente expresión:

$$A_i = \frac{\Delta Q_i}{\Delta Q + \Delta S} \text{ donde } \sum A_i = 1$$

- 3. Un coeficiente de sustitución.** Si se tienen dos componentes, a saber, Q_i y Q_j que se están sustituyendo el uno al otro y ambos se expresan en la misma unidad energética, por ejemplo, en toneladas equivalentes de petróleo (tep), entonces la tasa marginal de sustitución es necesariamente igual a -1 (para un valor dado de Q). Por lo que para construir un coeficiente de sustitución se tiene que:

$$\begin{aligned} R_i &= a_i t + b_i \\ R_j &= a_j t + b_j \end{aligned}$$

Si se elimina t se obtiene:

$$R_i = m_{ij} R_j + h_{ij}$$

Donde
$$m_{ij} = \frac{a_i}{a_j} \text{ y } h_{ij} = b_i - \frac{a_i}{a_j} b_j$$

por lo que el coeficiente m_{ij} puede ser interpretado como un coeficiente de sustitución entre i y j ($m_{ij} = \Delta R_i / \Delta R_j$ es necesariamente negativo). Por lo que se tiene que:

$$Q_i = m_{ij}Q_j + h_{ij}Q$$

Así que, para Q constante, el coeficiente m_{ij} corresponde a la tasa marginal de sustitución de i a j (siempre que i y j varíen) y es igual a -1 . La interpretación que se puede dar a los resultados observados para m_{ij} puede ser: si $|m_{ij}| > 1$ significa que $|\Delta Q_i| > |\Delta Q_j|$ y es como si, Q siendo constante, la forma de energía i ha reemplazado no sólo a la forma de energía j , sino también a otros componentes de Q . Si $|m_{ij}| = 1$, entonces ΔQ_i compensa la variación ΔQ_j para cada tep (y no hay sustitución de otros componentes energéticos). Por último, si $|m_{ij}| < 1$, con $|\Delta Q_i| < |\Delta Q_j|$ significa que el coeficiente $m_{ij} > 1$ y que el componente j sustituye al componente i . Se observa que este coeficiente permite estimar la sustitución de dos formas de energía a la vez.

Estos indicadores pueden combinarse, lo que permite obtener una idea precisa de las sustituciones inter energéticas que se observan en el proceso de configuración de la oferta de energía total de un país, un sector o una rama.

De lado de la oferta, también es conveniente analizar los sectores de producción de energía de forma desagregada por tecnología de conversión y fuente de energía, para simular no solamente las sustituciones inter energéticas sino también las tecnológicas; tomando como ejemplo al sector eléctrico, la oferta de electricidad se puede desagregar, por ejemplo, como se muestra en la figura 9.2.

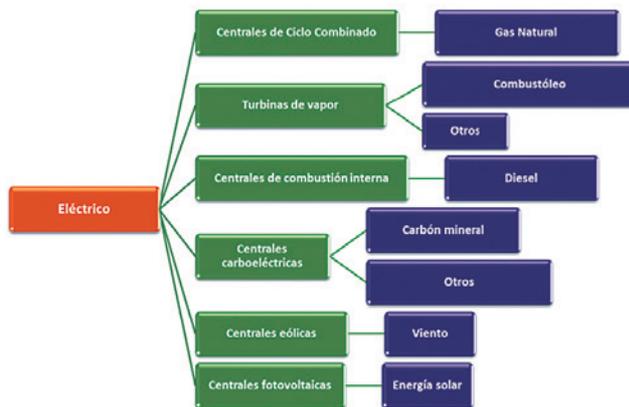


Figura 9.2. Ejemplo de desagregación del sector de oferta de electricidad. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la información de que dispones ¿Qué fuentes energéticas para la generación de electricidad están en vías de ser sustituidas? ¿Cuáles consideras que permanecerán durante las próximas décadas? ¿Cuáles crees que son las fuentes emergentes? ¿Qué papel juega la tecnología en estos procesos?

9.8. MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS DE LA DEMANDA ENERGÉTICA

En este apartado se abordarán dos marcos para analizar la situación actual del consumo y la proyección de la demanda de energía, que son componentes relevantes en la construcción de escenarios energéticos. El primero de ellos sigue los enfoques llamados tradicionales y que tienen una perspectiva *top down* [de arriba hacia abajo], partiendo de la demanda agregada, mientras que el segundo marco tiene un enfoque denominado *bottom-up* [de abajo hacia arriba], en donde el análisis de la demanda energética se realiza a partir de los requerimientos desagregados de la energía por uso final en los distintos subsectores de consumo de los sistemas energéticos. Cabe resaltar que el análisis de la demanda energética en ambos enfoques debe incluir una descripción general de las tendencias generales de la demanda total de energía en el pasado (Bhattacharyya, 2011).

9.8.1. Enfoques de demanda energética agregada

Desde la perspectiva tradicional se tienen los siguientes métodos analíticos de la demanda energética agregada a nivel macro o a nivel sectorial basados en indicadores para describir, por un lado, el cambio en la demanda de energía agregada y, por otro, su relación con variables económicas clave. De estas, las más importantes son: a) las tasas de crecimiento, b) las elasticidades de la demanda, y c) las intensidades energéticas:

- a) Tasas de crecimiento. Se utilizan para describir tendencias y pueden estimarse anualmente o como promedios en un periodo dado. La tasa de crecimiento anual se estima a través de la siguiente ecuación:

$$a = (E_{t+1} - E_t) / E_t$$

Donde a es la tasa anual de crecimiento de la demanda de energía, E_{t+1} es el consumo de energía en el año $t + 1$, y E_t es el consumo del año t .

Por su parte, una tasa promedio de crecimiento en un periodo determinado se estima por medio de la siguiente ecuación:

$$a = \left(\frac{E_{T_1}}{E_{T_0}} \right)^{1/(T_1 - T_0)} - 1$$

Donde a_g es la tasa media anual de crecimiento, E_{T_1} es la demanda de energía en el periodo T_1 (año final del periodo) y E_{T_0} es la demanda de energía en T_0 (año inicial del periodo).

- b)** Elasticidad de la demanda. Mide cuánto podría cambiar la demanda energética (en términos porcentuales) en función de la variación de una determinada variable económica. En este cálculo generalmente se utilizan tres variables económicas principales, también llamadas directrices, por su presumible impacto en el consumo de la energía: el Producto Interno Bruto (PIB), los precios y los ingresos per cápita. Así también existen dos formas de calcular las elasticidades: a) usando las tasas de cambio anual del consumo de energía y de la variable económica directriz (PIB, valor agregado sectorial, precios o ingresos per cápita) y, b) usando relaciones econométricas estimadas a partir de datos de series de tiempo. Las elasticidades se calculan de la siguiente manera:

$$e_t = \frac{(\Delta CE_t / CE_t)}{(\Delta I_t / I_t)}$$

Donde e_t es la elasticidad que se desea estimar, t es un periodo dado, CE es el consumo de energía, e I es la variable económica directriz que tiene un impacto en el consumo de energía. Finalmente, Δ es el cambio en la variable principal en el periodo t .

Al ser la elasticidad una resultante de la variación en el consumo de energía y de variables directrices como los precios y los ingresos ¿el resulta-

do puede tener signo positivo o negativo? ¿En qué casos crees que ocurra esto?

- c) Intensidad energética. Mide los requerimientos de energía por unidad de riqueza creada (PIB o valor agregado de un sector). El consumo de energía puede referirse a un energético en particular o a la agregación de varios energéticos y este indicador se puede calcular de la siguiente manera: Para un solo energético:

$$IE_t = \frac{E_t}{I_t}$$

Donde IE_t es la intensidad energética para el año t , E_t es el consumo de energía en el año t , e I_t es el valor de la riqueza creada en moneda constante (PIB o valor agregado).

Para el caso de energéticos agregados:

$$IE_t = \frac{\sum_{i=1}^n E_{it}}{I_t}$$

Donde E_{it} es el consumo de energía del tipo i en el año t .

Para realizar este cálculo, generalmente las variables económicas se expresan en moneda constante (es decir, descontando la inflación). Así también, dependiendo del tipo de demanda, se utiliza una variable económica acorde a las características del sector de consumo y a la actividad que se desea cuantificar. Por ejemplo, es usual medir las relaciones entre la demanda energética de todo un país o del sector transporte nacional o del sector residencial nacional y el PIB. En el caso de los sectores industrial, agricultura y comercial, el análisis de la demanda sectorial se hace con frecuencia en relación con el valor agregado de cada sector.

¿Por qué es importante descontar la inflación cuando se calcula la intensidad energética?

Existen algunos inconvenientes al utilizar el PIB o el valor agregado, ya que, por ejemplo, para países en vías de desarrollo estas variables podrían no estar contabilizando el monto proveniente de la economía informal, así como otros problemas de contabilización macroeconómica. Del lado de la medición del consumo de energía puede haber también problemas, ya que suele suceder, por ejemplo, que se esté desestimando el uso de la biomasa tradicional o de consumos energéticos que no están registrados, como el uso de “diablitos” para suministro de electricidad, etcétera.

Finalmente, se prefieren los métodos econométricos para analizar los efectos de los precios y los ingresos sobre el consumo energético. Para una mayor descripción de estos métodos se puede consultar Bhattacharyya (2011).

9.8.2. Enfoques por usos finales de la energía

Los métodos por usos finales surgen de ciertas deficiencias que no capturan los escenarios que parten de métodos de tipo *top-down*, como son las características específicas de cada sector económico. Estos métodos se aplican a nivel sectorial y contribuyen a dar información detallada, que es útil para formular políticas específicas relacionadas con la conservación de energía (ahorro y eficiencia energética), la sustitución de combustibles y la promoción de tecnologías sustentables.

Para la construcción de un escenario por usos finales, el sistema energético debe ser caracterizado incluyendo toda la cadena que va desde los recursos primarios hasta los servicios energéticos, como puede verse, a manera de ejemplo, en la figura 9.3. En general, el sector de energía abarca las etapas que van desde la extracción de los recursos de energía primaria hasta la entrega de energía final para su uso en las diversas tecnologías de uso final (GEA, 2012).

Generalmente, la demanda de energía final se desagrega en sectores tales como: industrial, transporte, residencial, comercial, agricultura y otros. Es importante resaltar que la información técnica y económica para caracterizar a cada uno de estos sectores en ocasiones es exhaustiva y no es fácil de recabar.

Cada sector se puede desagregar en subsectores atendiendo a los usos finales comunes, homogeneidad en el consumo de energía y el comportamiento de la de-

manda. Así, se proponen las siguientes estructuras de desagregación para los tres sectores de mayor consumo de energía.

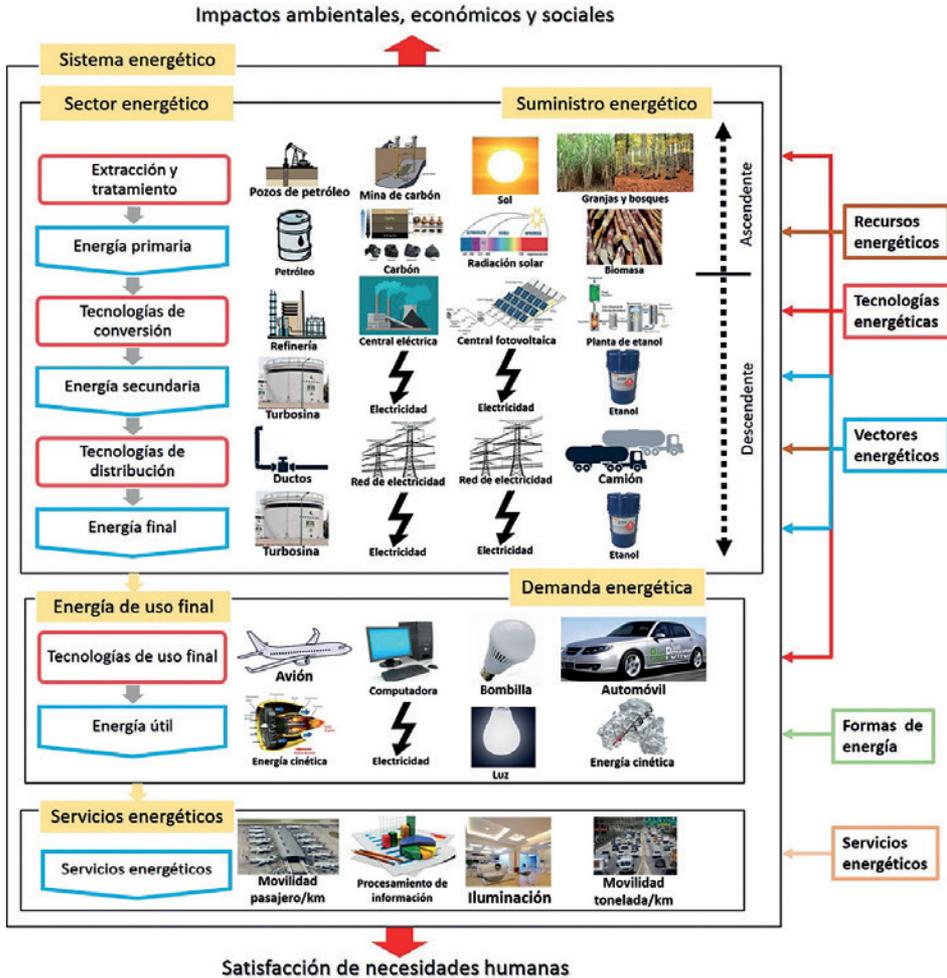


Figura 9.3. Diagrama esquemático de un sistema energético.

Fuente: elaboración propia con base en GEA (2012).

- Sector industrial.** Generalmente se tienen tres subsectores principales: minería, manufactura y construcción. El subsector de manufactura se desagrega a su vez en varias categorías atendiendo a industrias intensivas en energía y aquellas que no lo son. La proporción de la energía final consumida por este sector depende del grado de industrialización y de desarrollo económico de un país. La figura 9.4 muestra una desagregación del consumo energético industrial.

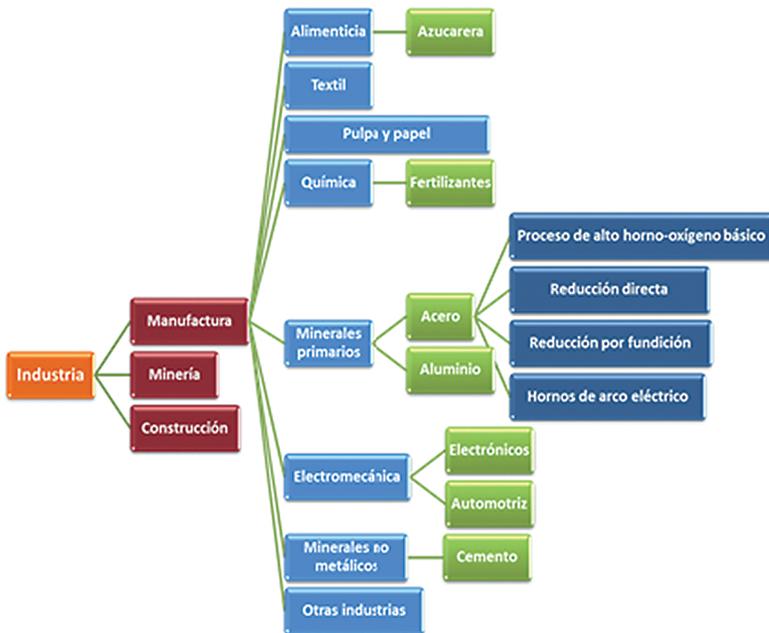


Figura 9.4. Desagregación del consumo energético en el sector industrial y ejemplo de usos finales de la energía en la sub rama del acero.

Fuente: basado en Bhattacharyya (2011).

- Sector transporte.** Generalmente en este sector el consumo de energía se desagrega por modo de transporte, como el automotor, aéreo, ferroviario, etc., y también se desagrega en dos tipos principales: transporte de per-

sonas y de carga. Cada modo de transporte utiliza tecnologías, y a su vez combustibles específicos. Una desagregación para este sector se muestra en la figura 9.5.

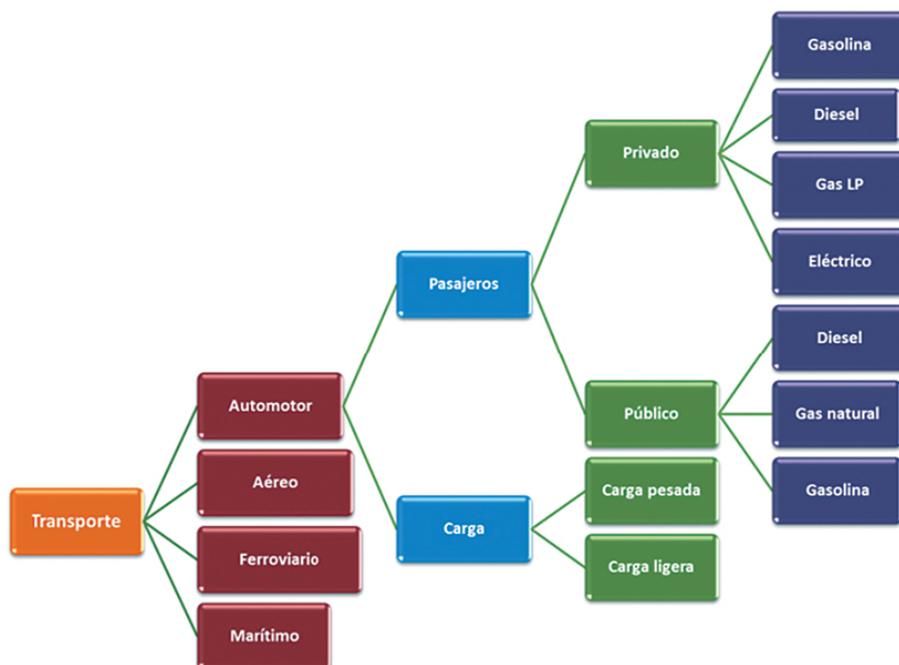


Figura 9.5. Desagregación de la demanda de energía en el sector transporte.

Fuente: basado en Bhattacharyya (2011).

- Sector residencial.** La desagregación de este sector se realiza dependiendo de los usos finales en las viviendas. Cabe señalar que en países en desarrollo generalmente se identifican dos tipos de viviendas: rurales y urbanas, observándose que en países desarrollados la parte rural es muy pequeña. Los usos finales en una vivienda atienden principalmente a las necesidades básicas, incluyendo iluminación, acondicionamiento de espacio (calefacción o enfriamiento), cocción de alimentos, refrigeración de

alimentos, calentamiento de agua para usos sanitarios, etc. Una desagregación por usos finales para este sector se puede ver en la figura 9.6.

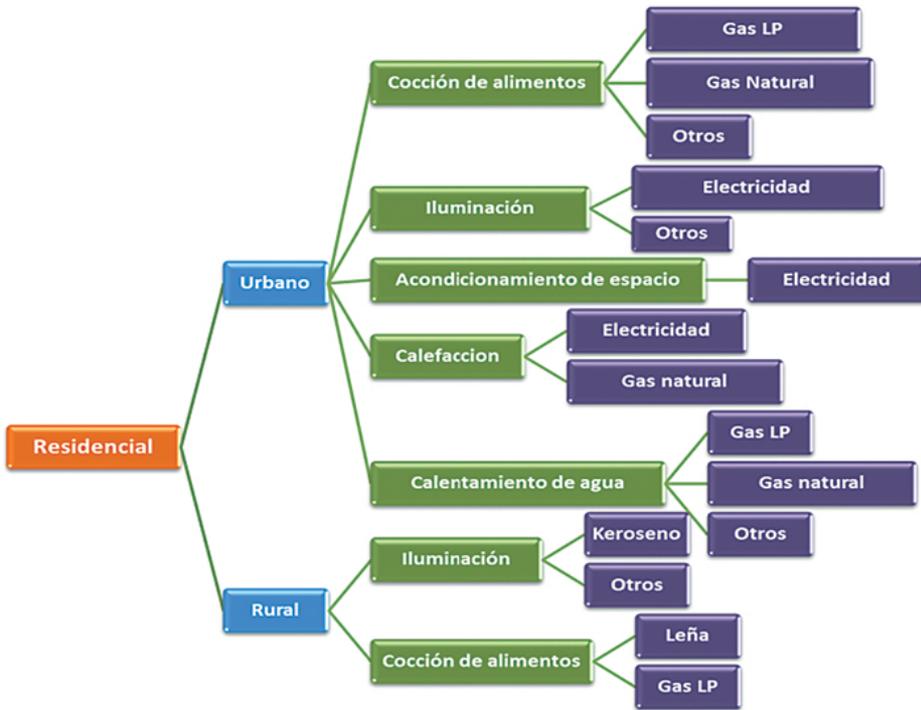


Figura 9.6. Ejemplo de desagregación por usos finales de la demanda de energía del sector residencial.

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la información de que dispones ¿cuál es el sector de consumo final que se consolidó en los últimos años como el principal consumidor de energía en los países industrializados? ¿A qué sector desplazó?

9.9. CONSTRUCCIÓN DE ESCENARIOS ENERGÉTICOS

¿Qué se entiende por “escenario” en el contexto de la planeación? ¿Cuáles son los lineamientos metodológicos para construir un escenario energético? ¿Cómo se incorpora el aspecto de la sustentabilidad en los escenarios energéticos? ¿Qué escenarios energéticos se proponen para México?

La elaboración de escenarios incluye el análisis de tendencias, eventos posibles y situaciones deseables bajo una visión global e integral del futuro. Como método, Godet (1979) lo define como “un análisis que comprende cierto número de etapas muy precisas (análisis del comportamiento del sistema en estudio, análisis retrospectivo, estrategia de actores, elaboración de escenarios) que se encadenan en una secuencia lógica”.

Según Zavala (2000), los escenarios son “modalidades metodológicas” que permiten el análisis estructural de la economía, logrando así analizar situaciones alternativas posibles que limitan el grado de incertidumbre y facilitan la previsión y la orientación de las políticas en el mediano y largo plazo”.

En tanto que Vergara *et al.* (2010) indican que una definición simplificada considera al escenario como la descripción de un futuro potencial o posible, incluyendo el detalle de cómo llegar a él. También nos dicen que los escenarios no son empleados para predecir el futuro, más bien son un mecanismo que sirve para comprenderlo y visualizarlo mejor.

Según Heidjen (1998) existen dos tipos de escenarios: los exploratorios, que parten de tendencias pasadas y presentes que conducen a un futuro posible, y los de anticipación o normativos, los cuales se construyen sobre imágenes acerca del futuro que pueden ser deseables. Este autor plantea que los escenarios se construyen a través de:

1. La percepción del presente: en esta fase se delimita el sistema a estudiar y su contexto; el horizonte temporal de estudio y la formulación de supuestos iniciales sobre las variables esenciales.
2. Percepción del futuro: en esta fase se hace un análisis retrospectivo del sistema bajo estudio, indagando sus mecanismos evolutivos, invariantes, y tendencias a largo plazo. También deben examinarse las estrategias de

los actores, considerando los elementos estables y los indicios de cambio, así como la exploración de los factores de cambio para el diseño de escenarios posibles y alternativos.

3. Diseño del futuro deseable: en esta fase se realiza la elaboración de escenarios alternativos a partir de las evoluciones más probables de las variables esenciales, la interacción entre los actores y las transformaciones que puedan emerger.
4. Estrategias de desarrollo: una vez que se construyen los escenarios, se pueden evaluar de forma cuantitativa y de esta manera se pueden formular las estrategias óptimas para lograr un escenario deseable y con menor costo.

La teoría de la construcción de escenarios tiene los siguientes principios fundamentales (Miklos y Tello, 1991; Hadley y Short, 2001): 1) El futuro no está predeterminado, es creado; 2) El futuro emerge del presente y está sustentado por el pasado; 3) El objetivo primario no es reformar el presente sino entender las posibilidades y consecuencias de planes específicos para el futuro; 4) La formulación de planes está influida por los valores y creencias de las personas que los crean; 5) Los términos “mejor” y “deseable” tienen connotaciones subjetivas; 6) El desarrollo de escenarios permite concentrar la atención sobre una visión de largo plazo de posibilidades futuras; 7) Un escenario, para ser útil, tiene que ser relevante, integral, hipotético y plausible.

Actividad. Explica con tus propios argumentos los cuatro aspectos del punto 7 de los principios de construcción de escenarios planteados por Miklos y Tello (1991) y Hadley y Short (2001).

Nakicenovic *et al.* (1998) expresan que una metodología rigurosa y científica exige que cada escenario esté basado en un conjunto de hipótesis consistente internamente y reproducible sobre relaciones claves y factores de cambio, que se deriva del estudio histórico y actual de la situación que se analiza. Asimismo, se señala, que la formalización en la construcción de escenarios pasa por el desarrollo de modelos

formales de representación. Los modelos de representación de escenarios que han sido desarrollados o adaptados a estos estudios son STAIR, MARKAL, SCENARIO GENERATOR, 11R, MESSAGE III, RAINS, MAGICC, BLS, SAFIRE, CEF-NEMS, POLES, INVERT, ENERGY PLAN, LEAP, etcétera.

Así, Martinot *et al.* (2007) realizan una revisión de escenarios mundiales haciendo énfasis en las fuentes de energía renovable, así como en algunos casos de países específicos. En su estudio plantean que los escenarios pueden ser vistos como una herramienta para cuestionarse “qué pasa si...”. Por ejemplo, se podría preguntar: “si las políticas aceleran el crecimiento de las energías renovables, ¿cuál es la diferencia entre situaciones con y sin [este tipo de] políticas?”

9.10. METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE ESCENARIOS ENERGÉTICOS

La construcción de escenarios energéticos se rige por lineamientos metodológicos generales, los cuales se describen a continuación:

1. Planteamiento del sistema energético bajo estudio. El sistema energético que se analizará se delimita, considerando que puede abarcar un país, un sector económico, un energético, un uso final, un conjunto de usuarios, etc. También se determina qué nivel de análisis se va a llevar a cabo, por ejemplo, si va a ser de forma agregada, por usos finales, por energético, etc. Este paso también implica establecer qué información se requiere y de qué forma se obtiene. Adicionalmente se establece qué tipo de análisis se va a realizar: energético, económico, ambiental, financiero, de mitigación del cambio climático, etc. Por ejemplo, en Islas *et al.* (2015) se establece como sistema bajo estudio todo el sistema energético en México (oferta y demanda), y prevalece un enfoque de análisis de la demanda de energía por usos finales, en donde el sistema energético se divide en seis sectores: residencial, comercial, público, industrial, transporte e hidrocarburos. La oferta de energía se divide en varios sectores, pero el que se analiza detalladamente por tipo de tecnología y fuente energética es el sector eléctrico.

2. Análisis de las variables directrices que inciden en el sistema energético bajo estudio. Las variables principales que incidirán en la demanda de energía en el sistema energético bajo estudio se analizan de forma retrospectiva y prospectiva. Estas variables pueden ser el PIB, el PIB sectorial, producción, población, etc. Por ejemplo, si se concibe que la demanda futura de electricidad en el sector residencial depende del crecimiento de la población y del número de viviendas, las hipótesis que se plantean sobre el crecimiento de estas variables directrices son comunes en los escenarios tendenciales y alternativos de la demanda eléctrica.
3. Establecimiento del año de referencia o año base y del periodo de análisis. Se elige un año donde se caracteriza el sistema energético bajo estudio; este año de referencia se elige generalmente por la disponibilidad de información requerida para llevar a cabo el análisis. El periodo es el número de años que se van a proyectar, modelar y analizar en el futuro.
4. Construcción del escenario base. Es un escenario que sigue las tendencias oficiales, en donde generalmente se siguen las políticas existentes y se mantiene la utilización de las tecnologías predominantes que utilizan principalmente combustibles fósiles, este escenario se proyecta con base en esas tendencias. También se le conoce como escenario sin cambio o tendencial (se le conoce también en lengua inglesa como el escenario *Business as Usual* [BAU]).
5. Construcción de los escenarios alternativos. Un escenario alternativo es la evolución posible con base en opciones viables, tales como la aplicación de nuevas tecnologías energéticas que aprovechan fuentes de energía renovable. Por ejemplo: en un escenario alternativo que considere usos finales se puede simular la sustitución de calentadores a base de gas en el sector residencial por colectores solares, o bien la sustitución de equipos ineficientes por otros más eficientes (p. e. sustitución de focos incandescentes por lámparas fluorescentes compactas). También se puede simular el empleo de biocombustibles a partir de tecnologías existentes (p. e. uso de etanol anhidro en el sector transporte), etc. Este escenario alter-

nativo se construye a partir del análisis detallado de las posibilidades de cambio en el sistema energético bajo en estudio. Por ejemplo, en Islas *et al.* (2015) se construye un escenario alternativo a partir de 84 opciones de aprovechamiento de energías renovables y ahorro y uso eficiente de energía que se analizan en todo el sistema energético mexicano.

6. Análisis costo-beneficio de los escenarios. También se puede realizar un estudio de costos y beneficios de cada una de las opciones de los escenarios alternativos, en relación con las opciones convencionales correspondientes del escenario base, lo que da lugar, entre otros, a la determinación de los costos de mitigación de las opciones analizadas de los escenarios alternativos. Asimismo, este método permite estimar el costo-beneficio global de los escenarios alternativos en relación con el escenario base.

En el cuadro 9.2 se muestra un ejemplo de escenarios construidos por usos finales de la energía en donde se pueden ver los resultados en términos energéticos y ambientales para el año base, el escenario base y un escenario alternativo o de mitigación hacia el año 2020, haciendo énfasis en el uso de las energías renovables.

CUADRO 9.2
EJEMPLO DE UN ESCENARIO ALTERNATIVO POR USOS FINALES

	AÑO BASE		ESCENARIO BASE		ESCENARIO DE MITIGACIÓN	
	2011		2020		2020	
	TJ	CO _{2eq} (Gg)	TJ	CO _{2eq} (Gg)	TJ	CO _{2eq} (Gg)
Electricidad	292.77	46.73	309.38	44.40	285.50	43.87
Iluminación interior	80.3	12.82	85.02	12.20	73.10	10.51
Iluminación exterior	17.94	2.86	17.94	2.57	17.94	3.11
Refrigeración	49.48	7.90	51.31	7.36	45.01	6.42

Equipo de cómputo	14.26	2.28	15.39	2.21	10.69	1.17
Aire acondicionado	12.9	2.06	15.04	2.16	11.09	1.61
Calefacción de espacio	1.27	0.20	1.48	0.21	1.48	0.21
Misceláneo	11.87	1.89	12.99	1.86	12.99	1.65
Motores	6.73	1.07	7.01	1.01	7.01	1.08
Equipamiento especial	44.63	7.12	46.77	6.71	46.77	5.60
Otros	53.38	8.52	56.41	8.09	56.41	12.09
Bombas de calor					2.99	0.42
Gas LP	53.67	3.39	58.16	3.67	29.57	1.87
Equipamiento especial	14.7	0.93	14.92	0.94	14.92	0.94
Cocción y calentamiento de agua para cafeterías y restaurantes	6.8	0.43	10.25	0.65	10.25	0.65
Calentamiento de agua para regaderas	0.19	0.01	1.01	0.06	0.13	0.01
Supermercado	0.18	0.01	0.18	0.01	0.18	0.01
Calentamiento de agua para la Alberca Olímpica	31.8	2.01	31.80	2.01	4.09	0.26
Diesel	0.002	0.16	0.01	0.67	0.00	0.05
Calentamiento de agua para regaderas	0.002	0.12	0.01	0.61		
Plantas de emergencia	0.001	0.04	0.00	0.05	0.00	0.05
Total	346.44	50.28	367.54	48.73	315.07	45.79
% 2020 con respecto a 2011			6.1%	-3.1%	-7.50%	-11.30%

Fuente: Escobedo *et al.* (2014).

Actividad. Utiliza la información del cuadro 9.2 para analizar las principales diferencias entre el escenario base y el de mitigación en lo referente a requerimientos de energía y emisiones evitadas por: a) tipo de energético, b) uso final.

9.11. HACIA UN SISTEMA ENERGÉTICO SUSTENTABLE

El análisis de los retos actuales y futuros del sistema energético global debe considerar los siguientes elementos (GEA, 2012):

- Una demanda de energía creciente que tiene como principales directrices el aumento de la población y el dinamismo de la economía, sobre todo en los países en vías de desarrollo (con China e India a la cabeza), así como los altos niveles de consumo de los países desarrollados, lo que en total implica un crecimiento de los requerimientos mundiales de energía hasta del 2% anual.
- Más de 1,200 millones de personas que no tienen acceso a la electricidad y más de 2,700 millones de personas en el mundo que dependen de la biomasa tradicional para cubrir una parte sustantiva de sus necesidades energéticas.
- Una alta dependencia de los recursos energéticos fósiles.
- Altas emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático.
- Contaminación ambiental con efectos negativos en la salud, tierra, agua, etcétera.
- Alta vulnerabilidad de los suministros de energía, que incide negativamente en el grado de seguridad energética.

Estos factores contravienen los principios de un sistema energético sustentable, el cual, como plantea GEA (2012), atiende a los siguientes temas:

- I. Estabilización del cambio climático global por debajo de los 2° C promedio de incremento de la temperatura y hacer esfuerzos para que este incremento no rebase los 1.5° C, lo que implica reducir drásticamente las emisiones de GEI.
- II. Aumento de la seguridad energética mediante la diversificación y la resiliencia en el suministro de energía (en particular esto implica reducir la dependencia respecto a los recursos importados de fuentes fósiles y uranio).
- III. Eliminación de la contaminación ambiental a nivel local y regional.
- IV. Lograr el acceso universal a los servicios de energía modernos, priorizando a los grupos socioeconómicos más pobres.

¿Cómo defines la generación distribuida?

¿En qué casos es posible y conveniente aplicar este esquema?

Entre los elementos que pueden contribuir al cambio hacia un sistema energético sustentable están:

- A. Mejoras radicales en eficiencia energética, especialmente en los sectores de uso final de la energía.
- B. Transitar hacia sistemas energéticos con uso preponderante de las energías renovables y la generación distribuida.
- C. Orientar las inversiones y las políticas públicas para desarrollar la infraestructura que posibilite el uso de las tecnologías sustentables (para más información de incentivos y mecanismos económicos para la difusión de energías renovables véase Islas y Grande (2013)).
- D. Establecer el marco institucional y regulatorio para impulsar el uso de opciones tecnológicas sustentables que contribuyan a mitigar el cambio climático.

9.12. ESCENARIOS SUSTENTABLES GLOBALES DE ENERGÍA

Los escenarios que han sido desarrollados a nivel global para transitar hacia un sistema energético mundial sustentable se han enmarcado dentro de una perspectiva enfocada al estudio de un uso más intensivo de energías renovables y el ahorro y uso eficiente de la energía, entre otros elementos.

El cuadro 9.3 muestra escenarios de largo plazo donde se plantea un alto nivel de penetración de energías renovables, principalmente en el sector eléctrico. Estos escenarios tienen como año final el 2050 y abarcan el sistema energético a nivel mundial. Se puede ver la referencia, la motivación del escenario, el modelo utilizado y el nivel de penetración de las energías renovables.

CUADRO 9.3
ESCENARIOS ENERGÉTICOS MUNDIALES CON ALTOS NIVELES
DE PENETRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES

REFERENCIA	MOTIVACIÓN DEL ESCENARIO	MODELO UTILIZADO	NIVEL DE PENETRACIÓN DE ER POR SECTOR/USO			
			ELECTRICIDAD	CALOR	TRANSPORTE	TOTAL
GI (2012)	Simula una ruta de desarrollo alternativo e indica acciones para alcanzar metas de reducción de CO ₂ así como el retiro de la energía nuclear.	Modelo de simulación MESAP/ PlaNet	61% (2030)	51% (2030)	17% (2030)	82% (2050)
			94% (2050)	91% (2050)	72% (2050)	
WWF (2011)	Realiza una evaluación de la factibilidad técnica de alcanzar una proporción de 95% de energías renovables en el sistema energético mundial.	Modelo Ecofys	100% (2050)	85% (2050)	100% (2050)	95% (2050)

IEA (2016)	Explora opciones tecnológicas para garantizar un 80% de probabilidad de limitar el aumento de la temperatura global a 2°C (Escenario 2DS High Renewables)	ETP-TIMES	71% (2050)	-	-	41% (2050)
GEA (2012)	Explora escenarios energéticos que atienden a: 1) acceso universal a electricidad y a combustibles modernos, 2) limitación en contaminación local y regional, 3) límite en el aumento de temperatura a 2 °C y 4) incremento en la diversificación para limitar el comercio de energía.	Modelo integrado MESSA-GE-IMAGE	62% (2050)	-	30% (2050)	55% (2050)

Fuente: basado en GEA (2012), REN21 (2018) y Cochran *et al.* (2014).

Como puede verse, el rango de penetración de las energías renovables en el año 2050 en los escenarios mostrados en el cuadro 9.3 va de 40% a 100%. Los escenarios que tienen los niveles más altos plantean que ello es posible si se integran medidas ambiciosas de ahorro y uso eficiente de energía, principalmente en los sectores de demanda intensivos en energía. Cabe señalar que todos estos escenarios atienden a la problemática de limitar la concentración de emisiones de GEI debido a la quema de combustibles fósiles, que tienen un impacto en el cambio climático global.

Así, también los escenarios planteados tienen una serie de supuestos relativos al contexto económico, el desarrollo de las tecnologías y el cambio en la infraestruc-

tura, lo cual tiene que ser empujado por crecientes inversiones que hagan viable la transición hacia un sistema energético sustentable basado en el uso intensivo de energías renovables y el ahorro y uso eficiente de la energía. Del mismo modo, se plantea el establecimiento de nuevas políticas o hacer más extensivas las políticas energéticas que promuevan esos cambios. Un resumen de políticas para hacer viables estos escenarios se plantea en la última sección de este capítulo.

9.13. ESCENARIOS SUSTENTABLES PARA MÉXICO

Para México también han sido desarrollados escenarios energéticos con el objetivo de mostrar que se puede llegar a tener un sistema energético más sustentable con energías renovables y ahorro y uso eficiente de la energía. Varios de estos escenarios abarcan todo el sistema energético (McKinsey y Centro Mario Molina, 2009; Johnson *et al.*, 2010; Islas *et al.*, 2015) o se realizan a nivel sectorial, abordando principalmente el papel de las energías renovables en la oferta eléctrica (Manzini *et al.*, 2001; Islas *et al.*, 2003; Islas *et al.*, 2004; Santoyo *et al.*, 2014; Vidal *et al.*, 2015). Sin embargo, son pocos los estudios que se enfocan de forma exhaustiva en las opciones de ahorro y uso eficiente de la energía y energías renovables de manera analítica, detallada y también realizando un análisis costo-beneficio.

En este sentido Islas *et al.* (2015) desarrollan un escenario energético sustentable para México con base en un uso intensivo de opciones de energías renovables y de ahorro y uso eficiente, el cual es analizado y evaluado detalladamente desde el punto de vista económico y de la mitigación del cambio climático. También se realiza un análisis costo-beneficio de al menos 84 opciones de mitigación de GEI en los sectores de consumo final de energía tales como el residencial, comercial y público, industrial, transporte, y en los sectores de hidrocarburos y eléctrico.

El escenario, que se denomina de transición hacia un sistema energético mexicano bajo en carbono, se contrasta con un escenario base o tendencial, el cual se plantea insostenible hacia el futuro por las implicaciones que tiene en términos de las emisiones de GEI.

De los resultados y conclusiones más relevantes que se obtienen de la construcción de este escenario alternativo se tiene que (Islas *et al.*, 2015):

- I. Es posible reducir 6,517 millones de toneladas de CO_{2e} en el sistema energético mexicano de manera acumulada en los próximos 25 años, lo que es equivalente al 38% de las emisiones acumuladas del escenario base en este mismo periodo. También implica que se podrían estar reduciendo hasta cerca del 60% de las emisiones de CO_{2e} en el año 2035 en relación con las emisiones del escenario base de ese año. El sector con la mayor contribución de reducción de emisiones de CO_{2e} es el de transporte, con el 49% del total, después sigue el sector eléctrico con el 27%, en tercer lugar, se ubica el sector industrial con el 15% del total. Por su parte, los sectores, residencial, público, comercial e hidrocarburos cubrirían el 9% restante. Este resultado muestra que es posible y viable transitar hacia un sistema energético mexicano bajo en carbono a través de la implementación a gran escala y a nivel nacional de las fuentes de energía renovable y de medidas de ahorro y uso eficiente de energía en todos los sectores de consumo final de energía, así como en los sectores intermedios (el sector de hidrocarburos y el de electricidad).
- II. La mayor parte de los costos marginales (o costos de mitigación) de las 84 opciones consideradas son negativos, es decir, su implementación no tiene costo.
- III. Para hacer viable este escenario de transición se tendrían que soportar costos de inversión incrementales del orden de 98,295 mil millones de dólares (MMUSD), lo que implicaría un costo anual adicional de un poco menos de 4,000 MMUSD. Así también se requiere soportar costos de operación y mantenimiento incrementales por 21,072 MMUSD lo que implica cerca de 1,000 MMUSD al año. Los beneficios provienen del ahorro en el consumo de combustibles fósiles, que es en total de 246,580 MMUSD, es decir, un poco menos de 10,000 MMUSD en promedio anual. El contraste de estos ahorros en combustible y los costos adicionales que se tienen que sufragar da lugar a beneficios económicos netos por poco más de 127 MMUSD en 25 años, lo que representaría un poco más de 5,000 MMUSD al año de beneficios netos.

- IV.** La aplicación de las medidas de mitigación incluidas en el escenario de transición analizado arroja resultados donde, por un lado, se cumplen e inclusive resultan ser más ambiciosos, tanto las metas nacionales establecidas en instrumentos legales como la Ley General de Cambio Climático (LGCC), como los compromisos de contribuciones nacionales (INDC por sus siglas en inglés) para reducir las emisiones de cambio climático que México acordó en la Conferencia 21 de las partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21 por sus siglas en inglés), llevada a cabo a finales del año 2015 en París.
- V.** En efecto, para el año 2020 se coincide en la reducción de emisiones de GEI de un 30% con la LGCC, mientras que para el año 2030 el escenario de transición presenta una reducción de GEI de 52%, siendo superior a la meta no condicionada de reducir las emisiones de GEI de 22% y a la meta condicionada de 36% de las contribuciones nacionales para combatir el cambio climático acordadas por México en París.

Observa detenidamente la figura 9.7 y explica:

- ¿Cuál es el principio aplicado para ordenar las medidas de mitigación incluidas?
- ¿Qué significado tiene el valor por debajo de cero de la mayoría de las medidas y qué significa el valor por arriba de cero de las restantes?
- ¿Qué medidas propondrías para su aplicación desde el punto de vista del costo y la eficiencia si sólo pudieras seleccionar cinco de ellas?

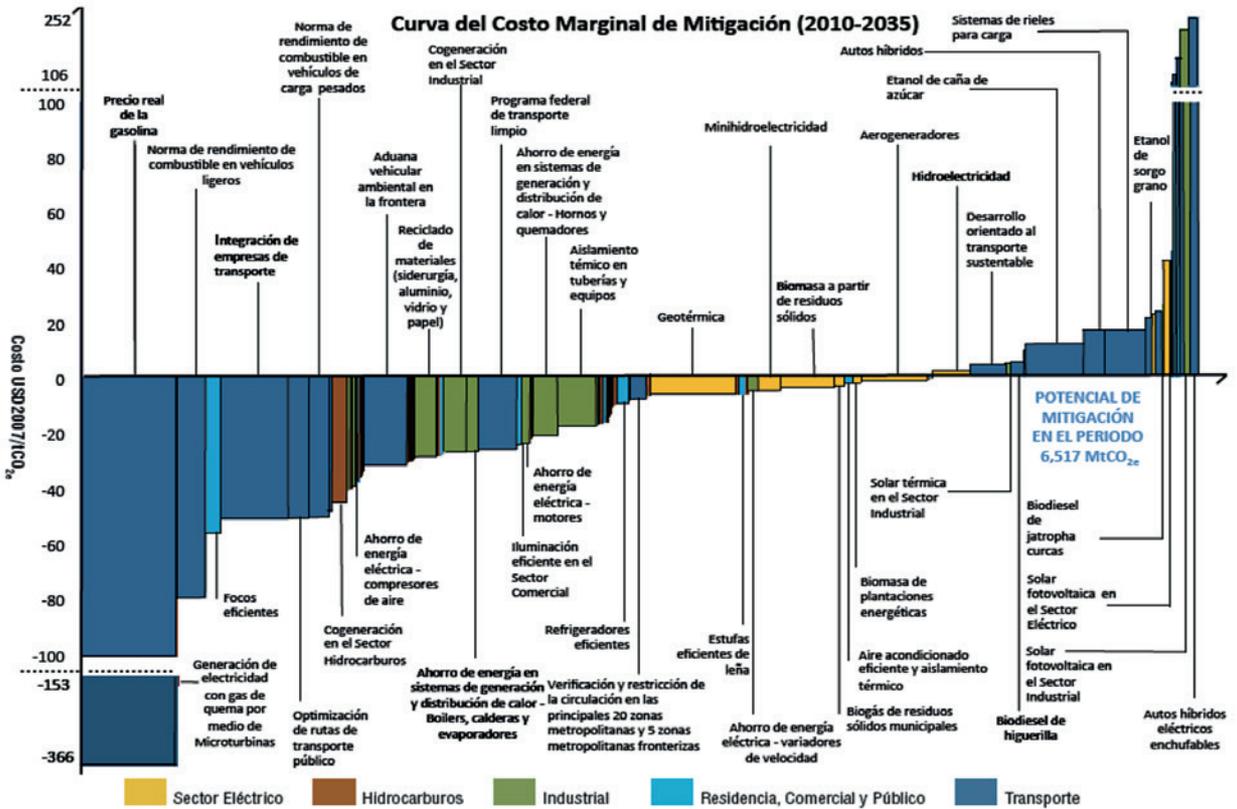


Figura 9.7. Curva de costos de mitigación para un escenario de transición

Fuente: Islas *et al.* (2015).

9.14. POLÍTICAS DIRIGIDAS HACIA UN SISTEMA ENERGÉTICO SUSTENTABLE

Para hacer viables las trayectorias energéticas en donde se transite hacia las energías renovables y con un menor requerimiento de energía debido a la implementación de opciones de ahorro y uso eficiente, y así hacer posible un sistema energético sustentable, se requiere de políticas energéticas encaminadas hacia este propósito. Algunos ejemplos de este tipo de políticas son los siguientes:

- La promoción de inversiones para extender las redes eléctricas hacia las zonas en donde se encuentran los recursos abundantes de energía renovable, así como promover las microrredes en zonas rurales y las redes inteligentes en las ciudades.
- La posibilidad de que la población pueda hacer uso de los subsidios del sector eléctrico hacia la compra de equipamiento eficiente y para el aprovechamiento de las energías renovables en los hogares.
- El incremento sustancial del financiamiento nacional e internacional para apoyar la infraestructura de un sistema energético sustentable, lo cual también significa el establecimiento de mecanismos financieros blandos que permitan al país cumplir con sus objetivos.
- La promoción de la densificación urbana ordenada y sustentable.
- El impulso al transporte público y al transporte de carga por trenes.
- La promoción de estufas de leña eficientes.
- La promoción de biocombustibles sustentables en el sector de transporte.
- La promoción de normas para el desarrollo de inmuebles inteligentes que permitan incrementar el ahorro de energía y la eficiencia energética y el uso de sistemas pasivos y activos de la energía solar y otras fuentes de energía renovable.
- El aprovechamiento energético de los residuos sólidos urbanos (RSU).
- El establecimiento de incentivos para impulsar el ahorro y uso eficiente de la energía y las energías renovables.
- El establecimiento de normas y regulaciones para el desarrollo de la infraestructura energética y equipamiento de la sociedad sustentable.
- El establecimiento de una política de información sobre las tecnologías y ventajas del ahorro y uso eficiente de la energía y de las energías renovables.
- El establecimiento progresivo de impuestos ecológicos sobre el uso de combustibles fósiles.

- La pertinencia del uso de tarifas garantizadas para apoyar la implementación de las energías renovables en los sectores en donde aún no sean competitivas.
- El impulso y mejora de la medición neta (*net metering* en inglés) para promover la generación distribuida.
- La incorporación de las externalidades negativas en el despacho eléctrico.
- El impulso a las políticas fiscales verdes, tales como la deducción de la inversión en energías renovables y el ahorro, depreciación acelerada para el equipamiento eficiente, créditos fiscales a la inversión, etcétera.
- El incremento en la inversión en investigación, desarrollo tecnológico e innovación en tecnologías eficientes y las energías renovables.

¿Qué papel crees que juega la formación de profesionales en planeación y operación de sistemas energéticos para el diseño y la aplicación de estas políticas? ¿Qué otros elementos consideras importantes para lograr un sistema energético sustentable?

Ejercicios

1. De acuerdo con el *Statistical Review of World Energy* de BP, el consumo total de energía primaria en el mundo fue de 11,266.7 mtpe (millones de toneladas de petróleo equivalente) en 2006. Dicha demanda se incrementó a 13,276.3 mtpe en 2016.

Calcula lo siguiente:

- a) Tasa de crecimiento en el periodo 2006-2016.
- b) Tasa promedio de crecimiento anual.

A partir de estos datos cómo calcularías la demanda de energía para el año 2020. ¿Cuál es el supuesto para hacerlo así?

2. De acuerdo con los datos del cuadro 9.4, el consumo energético de México se incrementó de 4,481.9 PJ (Petajoules) en 2006 a 5,108.8 PJ en 2016. Mientras que el PIB aumentó de 58 mil millones de pesos a 71 mil millones de pesos, a precios constantes de 2013. Contesta lo siguiente:
 - a) Define la elasticidad PIB de la demanda y representa su ecuación.
 - b) Calcula la elasticidad del consumo energético de México con respecto al PIB ¿Es elástico o inelástico? ¿Con el valor calculado de la elasticidad, si el PIB aumentara un 10% entre el año 2016 y 2020, en cuánto aumentaría la demanda de energía al año 2020?
3. Responde a los siguientes incisos:
 - a) Con los datos del cuadro 9.4, representa la ecuación de la intensidad energética considerando los diferentes consumos anuales de los energéticos. Calcula la intensidad energética por año y realiza un análisis de la intensidad energética entre los años 2006 y 2016.

CUADRO 9.4
CONSUMO FINAL ENERGÉTICO NACIONAL (PJ) 2005 – 2015

AÑO	PIB $\times 10^9$ Pesos	Carbón	Lefía	BC	Solar	Coques	GAS LP	Gasolinas	Querosenos	Diésel	C	GS	E	Total
2006	58.0	110.1	264.6	53.3	2.3	158.0	419.2	1337.9	118.6	667.6	109.9	531.3	709.1	4481.9
2007	59.4	85.9	263.2	49.4	2.8	176.3	458.1	1416.5	135.0	730.1	107.2	486.1	728.9	4639.6
2008	60.1	114.7	262.0	53.7	3.3	161.5	452.8	1480.1	130.4	817.4	85.9	489.2	746.1	4797.0
2009	56.9	54.5	260.7	43.5	4.0	135.9	435.8	1475.8	110.8	727.9	72.8	486.8	738.9	4547.4
2010	59.8	94.3	259.3	43.2	4.9	143.4	447.2	1494.2	114.6	752.9	57.9	530.0	766.0	4707.7
2011	62.0	166.2	258.1	41.9	5.7	144.6	434.6	1504.5	115.5	793.8	50.5	566.0	818.5	4900.0
2012	64.2	87.2	256.7	40.9	6.4	164.4	436.2	1507.0	121.5	799.1	33.5	594.6	839.9	4887.6
2013	65.1	100.1	255.4	63.8	7.2	176.3	426.1	1472.8	127.7	788.2	25.4	639.0	846.5	4928.4
2014	67.0	77.0	254.1	39.5	8.1	183.0	423.0	1456.6	136.2	779.2	15.5	657.1	868.3	4897.6
2015	69.2	84.6	252.8	37.2	9.4	191.1	417.9	1499.6	154.5	868.9	23.1	660.2	895.5	5094.7
2016	71.1	63.8	251.6	38.3	10.3	205.7	424.8	1617.3	166.9	856.3	33.6	700.9	936.2	5108.8

BC=Bagazo de Caña; GAS LP=Gas LP; C=Combustóleo; GS=Gas Seco; E=Electricidad

- b)** Sabiendo que la intensidad de carbono es la cantidad de emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}) generadas por unidad de PIB y sabiendo que cada energético tiene un factor de emisión de CO_{2e} , ¿cómo a partir de la intensidad energética se puede calcular la intensidad de carbono de una economía? ¿Cuál sería la metodología? Calcula la intensidad de carbono desde el año 2006 hasta el 2016 y explica la evolución de este parámetro.
- c)** A partir de los datos del cuadro 9.4, para el periodo 2006-2016, determina:

c.1) la ecuación

$$R_{it} = \frac{Q_{it}}{Q} = a_{it} + b_i$$

de los coeficientes de velocidad para cada energético.

c.2) los coeficientes de magnitud

$$A_i = \frac{\Delta Q_i}{\Delta Q + \Delta s} \text{ donde } \sum A_i = 1$$

de cada energético.

c.3) los coeficientes de sustitución

$$m_{ij} = \frac{a_i}{a_j}$$

Con los resultados obtenidos analiza la sustitución inter energética en el periodo mencionado señalando los energéticos que más se sustituyeron y los que más regresión tuvieron, es decir, que se sustituyeron por los otros.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este capítulo agradecen a la Lic. María de Jesús Pérez Orozco de la Coordinación de Planeación Energética del IER UNAM por el apoyo en la búsqueda bibliográfica realizada.

9.1. BIBLIOGRAFÍA

- AITKEN, D., L. BILLMAN, y S. BULL. 2004. The climate stabilization challenge: Can renewable energy sources meet the target? *Renewable Energy World*, 7 (6), 56-69.
- APERGIS, N., y J. PAYNE. 2010a. Renewable energy consumption and growth in Eurasia. *Energy Economics*, (32), 1392-1397.
- APERGIS, N., y J. PAYNE. 2010b. Renewable energy consumption and economic growth: evidence from a panel of OECD countries. *Energy Policy*, (38), 656-660.
- APERGIS, N., y J. PAYNE J. 2011. Renewable and non-renewable electricity consumption-growth nexus: evidence from emerging market economies. *Applied Energy*, (88), 5226-5230.
- BATTACHARYYA, S. 2011. *Energy economics: concepts, issues, markets and governance*. Springer. London.
- CHIOU-WEI, S., Z. ZHU, S. CHEN, y S. HSUEH. 2016. Controlling for relevant variables: Energy consumption and economic growth nexus revisited in an EGARCH-M (Exponential GARCH-in-Mean) model. *Energy*, (109), 391-399.
- COCHRAN, J., T. MAI, y M. BRAZILIAN. 2014. Meta-analysis of high penetration renewable energy scenarios. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (29), 246-253.
- CORBUS, D., J. MARK, y M. MARTÍNEZ. 1993. Renewable energy technologies for Mexico: assessing carbon emissions reductions. *World Resources Review*, 5 (3), 324-340.
- DOGAN, E. 2016. Analyzing the linkage between renewable and non-renewable energy consumption and economic growth by considering structural break in time-series data. *Renewable Energy*, (99), 1126-1136.
- DYER, H., y M. J. TROMBETTA (eds.). 2013. *International handbook of energy security*. Edward Elgar Publishing. Cheltenham.
- ESCOBEDO, A., S. BRICEÑO, H. JUÁREZ, D. CASTILLO, M. IMAZ, C. SHEINBAUM. 2014. Energy consumption and GHG emission scenarios of a university campus in Mexico. *Energy for Sustainable Development* (18) 49-57.

- EC (European Commission). 1997. *Energy for the Future: Renewable Sources of Energy*. White Paper for a Community Strategy and Action Plan. EC. Bélgica.
- FORTES, P., A. ALVARENGA, J. SEIXAS, y S. RODRIGUES. 2015. Long-term energy scenarios: Bridging the gap between socioeconomic storylines and energy modeling. *Technological Forecasting & Social Change*, (91), 161-178.
- GACCG (German Advisor Council Global Change). 2004. *World in Transition: Towards Sustainable Energy Systems*. Earthscan. London.
- GACE (German Advisory Council on the Environment) 2011. *Pathways towards a 100% renewable electricity system. Technical Report*. Germany. <http://www.umweltrat.de/EN>
- GEA (Global Energy Assessment) 2012. *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*. Cambridge University Press / International Institute for Applied Systems Analysis. Cambridge-New York-Laxenburg.
- GODET, M. 1979. *The Crisis in Forecasting and the Emergent of the Prospective Approach*. Pergamon Press. New York.
- GOLDENBERG, J. 2000. *Energy and sustainable development*. http://www.feagri.unicamp.br/energia/energia2002/jdownloads/pdf/papers/paper_Goldemberg.pdf
- GI (Greenpeace International). 2012. *Energy revolution: a sustainable world energy outlook. World Energy Scenario*. 4a edición. Greenpeace International, European Renewable Energy Council, Global Wind Energy Council. Bélgica.
- GREENPEACE / EREC (European Renewable Energy Council). 2007. *Energy Revolution: a Sustainable World Energy Outlook—Global Report*. EREC. Bélgica.
- GUIDOLIN, M., y R. GUSEO. 2016. The German energy transition: Modeling competition and substitution between nuclear power and Renewable Energy Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (60), 1498–1504.
- HADLEY, S., y W. SHORT. 2001. Electricity sector analysis in the clean energy futures study. *Energy Policy*, 29 (14), 1285-1298.
- HE, X., y D. REINER. 2016. Electricity demand and basic needs: Empirical evidence from China's households. *Energy Policy*, (90), 212-221.
- HEIJDEN, K. van der. 1998. *Escenarios. El arte de prevenir el futuro*. Panorama. México.
- HONJI, A., O. SATO, y S. YASUKAWA. 1994. Effects of Energy Demand and Fuel Prices on Carbon Dioxide Emission Reduction. *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 20 (6), 902-911.
- IBARRARÁN, M. E., A. BASSI y R. BOYD. 2015. Integrating models to assess green economy policies: Methods and application to Mexico. En *Handbook of Research Methods and Applications in Environmental Studies*. M. RUTH (ed.). Edward Elgar, Cheltenham.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. Summary for Policymakers. En *Climate Change. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth As-*

- essment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. T. STOCKER, D. QIN, G. PLATTNER, M. TIGNOR, S. ALLEN, J. BOSCHUNG, A. NAUELS, Y. XIA, V. BEXY, y P. MIDGLEY (eds.). 2013. Cambridge University Press. Cambridge.
- IEA (International Energy Agency). 2015a. *Renewables Information 2015*. IEA. Paris.
- IEA (International Energy Agency). 2015b. *World Energy Outlook 2015*. IEA. Paris.
- IEA (International Energy Agency). 2016. *CO₂ emissions from fuel combustion 2016*. IEA. Paris.
- ISLAS, J., F. MANZINI, y M. MARTÍNEZ. 2000. *Renewable energies for reduction of greenhouse gases in the Mexican electricity generation in 2025*. ISES Millennium Solar Forum 2000 – México. México.
- ISLAS, J., F. MANZINI, y M. MARTÍNEZ. 2002. Renewable energies in electricity generation for reduction of greenhouse gases in Mexico 2025. *Ambio. An International Journal*, 31 (1), 35-39.
- ISLAS, J., F. MANZINI, y M. MARTÍNEZ. 2003. Cost-benefit analysis of energy scenarios for the Mexican power sector. *Energy*, (28), 979-992.
- ISLAS, J., F. MANZINI, y M. MARTÍNEZ. 2004. CO₂ mitigation costs for new renewable energy capacity in the Mexican electricity sector using renewable energies. *Solar Energy*, (76), 499-507.
- ISLAS, J., F. MANZINI, P. MACÍAS, G. GRANDE, y M. J. PÉREZ. 2006. *Prospectiva de la demanda y oferta energética para México, Países de América Central y El Caribe. Reporte Final*. Organización Latinoamericana de Energía. México.
- ISLAS, J., F. MANZINI, y O. MASERA. 2008. A prospective study of bioenergy use in Mexico. *Energy*, (32), 2306-2320.
- ISLAS, J., y G. GRANDE. 2013. Public policies for implementing renewable energy in Mexico (Políticas Públicas para Impulsar las Energías Renovables en México). *Revista Mexicana de Física*, 59 (2), 1-14.
- ISLAS, J., F. MANZINI, P. MACÍAS, y G. GRANDE. 2015. *Hacia un Sistema Energético Mexicano Bajo en Carbono*. Reflexio Ediciones. México.
- JOHANSSON, T., H. KELLY, A. REDDY, R. WILLIAMS, y L. BURNHAM. 1993. *Renewable Energy: Renewable Energy Sources for Fuels and Electricity*. Island Press. New York.
- JOHNSON, T. M., C. ALATORRE, Z. ROMO y F. LIU. 2009. México: Estudio sobre la disminución de emisiones de carbono. The World Bank. Bogotá.
- LEYDON, K., M. DECKER, y J. WATERLOW. 1996. *European energy to 2020: a scenario approach*. Comunidad Europea. Luxemburgo.
- LONG, H., X. LI, H. WANG, y J. JIA. 2013. Biomass resources and their bioenergy potential estimation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (26) 344-352.

- McKINSEY y Centro Mario Molina (CCM), 2009. *Low-carbon growth. A Potential Path for Mexico*. McKinsey. México.
- MANZINI, F., y M. MARTÍNEZ. 1999a. Using final energies to plan a sustainable future for México. *Energy*, 24 (11), 945-958.
- MANZINI, F., y M. MARTÍNEZ. 1999b. Choosing an energy future: the environmental impact of end-use technologies. *Energy Policy*, 27 (7), 401-414.
- MANZINI, F., J. ISLAS, y M. MARTÍNEZ. 2000. Reduction of Greenhouse gases using renewable energies in Mexico 2025. *International Journal of Hydrogen Energy*, 26 (2), 145-149.
- MARCHETTI, C., 1977. Primary energy substitution models: on the interaction between energy and society. *Technological Forecasting and Social Change*, (10) 345-356.
- MARTINOT, E., C. DIENST, L. WEILIANG, y C. QIMIN. 2007. Renewable energy futures: Targets, scenarios, and pathways. *Annual Review of Environmental Resources*. 32, 205-239.
- MIKLOS, T., y M. TELLO. 1991. *Planeación Prospectiva*. Limusa. México.
- MULÁS, P. 2005. *Prospectiva sobre la utilización de las energías renovables en México. Una visión al año 2030*. Secretaría de Energía. México.
- MOURELATOS, A., D. DIAKOULAKI, y L. PAPAGIANNAKIS. 1998. Impact of CO₂ reduction policies on the development of renewable energy sources. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23 (2), 139-149.
- NAKICENOVIC, N., A. GRÜBLER, y A. McDONALD. 1998. *Global Energy Perspectives*. Cambridge University Press. Cambridge.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas) 2016. *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- PALZ, W. 1994. Role of New and Renewable Energies in Future Energy Systems. *International Journal of Solar Energy*, 14 (3), 127-140.
- PERCEBOIS, J. 1989. *Economie de l'énergie*. Editions Economica. Paris.
- RASKIN, P., T. BANURI, G. GALLOPIN, P. GUTMAN, y A. HAMMOND. 2002. *Great transition: the promise and lure of the times ahead*. Report Global Scenario Group. Stockholm Environmental Institute.
- REN21. 2018. *Renewables 2018 Global status Report (GSR)*. IRENA / IEA / PNUMA. Paris.
- SANTOYO, E., e I TORRES. 2010. Escenario futuro de explotación de la energía geotérmica: hacia un desarrollo sustentable. *Revista UNAM MX. Revista Digital Universitaria*, 11 (10). <http://www.revista.unam.mx/vol.11/num10/art95/index.html>
- SANTOYO, E., L. STAMFORD, y A Y. AZAPAGIC. 2014. Environmental implications of decarbonizing electricity supply in large economies: The case of Mexico. *Energy Conversion and Management*, (85), 272-291.

- SHEINBAUM, C. 2000. *Greenhouse Gas Energy Scenarios for Mexico in Year 2020 and Mitigation Potential of Renewable Technologies*. ISES Millennium Solar Forum 2000. Mexico.
- SUGANTHI, L., y A. WILLIAMS. 2000. Renewable energy in India – a modeling study for 2020-2021. *EnergyPolicy*, 28 (15), 1095-1109.
- VERGARA, J., T. FONTALVO, y F. MAZA. 2010. La planeación por escenarios: Revisión de conceptos y propuestas metodológicas. *Prospect*, 8, 21-29.
- VIDAL, J., P. ØSTERGAARD, y C. SHEINBAUM. 2015. Optimal energy mix for transitioning from fossil fuels to renewable energy sources – The case of the Mexican electricity system. *Applied Energy*, (150), 80-96.
- WEC (World Energy Council) 1994. *New Renewable Energy Sources*. WEC. London.
- WOHLGERMUTH, N. 1999. Cost Benefit Indicators Associated with the Integration of Alternative Energy Sources: A Systems Approach for Carinthia, Austria. *Renewable Energy*, 16 (1-4), 1147-1150.
- WWF (World Wildlife Fund). 2011. *The energy report: 100% renewable energy by 2050. Technical Report*. World Wide Fund for Nature.
- ZAVALA, M. 2000. *Metodología macroeconómica*. Monte Ávila Editores. Colombia.

Epílogo

Hacia un sistema energético sustentable

RENÉ D. MARTÍNEZ-BRAVO

CARLOS A. GARCÍA BUSTAMANTE

En el presente volumen se han descrito los principales componentes del sistema energético desde una perspectiva que para la docencia de las Ciencias Ambientales nos parece la mejor. A lo largo de los nueve capítulos abordamos sus componentes, así como sus interacciones con el ambiente y la sociedad, mostrando la relevancia de cada uno de ellos para nuestro bienestar y desarrollo.

En este texto resaltamos la importancia de la energía para el desarrollo humano, la presentamos como un medio para satisfacer necesidades. Abordamos el estudio de los conceptos de termodinámica básica, describimos los componentes del sistema energético, estudiamos la oferta y demanda de energía y su relación con cada una de las partes del sistema para evidenciar cómo en cada una de las actividades y la misma energía en el modelo actual pueden dar pauta a otro modelo del sistema energético que sea más eficiente y produzca menos efectos negativos a la sociedad y al ambiente.

Tratamos que el sistema energético mantuviera su contexto con la sociedad y en el ambiente en la mayoría de los capítulos para que no se perdiera el enfoque holístico propio de una Licenciatura en Ciencias Ambientales.

En el libro nos pareció necesario abordar el estudio de los patrones de consumo energético de los distintos sectores de la economía como el transporte, residencial, industrial, entre otros, como alternativa de comparación con el sistema energético convencional; de este modo pudimos situar a las tareas energéticas como el centro de atención de nuestra propuesta con la visión de “abajo hacia arriba” [*bottom up*] en cada uno de los sectores abordados. Este enfoque permitió identificar el papel del ahorro y eficiencia energética en los dispositivos y en los procesos, completando así la estrategia de enseñanza del tema energético.

Como parte de la enseñanza ambiental, en la parte final del manuscrito abordamos los impactos al ecosistema ocasionados por los diferentes componentes del sector energético y enfatizamos que las alternativas para mitigarlos están estrechamente ligadas a la propuesta de eficiencia, usos finales, uso de fuentes renovables de energía y de patrones de consumo que se mencionaron en los capítulos de este volumen. Para terminar, se abordó la importancia de los escenarios de energía, los cuales son herramientas fundamentales para estudiar y explorar las implicaciones de modificar el sistema energético actual. Concluimos que difícilmente se logrará una transición hacia un esquema sustentable si no se realiza un trabajo intensivo de creación de escenarios alternativos y de planeación.

Con base en todo lo anterior, se puede destacar algunas acciones para transitar hacia un sistema energético sustentable tanto en México como en el mundo:

- Es necesario abordar a la energía como un medio para satisfacer necesidades humanas, tales como la cocción de alimentos, refrigeración, iluminación, lavado y secado de ropa, acondicionamiento de espacios, transporte, entre otros. La energía no es un fin en sí mismo, sino solo un medio para satisfacer necesidades humanas.
- Es fundamental implementar la eficiencia energética en términos de la primera y segunda ley de la termodinámica. La primera aplica a la eficiencia de conversión de energía de los dispositivos (como puede ser un refrigerador para uso residencial o una caldera industrial), los cuales deben disminuir al máximo las pérdidas de energía. En el caso de la segunda ley, esta es menos aplicada actualmente pero muy importante y básicamente tiene que ver con que las fuentes de energía deben ser acordes, en términos de calidad de la energía, a las tareas a desarrollar.
- Implementación de sistemas distribuidos de energía, de manera que las fuentes de energía se acerquen a sus lugares de uso final. Esto permite disminuir la pérdida de energía por transmisión y distribución, disminuye el tamaño de los proyectos de energía (por ejemplo, puede haber varios sistemas fotovoltaicos en lugar de una gran planta termoeléctrica) y puede disminuir el riesgo financiero de los proyectos.

- Otro punto muy importante es el uso de fuentes renovables de energía, esto permitiría disminuir la dependencia de fuentes agotables, reducir los impactos ambientales y generar oportunidades de mejoras económicas y sociales de las personas, principalmente en zonas rurales. Si bien, como se menciona en el texto, el uso de fuentes renovables tiene grandes retos como la intermitencia de las fuentes.
- Engarzar el uso de ecotecnologías, como las estufas eficientes de biomasa, y las tecnologías más eficientes a las fuentes renovables de energía en el sector residencial rural y urbano como alternativa para disminuir la demanda energética y transitar hacia un cambio de hábitos de consumo y de combustibles.
- Se debe promover la justicia social en términos energéticos para resolver las necesidades de los sectores más desprotegidos, permitiendo el acceso a las mismas fuentes y calidades de energía, así como a las tecnologías más eficientes tal como lo hacen otros sectores sociales.
- Favorecer el cambio sistémico en términos de ahorro de energía, como es el encadenamiento de usos energéticos, por ejemplo, el uso de calor residual o la cogeneración a escala residencial e industrial.
- En el sector residencial se propone reformular el diseño de vivienda incorporando esquemas bioclimáticos para un uso eficiente y ahorro de energía; con ello disminuye el impacto ambiental.
- La sociedad debe tener capacidad de elegir el tipo de sistema energético que quiere para el futuro, conociendo las implicaciones ambientales y sociales de cada alternativa energética y tecnológica. En este sentido la educación e información en temas de energía es fundamental. De ahí una de las razones de ser de este texto.
- En el sistema energético se vislumbran barreras sobre todo de índole económico para la implementación de las medidas de eficiencia y de mitigación. Por lo que se requiere de financiamiento para la adquisición de tecnología eficiente y de última generación.
- Las acciones de política pública de los sistemas energéticos hacia la descarbonización como medida de mitigación se pueden realizar en dos

flancos fundamentales para atender los problemas y hacer una transición. Primero, la eficiencia energética y, segundo, el despliegue masivo de las fuentes de energía renovables. Estos elementos contribuyen a mejorar la seguridad, el crecimiento económico y la sustentabilidad energética.

- A partir del análisis, algunas acciones de política para sistemas energéticos sustentables pueden ser: 1) inversiones para extender las redes eléctricas a zonas con alto potencial de energías renovables, microrredes en zonas rurales y redes inteligentes en ciudades; 2) posibilitar a la población el uso de los subsidios eléctricos para la compra de equipamiento eficiente y que use energía renovable; 3) financiamiento nacional e internacional para infraestructura sustentable; 4) densificación urbana ordenada y sustentable; 5) transporte público y de carga eficiente; 6) promoción de equipamiento eficiente (p. e. estufas eficientes de leña); 7) desarrollo e implementación de normas de edificaciones; 8) uso de residuos urbanos y de biomasa para la generación de energía, 9) incentivos a la energía renovable (p. e. tarifas garantizadas); 10) incremento en los recursos para la investigación científica en el tema, entre otros.

De forma puntual, en el libro se reconoció que hay información que no debe perderse de vista, los temas son los siguientes:

- El término “sistema energético” se usa para describir al conjunto total compuesto por elementos o subsistemas como la búsqueda y extracción de recursos de energía primaria, el desarrollo de dichos recursos, la refinación, conversión, transportación, almacenamiento, distribución y uso de la energía.
- El “patrón energético” es la forma en que se consume la energía a diferentes escalas geográficas (localidad, región, país, mundo).
- Los recursos energéticos se pueden clasificar en agotables e inagotables. Los agotables son el petróleo, gas natural, carbón o uranio y han constituido la mayor fuente de energía desde la Revolución industrial. Las fuentes inagotables provienen del Sol, viento, calor de la Tierra, biomasa, ciclo hí-

drico y la atracción gravitatoria de la Tierra con la Luna; su participación en la oferta actual aun es incipiente.

- Los agotables se pueden clasificar en convencionales y no convencionales. Los convencionales son más fáciles de encontrar y explotar, con menores costos económicos y ambientales. Los recursos no convencionales son más difíciles de encontrar y extraer, y tienen mayores costos económicos y ambientales.
- Las fuentes de energía inagotables o renovables aportan alrededor del 20% de la energía primaria que se consume en el mundo, principalmente la biomasa. Sin embargo, tienen algunas restricciones, por lo que su aprovechamiento y participación depende de su disponibilidad espacio geográfica, las tecnologías y sus costos.
- A nivel global los resultados de escenarios alternativos energéticos muestran que hacia el año 2050 puede haber una participación de entre el 40% y 100% en el uso de energías provenientes de fuentes inagotables.
- El sector eléctrico satisface fundamentalmente las necesidades de energía en usuarios urbanos, aunque aumenta su participación en las zonas rurales. Las necesidades que satisface este sector son iluminación, refrigeración, calefacción, acondicionamiento de espacios, comunicación y ocio como las más importantes. La materia prima para su generación son combustibles fósiles, donde el gas natural tiene una cada vez mayor importancia.
- A nivel global el sector industrial es el mayor consumidor de energía, seguido de los sectores transporte y residencial. La industria química, que incluye a la petroquímica, es la principal consumidora de energía. Otras industrias como la siderurgia, minerales no metálicos, la de autotransporte, pulpa y papel tienen gran demanda. El sector alimentario ha aumentado la demanda de energía por la industrialización, empaquetamiento, transporte y refrigeración de los alimentos.
- En México los principales consumidores de energía eléctrica son las empresas medianas, los hogares y la industria. Su demanda y consumo está en función de la población, la economía, los productos consumidos, producidos e importados, así como de las tecnologías empleadas.

- Las fuentes fósiles de materia prima para energía cubren el 90% de la demanda de en México. Por sectores, el transporte es el mayor consumidor, seguido por los sectores industrial, residencial, comercial y público.
- Las principales industrias consumidoras de energía en México son la básica del hierro y acero, la de fabricación de cemento y productos a base de cemento y Pemex-petroquímica.
- El sector residencial se divide en los subsectores urbano y rural. En el urbano la demanda energética está centrada en el gas LP, los combustibles líquidos y la electricidad. En el sector rural, prevalece el uso de leña como el principal combustible y se está dando un impulso al uso de energía eléctrica por la adquisición de electrodomésticos; el gas LP se mantiene sin cambios significativos. Recientemente aumentó la demanda de combustibles líquidos para vehículos automotores de transporte privado. Se reconoce la participación de otros sectores como el industrial, el de alimentos y el transporte porque son indispensables en el sector residencial.
- Existe una gran oportunidad de mitigación de impactos ambientales y sobre todo de GEI si se logra el rediseño del sistema energético actual. La descarbonización del sector puede ocurrir con la adopción de tecnologías eficientes, ligados a un uso eficiente de energía y al uso de energía proveniente de fuentes inagotables, así como al manejo sustentable de los recursos o materias primas.
- El sistema energético mexicano puede cumplir con los compromisos de reducción de emisiones de GEI establecidos en LGCC y en los NDC del Acuerdo de París con el uso de fuentes renovables de energía y eficiencia energética, y además puede ser viable económicamente bajo un marco institucional y regulatorio que contribuya a que los sistemas energéticos sean más sustentables.
- Es necesario reconocer que hay varias fuentes de impacto provenientes del sistema energético, las cuales deben valorarse con un enfoque de la cuna a la tumba para evitar hablar únicamente de la contaminación radioactiva, de cuerpos de agua, suelo y atmósfera, de la pérdida de la biodiversidad y de la destrucción de hábitats.

- La elaboración de escenarios es importante en los sistemas energéticos, ya que posibilita examinar diferentes opciones de producción, distribución y consumo de energía. La meta es proyectar contextos energéticos alternos y examinar su factibilidad e implicaciones especialmente socioeconómicas y ambientales.
- Las acciones de política pública pueden acelerar acciones como el uso masivo de las energías renovables, equipamiento avanzado en el uso de la biomasa tradicional, tecnologías de alta eficiencia, edificaciones cero energía, transporte público eficiente y sustentable, autos eléctricos e híbridos, modelos de suministro de energía descentralizados (generación distribuida), uso de redes inteligentes, etcétera.

Glosario

AGRICULTURA CAMPESINA. tipo de agricultura que depende principalmente del trabajo de la familia, semillas y otros insumos locales como abono del ganado de la comunidad.

AGRICULTURA INTENSIVA. Tipo de agricultura que utiliza semillas mejoradas, maquinaria, fertilizantes y agroquímicos y otros insumos industriales para la producción, como plásticos.

AGROECOSISTEMA. es un ecosistema manejado por el hombre que tiene como objetivo principal producir alimentos u otros productos útiles para el hombre, al igual que un ecosistema, este tiene componente abióticos y bióticos y además se ve afectado por factores socioeconómicos.

BALANCE ENERGÉTICO. Cuenta en la que se muestra el conjunto de relaciones de equilibrio que contabiliza los flujos físicos por los cuales la energía se produce, se intercambia con el exterior, se transforma, se consume, etc. todo esto calculado en una unidad común, para un periodo determinado (generalmente un año).

BARRIL. Unidad de volumen para petróleo e hidrocarburos derivados; equivale a 42 galones o 158.98 L. Un metro cúbico equivale a 6.289 barriles.

BARRIL DE PETRÓLEO CRUDO EQUIVALENTE (BOCE). Es el volumen de gas (u otros energéticos) expresado en barriles de petróleo crudo a 60°F, y que equivalen a la misma cantidad de energía obtenida en crudo. Se utiliza con frecuencia al comprar el gas natural en unidades de volumen de petróleo crudo para homologar las calidades energéticas.

BTU. Unidad térmica británica, Es la cantidad de calor que se requiere para incrementar 1°F la temperatura de 1 libra agua pura bajo condiciones normales de presión y temperatura.

CALOR ESPECÍFICO. Cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una unidad de masa de una substancia en un grado. En el Sistema Internacional de Unidades, el calor específico se expresa en julios por kilogramo y grados Kelvin.

CAMPO MAGNÉTICO. En física es el espacio sensible a una fuerza determinada como una magnitud vectorial que representa la intensidad del magnetismo. En el caso de la tierra el campo magnético también se conoce como campo gravitatorio.

CAPACIDAD INSTALADA. Es la capacidad de producción específica o planeada por el fabricante de una unidad de proceso o la máxima cantidad de un producto que puede elaborarse operando la planta a su máxima capacidad.

COMBUSTIBLES FÓSILES. Son los derivados del petróleo crudo y gas natural por ejemplo petróleo diáfano, gasolinas, diésel, combustóleo, gasóleo, gas LP o cualquiera de las combinaciones de gas.

COMBUSTIÓN. Reacción química rápida entre sustancias combustibles y un comburente, generalmente oxígeno, que usualmente es acompañada por calor y luz en forma de flama. El proceso de combustión es comúnmente iniciado por factores como calor, luz o chispas, que permiten que los materiales combustibles alcancen la temperatura de ignición específica correspondiente.

CONTAMINANTE CRITERIO: Se define como aquellos contaminantes normados a los que se les han establecido un límite máximo permisible de concentración en el aire ambiente, con la finalidad de proteger la salud humana y asegurar el bienestar de la población.

CONSUMO ENERGÉTICO. Consumo de producto tales como gasolinas, gas natural, diesel, gas licuado, electricidad, combustóleo, querosenos, etc. que tienen como fin generar calor o energía, para uso en transporte, industrial o doméstico.

CO₂: Bióxido de carbono

COQUE DEL PETRÓLEO (COKE). Masa sólida porosa de color gris hasta negro. El coque consta de hidrocarburos macromoleculares con alto grado de aromaticidad. Se obtiene por coquización de alquitranes y residuos de desintegración (*cracking*) y de pirolisis. Se usa como combustible sólido para calderas y se maneja a granel en góndolas y camiones de redilas.

DIÉSEL: Combustible líquido que se obtiene de la destilación atmosférica del petróleo crudo entre los 200 y 380 °C y posteriormente recibe un tratamiento en las plantas hidrodesulfuradoras. Es más pesado que el queroseno y se produce en todas las refinerías administradas por Pemex Refinación. Este producto se emplea como combustible en las ramas automotriz e industrial. Debido a sus diversos usos y con objeto de cumplir con las restricciones de emisión de contaminantes ambientales, cada vez más estrictas en el ámbito internacional, Petróleos Mexicanos ofrece al mercado sus productos Pemex Diésel para uso automotriz; Diésel Industrial para uso en la industria y el Diésel Marino Especial para embarcaciones.

ENERGÍA FINAL. Es aquella energía, primaria o secundaria, que es utilizada directamente por el consumidor final. Es la energía tal cual entra al sector consumo y se diferencia de la energía neta (sin pérdidas de transformación, transmisión, transporte, distribución y almacenamiento) por el consumo propio del sector energía. Incluye al consumo energético y no energético.

ENERGÍA PRIMARIA. Se entiende por energía primaria a las formas de energía que se obtienen de la naturaleza donde el Sol es la fuente inicial de las diferentes formas de energía como la solar, hidráulica, eólica, leñosa, etcétera.

ENERGÍA RENOVABLE. Es el tipo de energía que proviene de fuentes naturales, mismas que si se manejan adecuadamente, pueden ser inagotables virtualmente porque su producción se reproduce naturalmente en el planeta.

ENERGÍA ÚTIL. Es la energía realmente utilizada en los procesos energéticos finales, debido a que no toda la energía que entra a un sistema consumidor es aprovechada y depende en cada caso de la eficiencia de los equipos consumidores. Es aquella energía neta a la cual se le han descontado las pérdidas por utilización del equipo o artefacto donde se consumen al nivel del usuario. Se aplica tanto al consumo propio como al consumo final, energético.

FORZAMIENTO RADIATIVO: Es la diferencia entre la insolación (luz solar) absorbida por la Tierra y la energía irradiada de vuelta al espacio. En otras palabras, son los cambios en el balance radiativo superficie de la Tierra-troposfera impuestos por factores externos, sin cambios en la dinámica de la estratosfera, sin tener en cuenta el efecto de retorno proveniente de la superficie o de la troposfera

GAS LICUADO DEL PETRÓLEO (GLP) (*Liquefied petroleum gas*, LPG). Gas que resulta de la mezcla de propano y butano. Se obtiene durante el fraccionamiento de los líquidos del gas o durante el fraccionamiento de los líquidos de refinación. Fracción más ligera del petróleo crudo utilizado para uso doméstico y para carburación. En Pemex se produce en todas y cada una de las refinerías administradas por PR y en los centros procesadores de gas de Cactus, Nuevo Pemex, Morelos, Cangrejera, Poza Rica, Reynosa y Matapionche. En el proceso de refinación del crudo se obtiene el gas licuado de refinación: (*Liquefied refinery gas*, LRG) que está compuesto por butano y/o propano y puede diferir del gas LPG en que el propileno y el butileno pueden estar presentes.

GAS NATURAL. Es una mezcla de hidrocarburos parafínicos ligeros, con el metano como su principal constituyente con pequeñas cantidades de etano y propano; con proporciones variables de gases no orgánicos, nitrógeno, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico.

El gas natural puede encontrarse asociado con el petróleo crudo o encontrarse independientemente en pozos de gas no asociado o gas seco. Para su utilización debe cubrir ciertas especificaciones de calidad como: contenido de licuables 0.1 l/m³ máximo; humedad máxima de 6.9 lb/MMpc; poder calorífico mínimo de 1184 Btu/pc; azufre total 200 ppm máximo; contenido máximo de CO₂ + N₂ de 3% en volumen. Es utilizado para uso doméstico, en industrias y generación de electricidad.

GASOLINA AUTOMOTRIZ. Nombre que se aplica de una manera amplia a los productos más ligeros obtenidos por la destilación del petróleo crudo, los que son sometidos a diferentes procesos para darles las características físicas y químicas requeridas el producto para la operación apropiada en los motores de combustión interna de automóviles. Las especificaciones para la gasolina automotriz bajo las cuales se vende una gran parte de este producto varían considerablemente; tiene un punto inicial de ebullición entre 35 y 49°C., punto final o temperatura final de ebullición entre 221 y 225°C. Este combustible se produce en todas las refinerías y se cuenta con tres tipos de gasolinas automotrices: Pemex Magna, Pemex Magna Reformulada (oxigenada) y Pemex Premium, las cuales se manejan por autotankers y ductos.

HIDROCARBUROS. Reciben este nombre genérico los compuestos químicos conformados por carbono e hidrógeno, como el etano, metano, propano, butano. Pueden presentarse en mas de una forma de la materia.

IEA. Agencia Internacional de Energía (por sus siglas en inglés).

INECC. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

INSUMO. Cualquier material que se utilice en la producción a algún cultivo, incluye semillas, fertilizantes, insecticidas, herbicidas, plásticos, agua, etcétera.

LABRANZA CERO. Consiste en no mover el suelo durante todo el ciclo del cultivo, solo se siembra y se cosecha, sin realizar barbechos, rastreos, y otras actividades que muevan el suelo.

LABRANZA CONVENCIONAL. Consiste en realizar todas las actividades de preparación de suelo de una parcela antes de la siembra, como barbechar, rastrear, surcar, y las labores de cultivos como la escarda.

LABRANZA DE CONSERVACIÓN. Consiste en mover lo menos posible el suelo y dejar al menos el 40% de los residuos de las plantas del cultivo anterior en la parcela.

METANO (CH₄). Es un hidrocarburo parafínico gaseoso, inflamable. Es el principal constituyente del gas natural y es usado como combustible y materia prima para la producción de amoníaco y metanol.

PEMEX. Petróleos Mexicanos.

PETRÓLEO. El petróleo es una mezcla que se presenta en la naturaleza compuesta predominantemente de hidrocarburos en fase sólida, líquida o gaseosa; denominando al estado sólido betún natural, al líquido petróleo crudo y al gaseoso gas natural, esto a condiciones atmosféricas. Existen dos teorías sobre el origen del petróleo: la inorgánica, que explica la formación del petróleo como resultado de reacciones geoquímicas entre el agua y el dióxido de carbono y varias sustancias inorgánicas, tales como carburos y carbonatos de los metales; y, la orgánica que asume que el petróleo es producto de una descomposición de los organismos vegetales y animales que existieron dentro de ciertos periodos de tiempo geológico.

PODER CALORÍFICO. Cantidad de calor producida por la combustión completa de una sustancia combustible. Esta puede ser medida seca o saturada con vapor de agua; "neta" o "bruta". El término bruta significa que el vapor de agua producido durante la combustión ha sido condensada a líquido, liberando así su calor latente. Por otro lado, "neta" significa que el agua se mantiene como vapor. La convención utilizada es "seco" y "bruta".

RECURSOS ENERGÉTICOS FINITOS O AGOTABLES. Refiere a los recursos cuya cantidad no se renueva porque su origen es distinto a los ciclos cerrados que ocurren de manera natural. Por ejemplo, los recursos petroleros.

RESERVAS. Es la porción factible de recuperar del volumen total de hidrocarburos existentes en las rocas del subsuelo.

REVOLUCIÓN VERDE. Etapa en el desarrollo de la agricultura que ocurrió desde mediados del siglo pasado y consistió en utilizar semillas mejoradas, fertilizantes y agroquímicos para aumentar el rendimiento de los cultivos.

ROCA SEDIMENTARIA. Roca cuyo origen es a partir de sedimentos que al recibir una fuerza de presión y en presencia de un agente cementante le dan origen, principalmente se forman en ambientes acuáticos.

SENER. Secretaría de Energía

SEMARNAT. Secretaría de Medioambiente y Recursos Naturales.

SISTEMA ALIMENTARIO. Conjunto de procesos y actividades que se realizan desde la producción de alimentos en campo o granjas, captura de peces y recolección hasta que estos son consumidos, incluye las actividades de transporte, procesamiento, almacenamiento y distribución.

YACIMIENTO. Unidad o lugar en el que se encuentran de forma natural petróleo, gas, minerales, agua, o cualquier otro recurso de interés humano.

Catalogación en la publicación UNAM. Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales de Información

Nombres: Martínez Bravo, René D., editor. | Martínez Negrete, Marco A., autor. | García Bustamante, Carlos A., autor. | Ruiz-García, Víctor M., autor. | Fuentes G., Alfredo F., autor. | Tauro, Raúl, autor. | Musule, Ricardo, autor. | Orozco-Ramírez, Quetzalcóatl, autor. | Astier, Marta, autor. | Masera Cerutti, Omar, autor. | Beltrán Morales, Alberto, autor. | Islas Samperio, Jorge, autor. | Grande Acosta, Genice K., autor. | García Guzmán, Paloma, autor.

Título: Energía, ambiente y sociedad : libro de apoyo a la docencia / René D. Martínez Bravo, coordinador ; Marco A. Martínez Negrete, Carlos A. García Bustamante, Víctor M. Ruiz-García, Alfredo F. Fuentes G., Raúl Tauro, Ricardo Musule, Quetzalcóatl Orozco-Ramírez, Marta Astier, Omar Masera, Alberto Beltrán Morales, Jorge M. Islas Samperio, Genice K. Grande Acosta y Paloma García Guzmán (autores).

Descripción: Primera edición. | Morelia, Michoacán : Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, 2022.

Identificadores: LIBRUNAM 2130336 (libro electrónico) | ISBN (libro electrónico).

Temas: Recursos energéticos -- Estudio y enseñanza. | Recursos energéticos -- Aspectos sociales. | Desarrollo sustentable -- Estudio y enseñanza.

Clasificación: LCC HD9502.M62 (libro electrónico) | DDC 333.790972—dc23

Energía, ambiente y sociedad, de René David Martínez Bravo y Carlos A. García Bustamante (coordinadores), y Marco A. Martínez Negrete, Víctor M. Ruiz-García, Alfredo F. Fuentes G., Raúl Tauro, Ricardo Musule, Quetzalcóatl Orozco-Ramírez, Marta Astier, Omar Masera, Alberto Beltrán Morales, Jorge M. Islas Samperio, Genice K. Grande Acosta y Paloma García Guzmán (autores).

La edición electrónica de un ejemplar (31.698 KB) fue preparada por el Área Editorial de la ENES, Unidad Morelia.

Se utilizó en su composición la familia de fuentes Alegreya Sans

La coordinación editorial estuvo a cargo de Cecilia López Ridaura y Juan Benito Artigas Albarelli

Su diseño y formación fue realizado por Nuria Saburit Solbes
Ilustración de portada Emilian Yosire Martínez Nava

Primera edición electrónica en formato PDF: 30 de agosto de 2022
D. R. © 2022. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, C. P. 04510, Ciudad de México.
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES Unidad Morelia
Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta,
C. P. 58190, Morelia, Michoacán.

ISBN: 978-607-30-6305-0

Investigación realizada gracias al Programa UNAM-PAPIME <PE106115>

La presente publicación contó con dictámenes de expertos externos de acuerdo con las normas editoriales de la ENES Morelia, UNAM

Esta edición y sus características son propiedad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Prohibida su reproducción parcial o total por cualquier medio sin autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Hecho en México