



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA**

**HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO PARA ALMACENAR Y UTILIZAR
ENERGÍA GENERADA A PARTIR DE FUENTES LIMPIAS EN UN MODELO
DESCENTRALIZADO EN SECTORES DE CONSUMO BÁSICO**

TESINA

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA

Pedro Iván Leal Jáuregui



CD. M X

2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: Isaías Alejandro Anaya Durand
VOCAL: Profesor: Julio César Aguilar Cordero
SECRETARIO: Profesor: Héctor García Ortega
1er. SUPLENTE: Profesor: Alfonso Durán Moreno
2° SUPLENTE: Profesor: Alejandra Mendoza Campos

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: LAB. 225 DEL DEPARTAMENTO DE QUÍMICA ORGÁNICA, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Héctor García Ortega

SUSTENTANTE:

Pedro Iván Leal Jáuregui

Agradecimientos

Agradecemos a la Facultad de Química por el apoyo brindado a través del Programa de Apoyo a la Investigación y al Posgrado, PAIP 5000-9112.

Índice

Introducción.	1
Capítulo I. Panorama energético e impacto ambiental a nivel global y nacional: objetivos nacionales y prospectivos del sector.	3
Capítulo II. Hidrógeno como portador energético.	20
Capítulo III. Desarrollo y propuesta de modelo funcional.	36
Capítulo IV. Resultados y análisis técnico y económico del modelo propuesto	48
Capítulo V. Conclusión y próximos pasos.	57
Anexo	60
Fuentes bibliográficas y referencias	61

Índice de tablas

<i>Tabla 1.1. Tecnologías con fuentes convencionales</i>	4
<i>Tabla 1.2. Tecnologías con fuentes renovables</i>	4
<i>Tabla 2.1. Propiedades fisicoquímicas del hidrógeno molecular a condiciones estándar</i>	21
<i>Tabla 3.1. Listado de equipos y líneas de flujo</i>	37
<i>Tabla 3.2. Agrupación de Estados en función de distribución de irradiación anual</i> ...	40
<i>Tabla 3.3. Condiciones de operación del sistema</i>	47
<i>Tabla 4.1. Resultados técnicos del modelo propuesto</i>	50
<i>Tabla 4.2. Capacidad instalada de sistema fotovoltaica y PEM</i>	50
<i>Tabla 4.3. Supuestos económicos</i>	54
<i>Tabla 4.4. Valor presente del modelo propuesto</i>	56

Índice de esquemas

<i>Esquema 1.1. Flujo de energía de los países</i>	5
<i>Esquema 1.2. Cadena de valor del sector de hidrocarburos</i>	17
<i>Esquema 2.1. Arreglo de una celda de combustible a base de hidrógeno</i>	23
<i>Esquema 2.2. Desarrollo de métodos de producción limpios</i>	28
<i>Esquema 2.3. Integración de energías limpias para una economía del hidrógeno</i> ...	35
<i>Esquema 3.1. Diagrama de flujo del proceso (DFP)</i>	37
<i>Esquema 3.2. Mapa de irradiación solar en el mundo</i>	38
<i>Esquema 3.3. Diagrama de configuración electrónica de una celda fotovoltaica</i>	42
<i>Esquema 3.4. Regiones del Sistema Eléctrico Nacional</i>	43
<i>Esquema 4.1 Metodología para desarrollar la propuesta de modelo funcional</i>	49

Índice de figuras

<i>Figura 1.1. Producción mundial de energía primaria</i>	6
<i>Figura 1.2. Balanza comercial de Noruega, México y Japón</i>	7
<i>Figura 1.3. Composición de producción mundial de energía primaria, 2015</i>	8
<i>Figura 1.4. Consumo energético por fuente</i>	8
<i>Figura 1.5. Composición de fuentes de emisión de gases de efecto invernadero, 2014</i>	10
<i>Figura 1.6. Composición de gases de efecto invernadero emitidos, 2014</i>	11
<i>Figura 1.7. Emisión de CO₂ de los 20 países con mayor proporción del total en 2014</i>	12
<i>Figura 1.8. Cambio de temperatura promedio anual y presencia de CO₂ en la atmósfera</i>	13
<i>Figura 1.9. Participación de usuarios de CFE por sector en 2016 (nota: no contempla autoabastecimiento)</i>	15
<i>Figura 1.10. Adiciones prospectivas de capacidad instalada</i>	16
<i>Figura 1.11. Capacidad adicionada por tecnología en el periodo 2006-16 vs prospectivo 2017-31</i>	17
<i>Figura 1.12. Escenarios de producción de crudo histórico 2006-16 y prospectivo 2017-31</i>	19
<i>Figura 1.13. Demanda de petrolíferos vs demanda en el periodo prospectivo 2017-31</i>	19
<i>Figura 2.1. Poder calorífico (superior) de combustibles a condiciones estándar</i>	23
<i>Figura 2.2. Producción global de hidrógeno por fuente, 2016</i>	24
<i>Figura 2.3. Comparativo de poder calorífico superior por unidad de volumen a diferentes presiones de diferentes combustibles</i>	30
<i>Figura 2.4. Demanda global de hidrógeno por industria, 2016</i>	33
<i>Figura 2.5. Tendencia global de descarbonización en fuentes de energía</i>	34
<i>Figura 3.1. Promedio de irradiación solar anual en México (valores en anexo)</i>	39
<i>Figura 3.2. Escenarios de irradiación solar en México</i>	40
<i>Figura 3.3. Distribución de la irradiación solar diaria</i>	41
<i>Figura 3.4. Demanda total del sector residencial de México en 2017</i>	44

<i>Figura 3.5. Demanda porcentual en función de los escenarios de irradiación.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3.6. Curva de demanda porcentual horaria promedio del sector residencial en México y distribución porcentual de generación fotovoltaica.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4.1. Generación, consumo y almacenamiento promedio anual en escenario de irradiación alto y alto consumo</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4.2. Generación, consumo y almacenamiento diario en el mes de mayo en escenario de irradiación alto y alto consumo.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4.3. Generación, consumo y almacenamiento diario en el mes de mayo en escenario de irradiación alto y alto consumo.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4.4. Flujo acumulado de efectivo de escenario de irradiación alto</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4.5. Flujo acumulado de efectivo de escenario de irradiación medio</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4.6. Flujo acumulado de efectivo de escenario de irradiación bajo</i>	<i>55</i>

Hidrógeno como vector energético para almacenar y utilizar energía generada a partir de fuentes limpias en un modelo descentralizado en sectores de consumo básico.

Objetivo.

Proponer y analizar la factibilidad técnica y económica de un modelo descentralizado que utilice H₂ como portador energético, asistido con energías limpias en sectores de consumo básico.

Introducción.

La transformación de energía es el proceso fundamental de todos los sistemas biológicos e inertes. La fotosíntesis llevada a cabo en los cloroplastos transforma energía electromagnética proveniente del sol en energía química que es necesaria para lograr los procesos biológicos de las plantas. Las corrientes de viento son transformadas en energía eléctrica a través de turbinas. La quema de combustible en un motor de combustión interna transforma energía química en energía mecánica para mover un auto.

La humanidad siempre ha tenido una estrecha dependencia con la transformación energética, no sólo por los procesos biológicos necesarios para mantener al organismo, sino por la necesidad de mantener una civilización cada vez más compleja y demandante de energía. Desde la utilización prehistórica del fuego hasta la propulsión iónica espacial o la fusión nuclear, fronteras tecnológicas del siglo XXI. Cada tecnología dispuesta por la humanidad tiene ventajas y desventajas, económicas, sociales, ambientales y técnicas. Es una realidad que desde la revolución industrial hasta el presente las sociedades han incrementado su sofisticación y complejidad, pero con este avance han surgido efectos contraproducentes con un alto impacto ambiental y social. La capacidad del hombre por satisfacer la demanda energética con eficiencia técnica, económica y ecológica es uno de los mayores desafíos de este siglo.

Las tecnologías y sus avances se enfocan en cada uno de estos conceptos, ya sea para extraer fuentes primarias, transformar las fuentes primarias o almacenar la energía para utilizarse cuando es requerida. De acuerdo con los desafíos que se presentan en el contexto energético es fundamental que estas tecnologías puedan ser sustentables y eficientes para prevenir y mitigar los efectos adversos que hoy en día presentan.

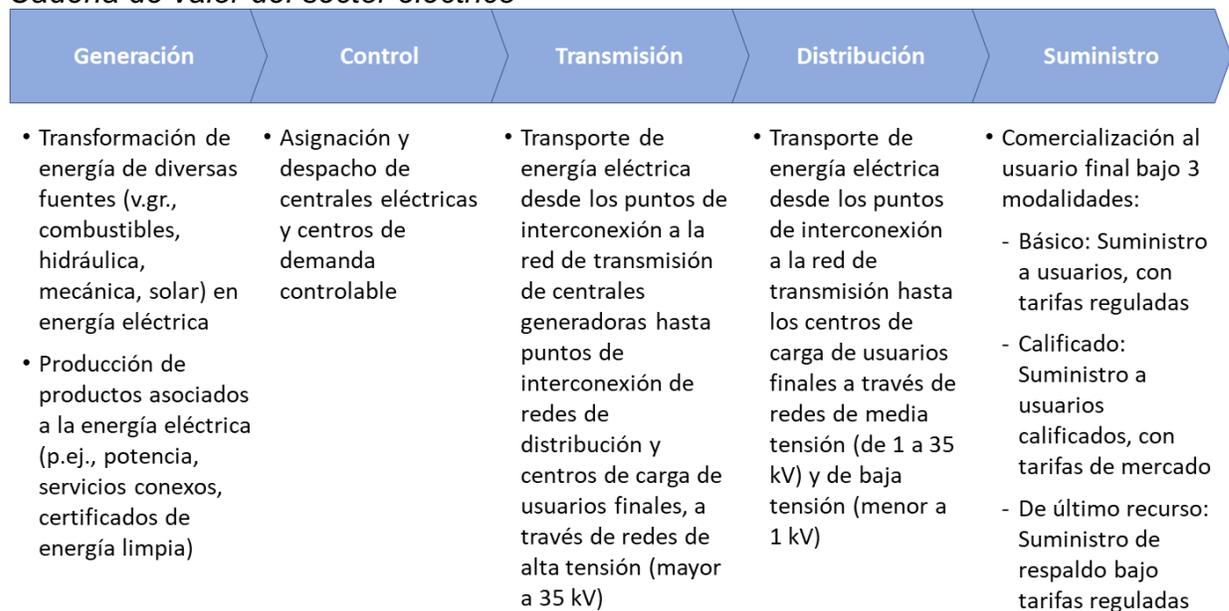
A partir de la segunda mitad del siglo XX se hizo evidente la repercusión que tienen los métodos de explotación energética en el mundo. Gracias a una creciente preocupación, tanto del sector público como el privado, se han impulsado medidas para atender el impacto ambiental causado por el hombre, siempre con la presencia de controversia, intereses personales o corporativos e inclusive apatía. En materia internacional y gubernamental se han implementado planes como el protocolo de Montreal (entrada en vigor, 1989), el protocolo de Kioto (entrada en vigor, 2005) y el acuerdo de París (firmado en 2016) para proteger la capa de ozono, disminuir la emisión de gases de efecto invernadero y medidas para frenar el cambio climático, respectivamente. La industria está en constante búsqueda de innovación para generar modelos que permitan viabilidad económica que resulte en un desarrollo sustentable y responsable. Todos estos esfuerzos promueven una postura global que integra a las sociedades para trabajar en una misma dirección. Por lo tanto, este trabajo busca proponer un modelo que integre tecnologías sustentables como alternativa viable en la generación y almacenamiento de electricidad a partir de H₂ dirigida a consumidores en sectores de uso básico.

Capítulo I. Panorama energético e impacto ambiental a nivel global y nacional: objetivos nacionales y prospectivos del sector.

Tecnologías de generación; convencionales vs renovables.

La electricidad se ha convertido en una de las formas más utilizadas por el humano para abastecer su demanda energética. Ésta es una fuente secundaria, por lo tanto, debe ser obtenida a través de un proceso que involucre fuentes primarias; generación eléctrica. La cadena de valor del sector eléctrico consiste en diferentes etapas necesarias para satisfacer la demanda eléctrica de un país. La cadena de valor comienza con la generación de electricidad a partir de fuentes primarias convencionales o limpias. Posteriormente está el control, distribución y transmisión de la electricidad para ser suministrada a los usuarios finales.

Cadena de valor del sector eléctricoⁱ



Las fuentes convencionales de generación consisten en aquellas que emitan gases de efecto invernadero como resultado del uso de combustibles fósiles. Existen diferentes tecnologías que utilizan diferentes tipos de combustible para generación eléctrica.

Por otro lado, existen fuentes que no emiten gases de efecto invernadero, conocidas como fuentes limpias.

Dentro de las fuentes limpias se distinguen las fuentes renovables como eólica, hidroeléctrica, solar, geotérmica y mareomotriz; son fuentes primarias de tipo flujo. Además, existen las fuentes limpias no renovables como son la nuclear y la cogeneración; ésta última genera emisiones por el uso de combustibles, pero en una menor proporción debido a la eficiencia de la tecnología.

Tabla 1.1. Tecnologías con fuentes convencionalesⁱ

Ciclo combinado	Central que conjunta una turbina de gas y una termoeléctrica convencional; los gases de escape de la turbina de gas son empleados para generar vapor.
Carbón	Este tipo de planta opera con principios análogos a los de una termoeléctrica convencional; para la producción de vapor se emplea carbón como combustible.
Termoeléctrica convencional	El vapor generado (a partir de combustóleo o gas) se expande en una turbina y su energía se transforma en movimiento mecánico para impulsar el generador.
Combustión interna	Los motores que ha instalado la CFE para la producción de energía eléctrica son principalmente de ignición por compresión o tipo diésel.

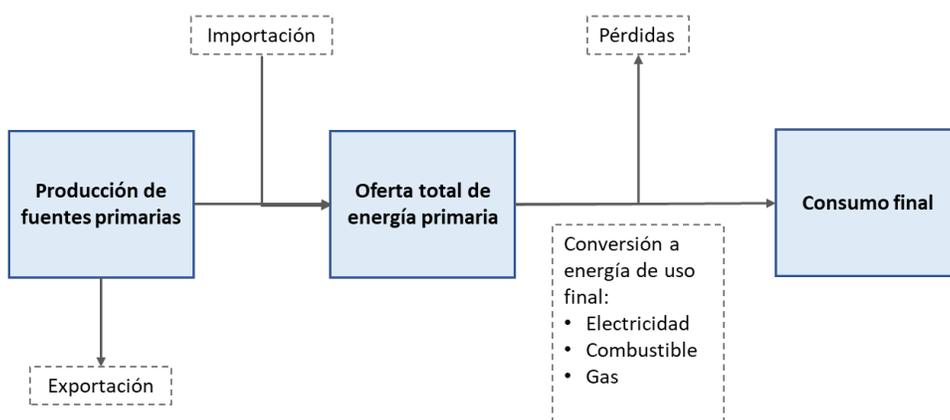
Tabla 1.2. Tecnologías con fuentes renovablesⁱ

Eólica	Una turbina eólica es un dispositivo que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica al impulsar un generador acoplado al eje de la turbina.
Hidroeléctrica	La energía potencial del agua se convierte en electricidad. Para lograrlo, el fluido es conducido hasta las turbinas donde se genera la energía eléctrica.
Solar	Dispositivos de estado sólido compuestos por una capa muy delgada de material semiconductor que transforma la energía de los fotones en una corriente directa.
Geotérmica	Este tipo de planta opera con principios análogos a los de una termoeléctrica convencional, excepto en la producción de vapor, el cual se extrae del subsuelo.
Nuclear	Dispositivos donde se lleva a cabo una reacción nuclear. Los reactores nucleares transmiten el calor para generar vapor, que se utiliza para impulsar una turbina.
Cogeneración	Producción secuencial de dos o más formas de energía útil a partir de la misma fuente de combustible: se genera electricidad y vapor para procesos productivos.

Panorama energético.

La energía se clasifica de acuerdo con las características de los sistemas de donde provienen y se utilizan. Existen fuentes primarias, secundarias y portadores de energía. Las fuentes primarias son todas aquellas formas de energía que no han sido transformadas (por el hombre), pueden ser combustibles como el petróleo crudo y gas natural o flujos como son energía solar y eólica. Las fuentes secundarias surgen a través de la transformación de las fuentes primarias como son los productos de la refinación de crudo y la electricidad. Los portadores de energía son sistemas que guardan la energía para poder usarse cuando se requiera, como baterías, aire comprimido y presas.

La capacidad de los países por satisfacer su demanda energética es un aspecto fundamental del desarrollo de éstos. Existen diferentes factores que contribuyen en los mecanismos de cada país para lograr proveer a sus habitantes de la energía requerida; la ubicación, el nivel de industrialización, los recursos naturales y la situación geopolítica son algunos de estos factores. Cuando un país no tiene los medios para cumplir con tal demanda debe recurrir a la importación, lo que en muchos casos representa una desventaja económica. Por el contrario, los países con superávit energético tienen la posibilidad de convertirse en exportadores de energía.



Esquema 1.1. Flujo de energía de los paísesⁱⁱ

La civilización humana ha tenido un desarrollo acelerado en los últimos 2 siglos; la demografía se concentra en las grandes urbes y la vida rural se contrae, el fenómeno de globalización demanda interconectividad entre los países y la industrialización permite estilos de vida cada vez más complejas; todo esto representa un constante incremento energético a nivel global. La producción de energía primaria total en el mundo en 1990 fue de 8,795 Mtoe y en 2016 ascendió a 13,910 Mtoe, un aumento del 58.2% en el periodo. Los países que se encuentran en un proceso intenso de industrialización requieren de energía a ritmos acelerados, como lo son China e India. Países que han pasado esta etapa de industrialización acelerada presentan necesidades de energía más estables, Alemania, Francia y Estados Unidos ilustran este fenómeno. Los países con mayor producción (2016) de energía primaria son China, Estados Unidos y Rusia, su producción representa el 42.0% de la producción global (18.3%, 14.0% y 9.7%, respectivamente). México contribuye con el 1.4% de la producción global.

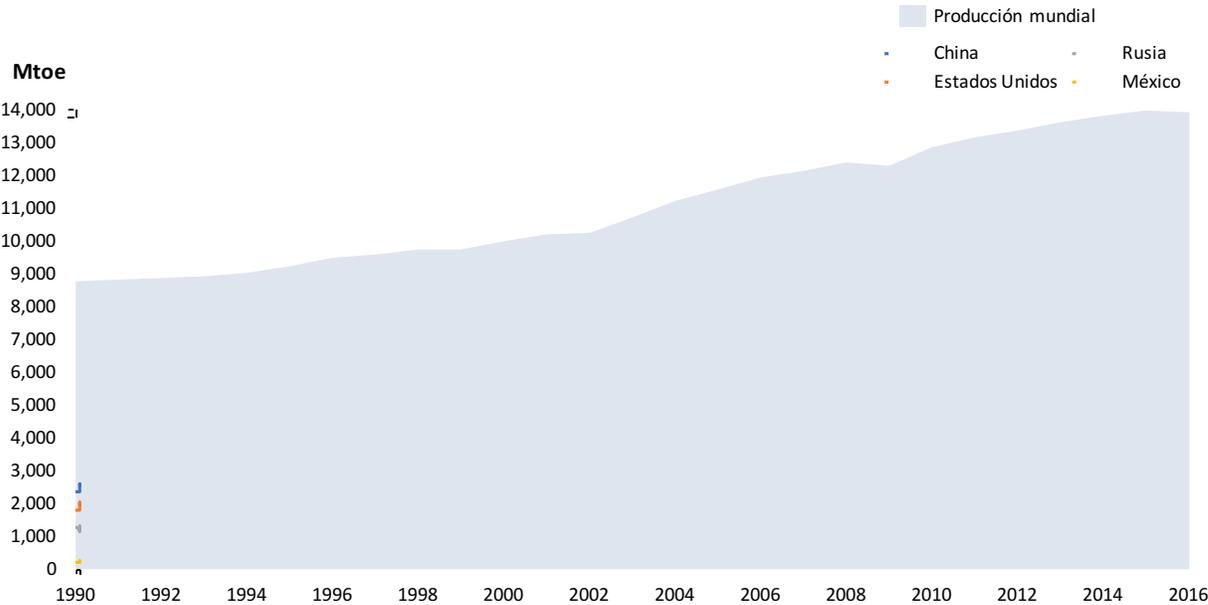


Figura 1.1. Producción mundial de energía primariaⁱⁱⁱ

Como se mencionó, la balanza comercial en materia energética es un factor importante en la economía de un país. Japón, por ejemplo, depende casi exclusivamente de la importación de energía para atender su alta demanda debido a su ubicación (entre otros factores); este país produce el 0.3% de la energía primaria global, sin embargo, consume el 3.1%. La economía de Japón no tiene una dependencia tan estrecha con la producción energética, a diferencia de Noruega que es uno de los países que muestra una balanza comercial sólida por exportación de energías. México, históricamente, ha sido un país exportador de energía, sin embargo, la balanza comercial del país se ha visto afectada severamente en los últimos años. La situación energética mexicana es compleja, ya que distintas causas han provocado que la producción del país haya declinado hasta convertirse en un país importador neto de energía. Esto presenta un reto debido a la dependencia de la economía mexicana en el sector energético, a diferencia de Japón.

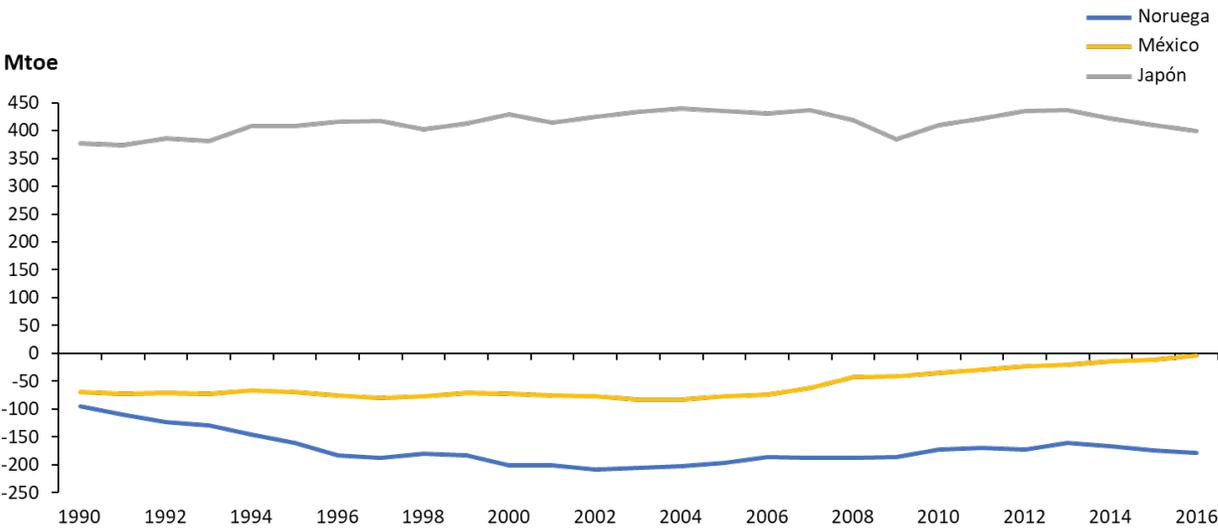


Figura 1.2. Balanza comercial de Noruega, México y Japónⁱⁱⁱ
**nota: un valor negativo indica mayor exportación que importación*

Producción y consumo por sector.

La producción de energía en el mundo proviene de diferentes fuentes, sin embargo, alrededor del 95% se obtiene de combustibles siendo 80% fósiles^{iv}. La producción de energía por fuentes convencionales mantiene un crecimiento constante pero lento, en contraste, las energías renovables muestran un crecimiento acelerado, de hasta 20% anual.

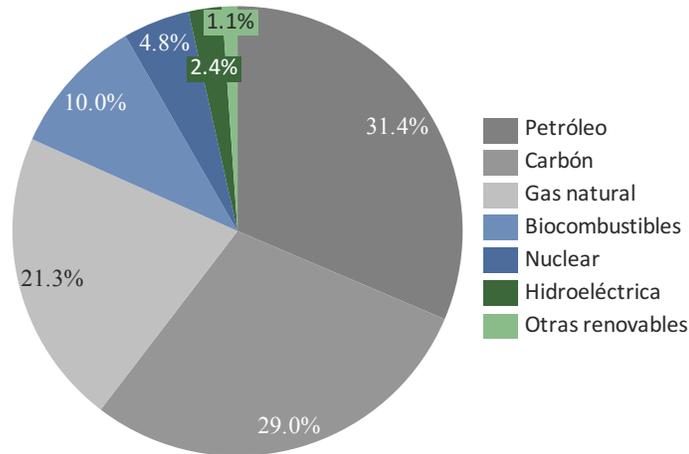


Figura 1.3. Composición de producción mundial de energía primaria (2015)^v

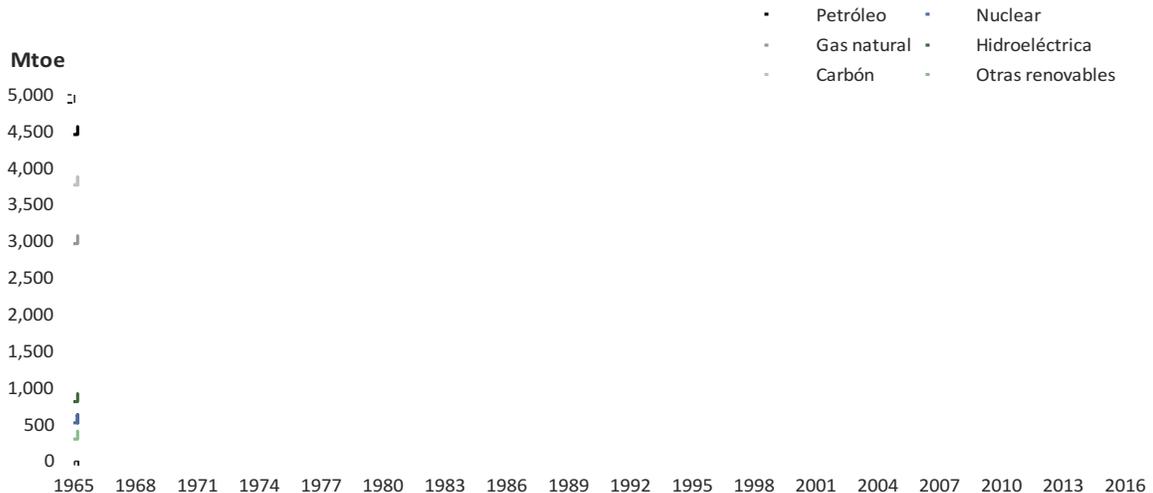


Figura 1.4. Consumo energético por fuenteⁱⁱⁱ

La tendencia ascendente en la producción/consumo de energías renovables se debe, en gran medida, a la rápida disminución en el costo nivelado de generación^{vi} de estas tecnologías. Las celdas fotovoltaicas son uno de los ejemplos más destacados ya que su costo nivelado promedio ha disminuido 73% en el periodo 2010-17 (con un costo global ponderado de ~0.10 USD/kWh en 2017)^{vii}. La reducción de costos se debe, principalmente, al desarrollo de tecnologías con mayores eficiencias energéticas, un panorama competitivo que impulsa mejoras en el sector y una amplia gama de desarrolladores internacionales de estas tecnologías. La creciente presencia de fuentes renovables y limpias en la última década sugieren un cambio en el paradigma energético global.

Los avances tecnológicos, reducción de costos, concientización global sobre el impacto ambiental y un panorama incierto sobre los precios de crudo e hidrocarburos pueden catalizar esta transición; al final el pragmatismo de los mercados dictará el ritmo de este proceso, por lo tanto, la competitividad de las fuentes renovables en comparación con las fósiles es el factor final. De acuerdo con la Organización Internacional de Energías Renovables (*International Renewable Energy Agency*, IRENA), para 2020 los costos de la mayoría de las fuentes renovables se equiparán con los de las fuentes fósiles. La producción energética no es el único aspecto que considerar para la transición hacia un consumo energético sustentable, existen factores técnicos y económicos en el consumo que son igualmente relevantes. El consumo por sector productivo hace evidente este hecho. La competitividad de las fuentes renovables impacta positivamente en la generación eléctrica y todos los sectores que están estrechamente relacionados con ésta. Sin embargo, sectores como el de transporte (terrestre, marino y aéreo) están más alejados de poder lograr la transición, ya que dependen más de la quema de combustibles que de electricidad.

Impacto ambiental.

La humanidad ha experimentado la mayor expansión demográfica en los últimos dos siglos, siendo menos de 1 mil millones hace 200 años a más de 7 mil millones actualmente. Es importante destacar que la tasa de crecimiento ha dejado de aumentar desde 1962, tasa máxima de 2.1% anual. Actualmente la tasa anual se encuentra apenas por encima del 1.0% y se prevé que para el año 2100 sea de 0.1%^{viii}. Este fenómeno está relacionado, entre otros factores, a la etapa de desarrollo en la que se encuentra un país; una vez que la industrialización del país llega a estabilizarse, su crecimiento demográfico también lo hace.

Este acelerado crecimiento ha tenido un impacto en el ambiente y en los ecosistemas a nivel global. Los recursos necesarios para abastecer a una población tan extensa significan una explotación de éstos que rompe con los ciclos y el equilibrio natural del planeta. En materia energética, implica la emisión de gases de efecto invernadero más allá de la absorción natural de la que dispone la Tierra. La emisión de estos gases está relacionada directamente con el calentamiento global, sin embargo, no es el único factor; la deforestación, erosión, ganadería y agricultura son algunos otros causantes del fenómeno.

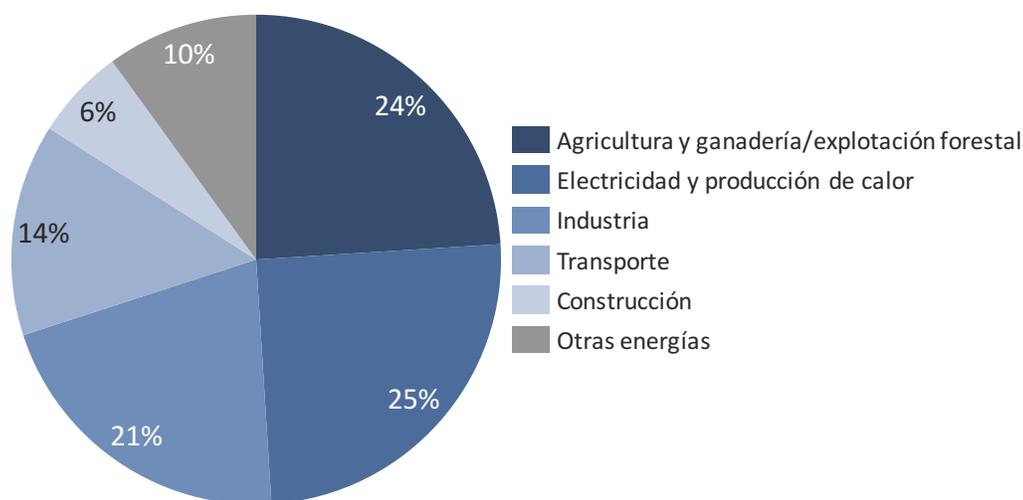


Figura 1.5. Composición de fuentes de emisión de gases de efecto invernadero, 2014^{ix}

La emisión proviene de 2 fuentes principales, naturales y antropogénicas. El desequilibrio ocurre cuando las fuentes humanas superan la capacidad de captación inherente a los ciclos naturales. Los principales gases con efectos invernadero son: CO₂, CH₄, N₂O, gases fluorados y H₂O; estos gases retienen calor dentro de las longitudes de onda que la Tierra emite.

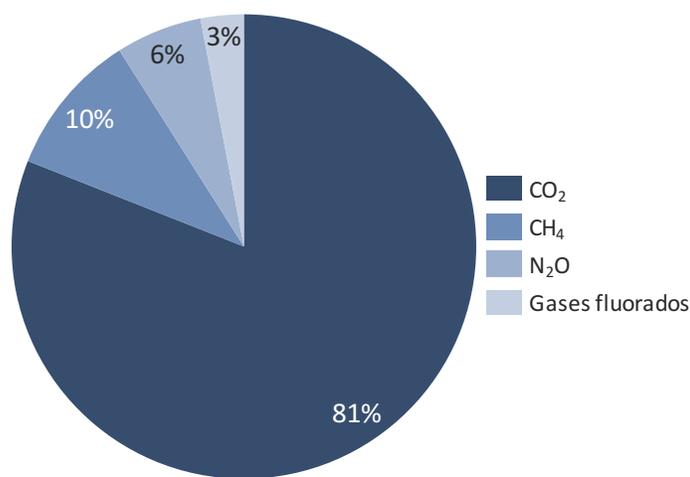


Figura 1.6. Composición de gases de efecto invernadero emitidos, 2014^{ix}

La emisión de estos gases es producto, principalmente, de la quema de combustibles fósiles, siendo el CO₂ el de mayor proporción. En el año 2014 se emitieron 9.3 millones de toneladas de CO₂ de las cuales, Estados Unidos representaron 45.6% de éstas; México ocupó la posición 13 con 131 mil toneladas, representando el 1.4% de la emisión total.

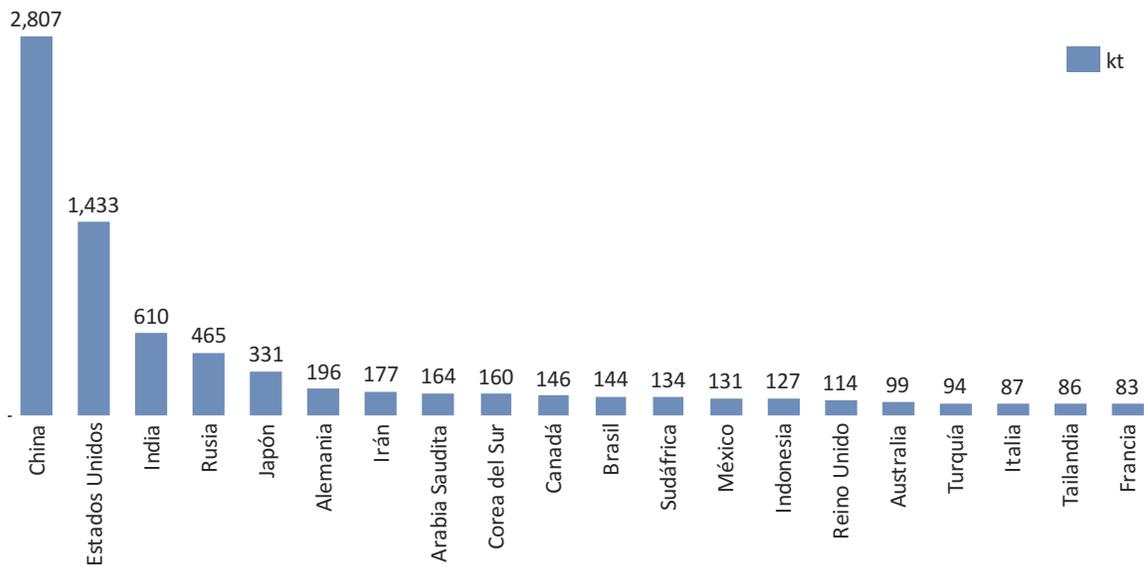


Figura 1.7. Emisión de CO₂ de los 20 países con mayor proporción del total en 2014^x

La temperatura en la superficie de la Tierra es dinámica. Se tiene registro de por lo menos 7 ciclos de glaciación y calentamiento en los últimos 650 000 años, concluyendo el último hace 7 000 años. Estos ciclos están relacionados con pequeños cambios en la orientación de la Tierra con respecto al Sol y con la presencia de gases de efecto invernadero. De acuerdo con estudios de la NASA y otras agencias hechos en los núcleos del hielo glacial y en anillos de troncos de árboles se ha identificado la relación entre la presencia de gases de efecto invernadero y un aumento en la temperatura terrestre. La preocupación sobre el calentamiento global que actualmente es evidente en el planeta proviene del hecho de que la causa sea humana. El incremento de la temperatura actual es 10 veces mayor a los ciclos observados anteriormente. Esto coincide con una concentración mayor de GEIs en la atmósfera, actualmente la concentración de CO₂ es superior a 400 ppm y el aumento en temperatura cercano a 1.5 °C. El acuerdo de París tiene como objetivo mantener la concentración de CO₂ por debajo de 450 ppm y el incremento de temperatura por debajo de 2.0 °C en la segunda mitad del siglo XXI.

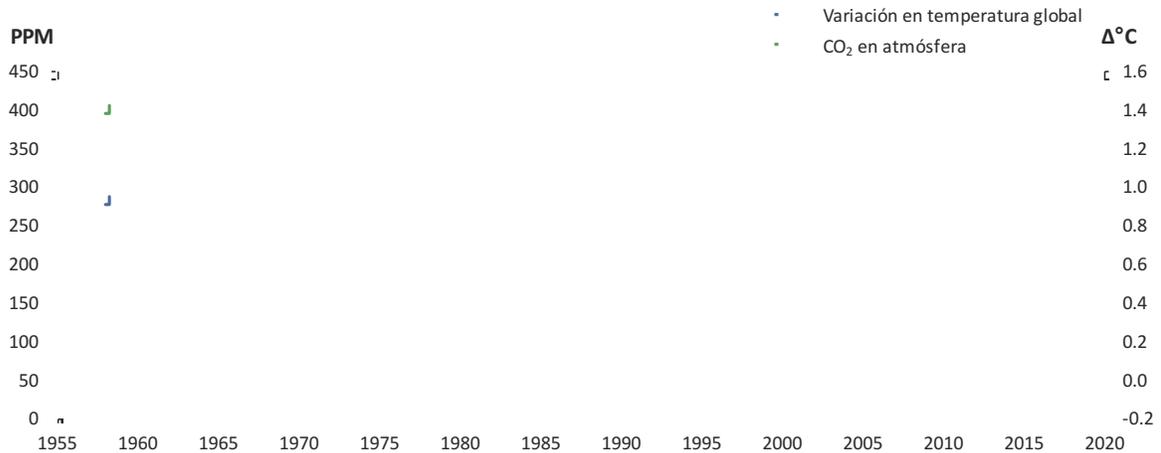


Figura 1.8. Cambio de temperatura promedio anual y presencia de CO₂ en la atmósfera^{xi}

Situación en México.

México es un país con una importante relevancia mundial en materia energética. En 2016 el país ocupó la posición 14 tanto en producción primaria como en consumo, 192 Mtoe y 182 Mtoe respectivamente. La economía mexicana está estrechamente relacionada con el sector energético, ya que un porcentaje importante del PIB proviene del sector, principalmente de la explotación de hidrocarburos. En los últimos años la disminución en producción crudo, junto con la caída en precios de éste ha impactado en la aportación al PIB. En 2015 los ingresos petroleros del sector público (IPSP) conformaron el 6.5% del PIB y en 2017 el 3.8%^{xii}. Por otra parte, el sector eléctrico representó alrededor del 2.0% del PIB y 6.1% de la actividad industrial del país. En los últimos años el crecimiento económico de México ha estado por debajo de lo pronosticado con una tasa media de crecimiento anual (TMCA) del PIB por debajo de 3.0%^{xiii}. El PIB, al tener menor aportación de IPSP, compone su crecimiento del sector privado, remesas de trabajadores, crecimiento salarial y creación de empleo formal. Es fundamental contar con un sector eléctrico robusto, competitivo y eficiente para permitir un mayor desarrollo y crecimiento económico que tenga un beneficio social. Además, la reactivación del sector petrolero permitirá una balanza comercial favorable resultando en mayores ingresos públicos que pueda traducirse en inversión pública.

Reforma Energética, panorama actual y objetivos nacionales.

En diciembre de 2013 el Congreso de la Unión aprobó la Reforma Energética, como parte de las Reformas Estructurales. “La Reforma Energética es un cambio estructural que busca detonar el potencial del sector energético y contribuir al desarrollo del país mediante el aprovechamiento sustentable y eficiente de los recursos naturales”- Secretaria de energía^{xiv}. La Reforma cambió drásticamente el sector eléctrico y de hidrocarburos, históricamente controlado por CFE y Pemex, respectivamente. La nueva estructura permite la participación de privados nacionales y extranjeros en casi todas las etapas de la cadena de valor eléctrica y de hidrocarburos. El objetivo de la Reforma Energética es terminar el monopolio de las Paraestatales y fortalecerlas, además de promover inversión privada que propicie prácticas eficientes y renovación de infraestructura.

Sector eléctrico:

La generación de electricidad es la etapa de la cadena de valor del sector eléctrico que presenta un mayor cambio y presencia de privados. La generación queda abierta a privados y CFE como empresa productiva del estado. Se comercializa energía en el mercado eléctrico mayorista (MEM), potencia y certificados de energía limpia (CEL) en subastas a largo plazo. El control de la generación queda a cargo de la CENACE, la transmisión y distribución son exclusivo de la CFE y el suministro se comercializa de acuerdo al tipo de usuario: básico, calificado y de último recurso el primero siendo exclusivo de la CFE.

En 2017 la CFE suministró energía eléctrica a más de 42 millones de clientes, de los cuales, el sector residencial representa la mayoría de este suministro, sin embargo, el sector industrial representó el 57.0% de venta en el MEM. De acuerdo con el informe de gobierno del mismo año, el 98.5% de la población cuenta con este servicio.

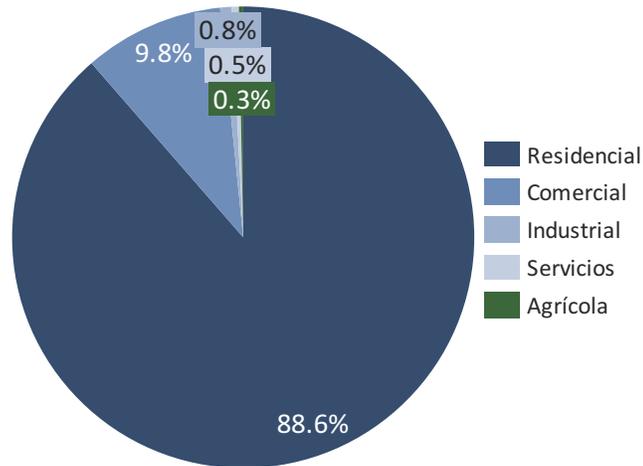


Figura 1.9. Participación de usuarios de CFE por sector en 2016 (nota: no contempla autoabastecimiento)^{xiii}

La prospectiva de la Secretaría de energía (2017-31) prevé una adición en capacidad instalada total en el periodo de 55,840 MW. La adición de capacidad se divide en el 37.4% de fuentes convencionales y 62.6% en fuentes limpias. Además, estima que el consumo bruto tendrá un crecimiento anual de 2.9%. El programa indicativo para la instalación y retiro de centrales eléctricas (PIIRCE) planea retirar 137 unidades de CFE, que representan 15,814 MW, siendo casi el 70.0% centrales termoeléctricas convencionales. La inversión de capacidad instalada estimada se compone de 28.9% por parte de CFE y proyectos independientes de energía (PIE; privados que invierten en infraestructura y venden la energía a CFE bajo contrato a largo plazo), 23.5% autoabastecimiento, 8.2% cogeneración y 32.4% por privados.

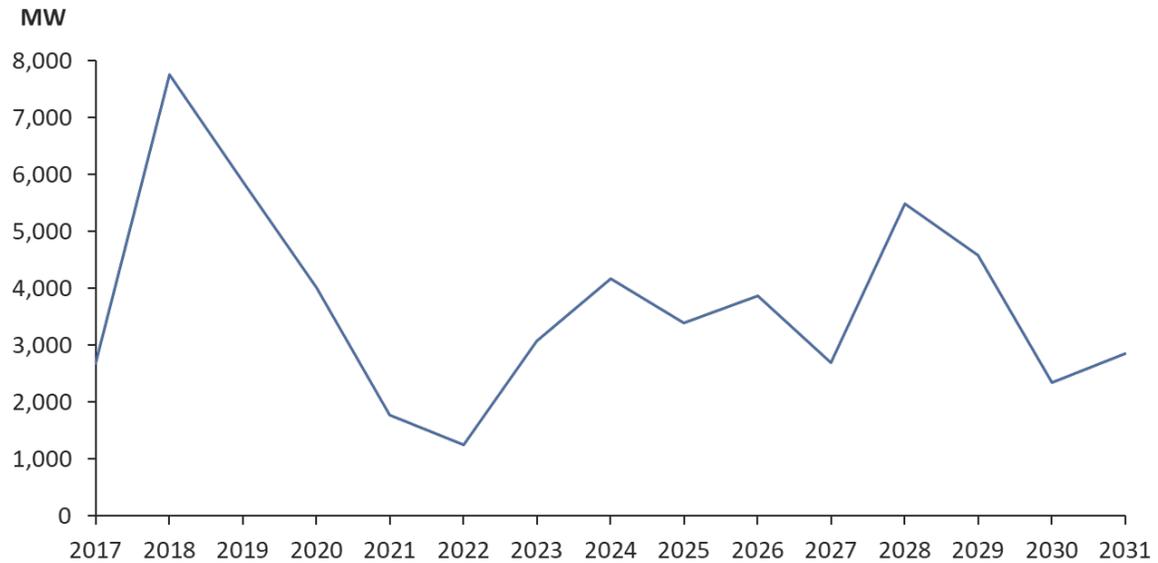


Figura 1.10. Adiciones prospectivas de capacidad instalada^{xiii}

Energías renovables.

Una de las metas de la transición energética es diversificar el sector eléctrico y aumentar la participación de generación por medio de fuentes limpias. Estas metas consisten en una participación de energías renovables del 25.0% en 2018, 30.0% en 2020, 35.0% para 2024 y 38.2% al concluir el periodo prospectivo; en 2017 la participación fue del 22.7%. México cuenta con un potencial de generación renovable probado de 56,012 GWh/año.

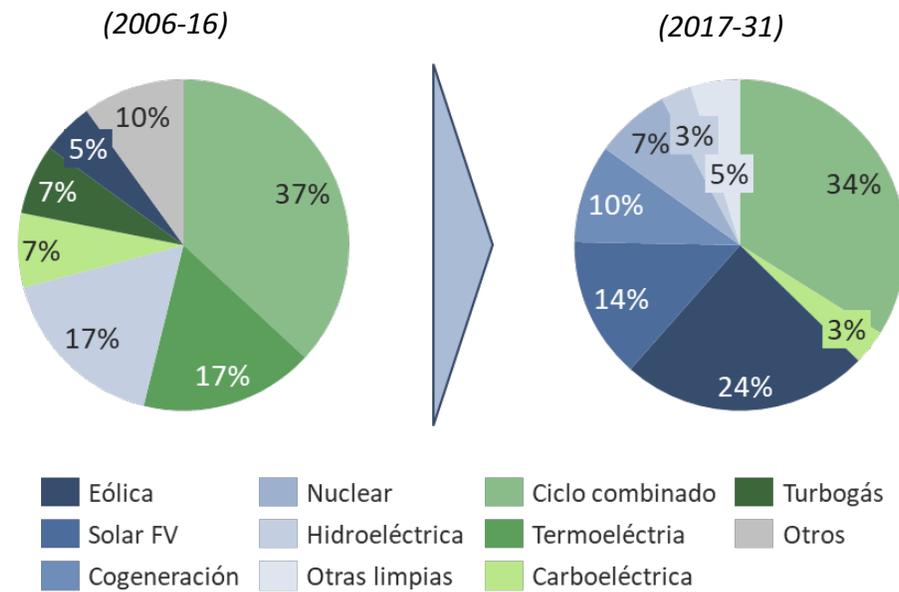
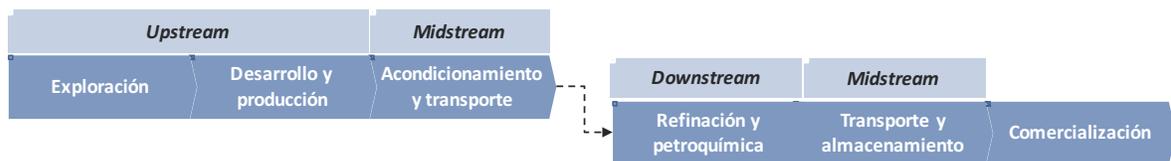


Figura 1.11. Capacidad adicionada por tecnología en el periodo 2006-16 vs prospectivo 2017-31^{xiii}

Sector de hidrocarburos.

El sector de hidrocarburos presenta importantes cambios en toda su cadena de valor (*upstream*, *midstream* y *downstream*), permitiendo la participación privada en ésta. La exploración y extracción de hidrocarburos es regulada por la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH) mediante concursos de licitación, Rondas. La Comisión Reguladora de Energía (CRE) otorga permisos para el transporte de los recursos explotados y refinados, almacenamiento, distribución y comercialización y expendio al público. Finalmente, la Secretaría de energía es el órgano que regula la refinación y procesamiento de los recursos extraídos.



Esquema 1.2. Cadena de valor del sector de hidrocarburos^{xv}

De acuerdo con la publicación de la CNH, las reservas de hidrocarburos al 1 de enero de 2018 del país son; 2P: 16,162 MMbpce y 3P: 25,467 MMbpce^{xvi}. La CNH, como parte del Plan Quinquenal de la Secretaría de energía, ha llevado a cabo 4 Rondas de licitaciones para asignar áreas contractuales de exploración y extracción de crudo y gas natural en campos terrestres, aguas someras y profundas. La primera, Ronda 0, fue exclusiva para Pemex en donde se adjudicó 489 asignaciones que representan 20,589 MMbpce en reservas 2P y 23,447 MMbpce en recursos prospectivos; estas asignaciones consisten de campos para explorar y explotar por Pemex, así como asociación con terceros y *Farmouts*. La Ronda 1, 2 y 3 (Ronda 3.2 y 3.3 fue publicada y cancelada por la nueva administración) fueron asignaciones a privados nacionales y extranjeros como licencias y producción compartida. Estas Rondas representaron un volumen remanente 2P de 5,601 MMbpce y 8,451 MMbpce en recursos prospectivos^{xiv}.

Uno de los objetivos principales de la Reforma es revertir la constante declinación en producción de crudo que ha presentado el país. En el periodo 2006-2016 presentó un decremento en producción de 3.8% anual, mientras que la importación de petrolíferos aumentó 23.9% de 2015 a 2016. El éxito de producción a futuro depende en la capacidad de los participantes de poder acceder a las reservas 3P, además de las actividades exploratorias que permitan incorporar nuevas reservas. La obtención de crudo en el periodo 2017-31 se concentra 79.3% en aguas someras y profundas y 20.7% en campos terrestres.

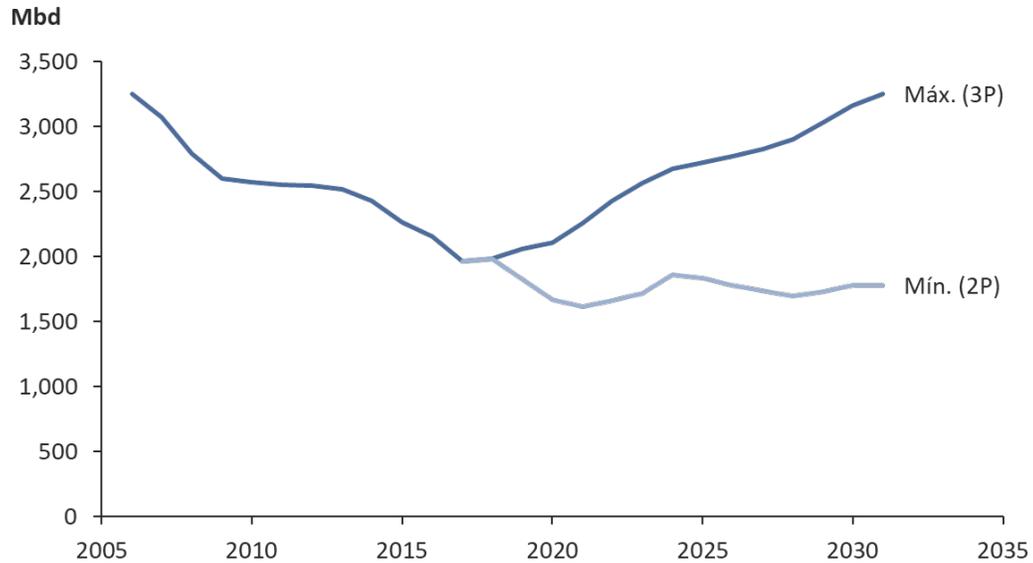


Figura 1.12. Escenarios de producción de crudo histórico 2006-16 y prospectivo 2017-31^{xv}

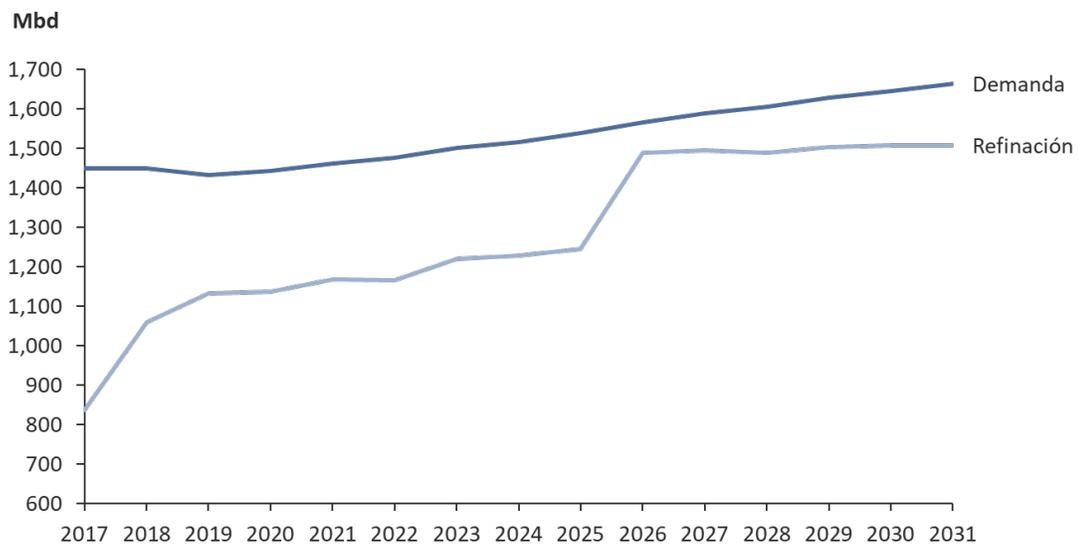


Figura 1.13. Demanda de petrolíferos vs demanda en el periodo prospectivo 2017-31^{xv}

La refinación y procesamiento, igualmente, han ido en declive en la última década, esto ha intensificado la importación de petrolíferos impactando negativamente en la balanza comercial. El periodo prospectivo estima un aumento de 4.8% anual en la producción de petrolíferos, no obstante, este aumento no es suficiente para atender la demanda nacional; la importación de gasolinas en el periodo es de 30.8%.

Capítulo II. Hidrógeno como portador energético.

El hidrógeno es el elemento más simple y más abundante en el Universo. Compone el 70% de la masa (bariónica) total en éste^{xvii}. Sin embargo, su forma molecular H_2 (gas a condiciones estándar) es escasa en la Tierra debido a su facilidad para formar compuestos más complejos, y su baja densidad permite que escape de la atmósfera. Se conocen tres isótopos del hidrógeno: protio 1H , deuterio 2H y tritio 3H , el primero siendo el más abundante.

La configuración electrónica fundamental de este elemento es $1s^1$; se encuentra en el grupo 1 de la tabla periódica, sin embargo, su comportamiento como metal no es claro y es tema actual de investigación. En la Tierra, el hidrógeno forma enlaces covalentes, principalmente, con oxígeno, carbono y otros no metales para formar agua (y peróxido), moléculas orgánicas e hidrácidos no metálicos. Además, forma enlaces iónicos en la forma de anión con metales, siendo NaH , LiH y CaH_2 algunos ejemplos de hidruros metálicos. El catión H^+ es especialmente relevante en las reacciones ácido-base e interacciones en solución acuosa. Además de los enlaces químicos, este elemento presenta interacciones intermoleculares por su comportamiento electroestático, puentes de hidrógeno con moléculas enlazadas covalentemente y que presentan momentos dipolares.

Tabla 2.1. Propiedades fisicoquímicas del hidrógeno molecular a condiciones estándar^{xviii}

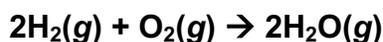
Fórmula química	H ₂
Masa atómica	2.016 g/mol
Estados de oxidación	-1, 0, +1
Energía de ionización	1312 kJ/mol
Estado físico	Gaseoso
Color	Incoloro
Olor	Inodoro
Punto de fusión @ 7.075 kPa	13.95 K
Punto de ebullición	20.38 K
Temperatura de inflamación	255.00 K
Temperatura de autoignición	844.30 K
Entalpía de vaporización	0.8985 kJ/mol
Entalpía de fusión	0.1190 kJ/mol
Entalpía de combustión	-286 kJ/mol
Densidad	0.08235 kg/m ³
Solubilidad en agua	0.182 cm ³ /cm ³ _{agua}
Clasificación de riesgos	Salud: 0 Inflamabilidad: 4 Reactividad: 0

Hidrógeno molecular como portador de energía.

El hidrógeno molecular es combustible en presencia de oxígeno y el producto de esta reacción es únicamente agua. Como se mencionó antes, el hidrógeno en su forma molecular diatómica (H₂) es escaso en la Tierra, esto hace que el combustible sea un portador energético y no una fuente primaria, ya que se requiere de energía para obtenerlo mediante procesos químicos y/o físicos. El potencial del hidrógeno como portador energético se conoce desde hace más de un siglo; sin embargo, en décadas recientes se ha intensificado su estudio. Esto se debe a que este gas parece ser parte de la respuesta al impacto negativo que generan los combustibles fósiles (la combustión de hidrógeno en presencia de nitrógeno puede formar óxidos de nitrógeno contaminantes).

Este combustible tiene el mayor contenido calorífico por unidad de masa que cualquier otro combustible convencional. No obstante, hay un factor que presenta un gran reto técnico en el aprovechamiento del contenido calorífico; la densidad del gas. Al ser el elemento más ligero, el hidrógeno molecular tiene una densidad (0.08 kg/m³) muy inferior a la de otros combustibles, esto hace que el almacenamiento en términos energéticos esté limitado a las condiciones en las que se encuentre el gas; este mismo fenómeno sucede, en menor medida (densidad de 0.7 kg/m³), con el gas natural por lo que el mercado de este hidrocarburo utiliza el contenido volumétrico de calor. Esto implica que para almacenar la misma cantidad de energía proveniente de hidrógeno que de gas natural en un volumen dado se requiere comprimir o licuar (y mantener) el hidrógeno a altas presiones y bajas temperaturas, los cuales son procesos energéticamente intensivos.

Ecuación estequiométrica de la reacción de combustión de hidrógeno:



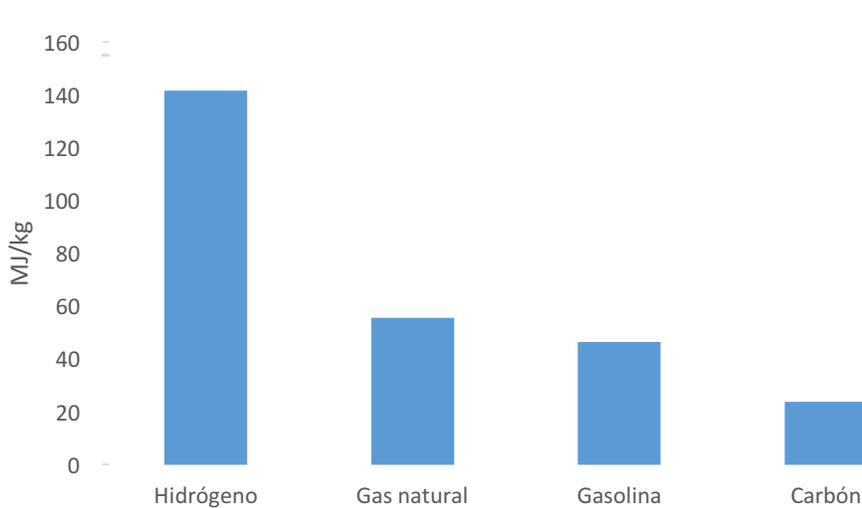
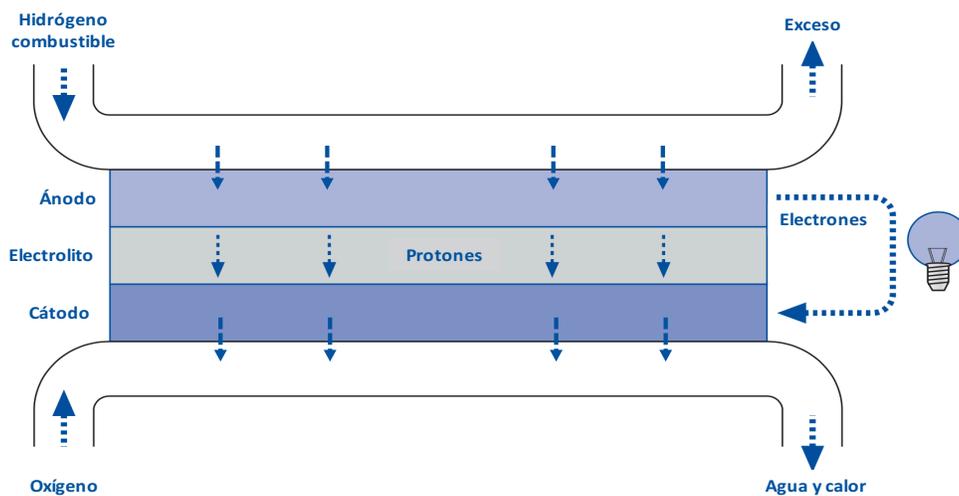


Figura 2.1. Poder calorífico (superior) de combustibles a condiciones estándar^{xix}

* Los valores de mezclas pueden variar dependiendo de su composición.

Actualmente la forma más eficiente de utilizar hidrógeno como portador energético es a través de celdas de combustible que no utilizan partes móviles a diferencia de motores de combustión interna. Las celdas de combustible son arreglos electroquímicos semejantes a las baterías en donde existen dos electrodos y un electrolito que permite el movimiento de cargas positivas, pero a diferencia de las baterías se necesita un flujo continuo de combustible (en este caso hidrógeno) para mantener la reacción.



Esquema 2.1. Arreglo de una celda de combustible a base de hidrógeno^{xx}

Generalmente, los planteamientos alrededor de las ventajas que ofrece el hidrógeno como combustible están enfocados en la etapa final de la cadena de valor; el consumo y transformación en energía disponible para el usuario (p.ej., electricidad o energía mecánica). Como cualquier producto, este combustible requiere de diferentes etapas antes de que el usuario final pueda disponer y consumir el producto. La cadena de valor, similar a los combustibles fósiles, consiste en producción, almacenamiento, distribución y consumo final. Es fundamental abordar cada etapa dentro de la cadena para poder analizar la factibilidad de una transición de combustibles fósiles hacia una economía de hidrógeno. A continuación, se describe de forma cualitativa la cadena de valor que será fundamental para establecer una propuesta funcional.

Producción.

Existen diferentes métodos de producción, sin embargo, sólo se mencionan los más relevantes en términos industriales. Es conveniente para este análisis, dividirlos en función de la materia prima y las fuentes de energía de las cuales se obtiene la producción. Esta división consiste en tres tipos de materia prima: fuentes fósiles, biomasa y electrólisis de agua; las fuentes de energía pueden ser limpias o convencionales.

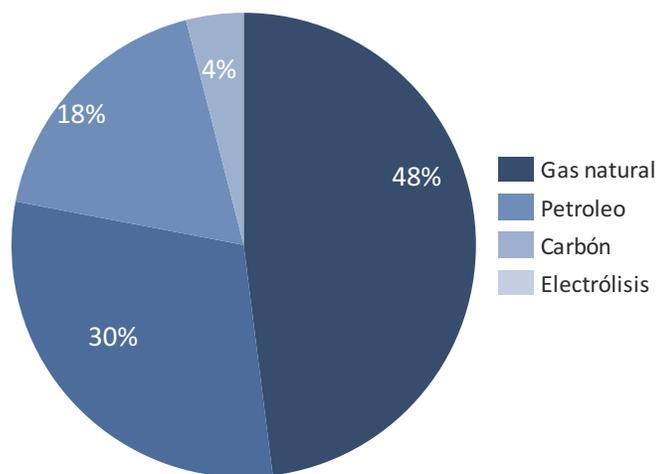


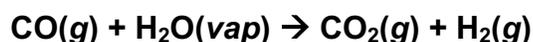
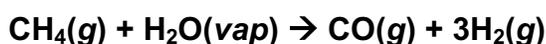
Figura 2.2. Producción global de hidrógeno por fuente, 2016^{xxi}

Producción a partir de compuestos orgánicos, fósiles y biomasa.

- **Reformado con vapor.**

Este es el método más utilizado comercialmente, más del 90% del hidrógeno a nivel global es producido con esta técnica^{xxii}. El reformado con vapor consiste en un flujo de gas natural (metano principalmente) que reacciona, en presencia de un catalizador de níquel, con vapor de agua para formar hidrógeno y monóxido de carbono. Posteriormente, el monóxido de carbono reacciona con más vapor, en presencia de un catalizador de óxido de hierro o cobalto, para formar más hidrógeno y dióxido de carbono.

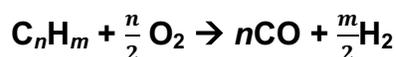
Ecuaciones estequiométricas de las reacciones del reformado de vapor:



- **Oxidación parcial.**

Esta técnica consiste en la oxidación (térmica o catalítica) de hidrocarburos, tanto gas natural como aceites más pesados y carbón, para formar hidrógeno. Esta reacción es más ineficiente y más intensiva energéticamente que el reformado por lo que no ha proliferado comercialmente.

Ecuación general de la reacción de oxidación parcial de hidrocarburos



- **Gasificación de carbón.**

La gasificación es la técnica industrial más antigua e incluye la reformación con vapor de agua. El carbón, tanto fósil o biomasa, es calentado a altas temperaturas por pirólisis hasta obtener una mezcla gaseosa que reacciona con vapor de agua (reformado con vapor). El resultado es una mezcla de hidrógeno (aprox. 60%), monóxido y dióxido de carbono, óxidos de azufre y de nitrógeno. Esta ruta, igualmente, es intensiva energéticamente y produce gases contaminantes de mayor impacto ambiental.

Estas técnicas son las más comunes a nivel industrial en donde el hidrógeno es un insumo dentro de cadena de producción y no tienen un enfoque energético. Actualmente la forma más eficiente, en términos energéticos y económicos, es el reformado con vapor y sólo tiene sentido considerar esta técnica para fines de energía limpia si el gas natural proviene de fuentes sustentables como subproducto de procesos industriales, gasificación de biomasa o captación de procesos biológicos. Sin embargo, no es claro que pueda ser una forma viable de obtención de hidrógeno como portador energético ya que es más eficiente, en términos energéticos y económicos, utilizar el metano producido como combustible en operaciones eficientes y de bajo impacto ambiental como ciclo combinado y cogeneración para generar electricidad y/o calor.

Producción a partir de fuentes limpias y/o renovables.

- **Electrólisis del agua.**

La electrólisis del agua es un proceso de descomposición del compuesto a través de una corriente eléctrica para formar oxígeno e hidrógeno. La reacción electroquímica ocurre en un electrolizador, en el cátodo se reduce el protón, H^+ , para formar H_2 mientras que en el ánodo el oxígeno del ion hidróxido, HO^- , se oxida para formar O_2 ; para que la reacción sea sostenida se requiere de un sobre potencial de voltaje.

Ecuación estequiométrica de la reacción de electrólisis del agua



Existen 3 tecnologías principales de electrolizadores en diferentes etapas de desarrollo y comercialización:

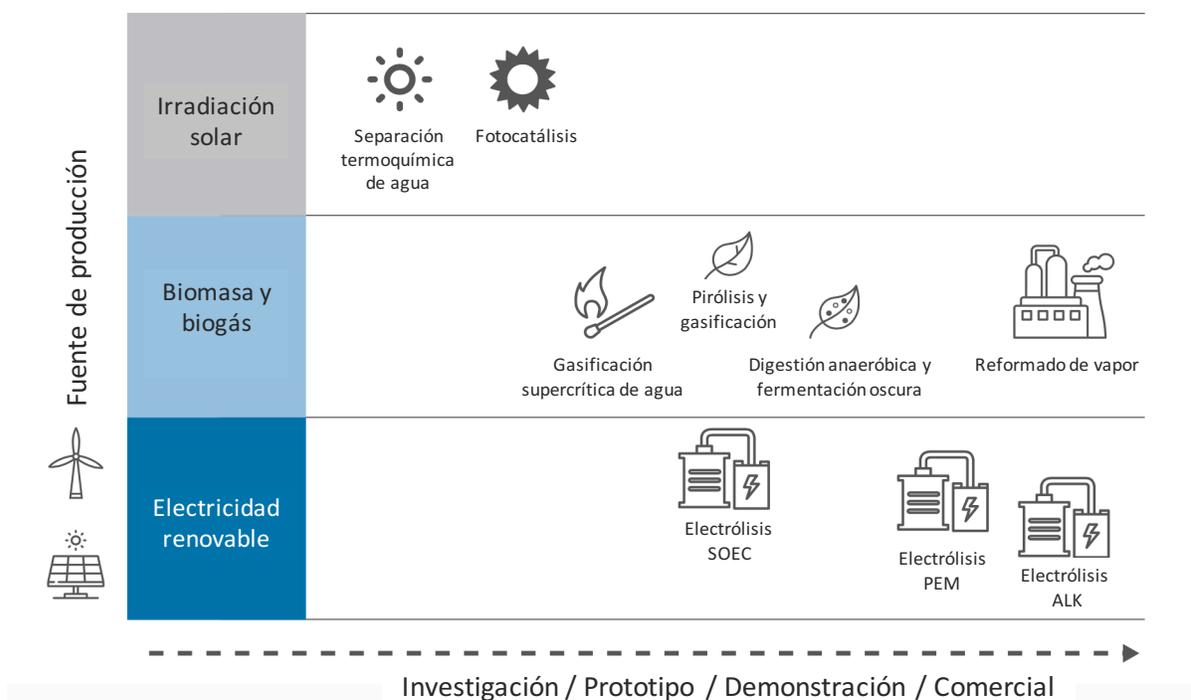
- **Electrólisis en medio alcalino, ALK:** Esta técnica es la más antigua industrialmente y consiste en dos electrodos que operan en una solución de hidróxido de potasio o sodio. Los electrodos están separados por un diafragma que separa los productos gaseosos y transporta los iones OH^- de un electrodo a otro.
- **Electrólisis con membrana de intercambio de protones, PEM:** Consiste en una celda equipada con un electrolito polimérico sólido. Éste es el encargado del transporte de protones, separación de productos y aislamiento eléctrico de los electrodos. La membrana polimérica está formada por ionómeros, polímeros con grupos iónicos fijos; típicamente se utiliza el fluoropolímero PFSA. Esta técnica fue desarrollada para optimizar desventajas que presentaba la electrólisis ALK, como baja presión de operación, baja densidad de corriente y carga parcial.
- **Electrólisis con óxidos sólidos, SOEC:** Consiste en una celda que utiliza un óxido sólido o cerámicas como electrolito, típicamente ZrO_2 dopado con Y_2O_3 . Este método es el menos desarrollado comercialmente, sin embargo, proyecta optimización sobre las técnicas anteriores; mayor eficiencia, menores requerimientos energéticos y operación a altas temperaturas y presiones.

Tecnologías en desarrollo e investigación.

Actualmente existen diferentes tecnologías en etapas de investigación y desarrollo para producir hidrógeno de forma limpia. Fundamentalmente se dividen en técnicas a base de biomasa y biogás y en irradiación solar. Estas técnicas en etapas de desarrollo aun no son escalables a nivel industrial por lo que no están dentro del alcance de este análisis; no obstante, están enlistadas las más prominentes.

- Biomasa y biogás:
 - Gasificación supercrítica de agua
 - Pirólisis y gasificación con recuperación de CO₂
 - Digestión anaeróbica y fermentación oscura

- Irradiación solar:
 - Separación termoquímica de agua
 - Fotocatálisis



Esquema 2.2. Desarrollo de métodos de producción limpios^{xxi}

Los métodos en esta sección están enfocados en reducir el impacto ambiental al tener emisiones mínimas de gases contaminantes e invernadero. Es fundamental detallar que estas técnicas abordan al hidrógeno como portador energético y no como insumo y para que sean mecanismos limpios la energía que es transformada de fuentes primarias y almacenada en el portador debe ser limpia y/o representar un almacenamiento energético que de otra manera hubiera sido desperdiciado. La flexibilidad que ofrecen los electrolizadores para almacenar energía que proviene de redes eléctricas que presentan altas ineficiencias por intermitencia o divergencia entre demanda y generación es tema del siguiente capítulo, sin embargo, no tiene sentido utilizar fuentes fósiles para generar electricidad que será utilizada para producir hidrógeno con fines energéticos ya que es contraproducente el impacto ambiental por las pérdidas energéticas inherentes a los sistemas y la imposible competencia económica con la energía proveniente de las fuentes fósiles en primer lugar.

Almacenamiento.

El almacenamiento del hidrógeno producido es la etapa de la cadena de valor que presenta el mayor reto en términos energéticos. Como se mencionó anteriormente el hidrógeno es el combustible más ligero y a pesar de tener el mayor contenido calorífico por unidad de masa su densidad hace que el almacenamiento energético requiera de grandes cantidades de trabajo en comparación con otros combustibles. Bajo las mismas condiciones de presión y temperatura, el hidrógeno debe estar contenido en un volumen más de tres veces mayor al del metano para almacenar la misma cantidad de energía. Dado que el espacio para almacenar y distribuir gases está estandarizado en la industria, es necesario aumentar la presión y/o disminuir la temperatura del gas hidrógeno, a través de compresión o criogenia, para llegar a una equivalencia energética con el metano. Esto presenta retos técnicos y económicos para el hidrógeno. En consecuencia, se están desarrollando diferentes técnicas para almacenar el hidrógeno con mayor eficiencia y sin un requerimiento energético tan alto.

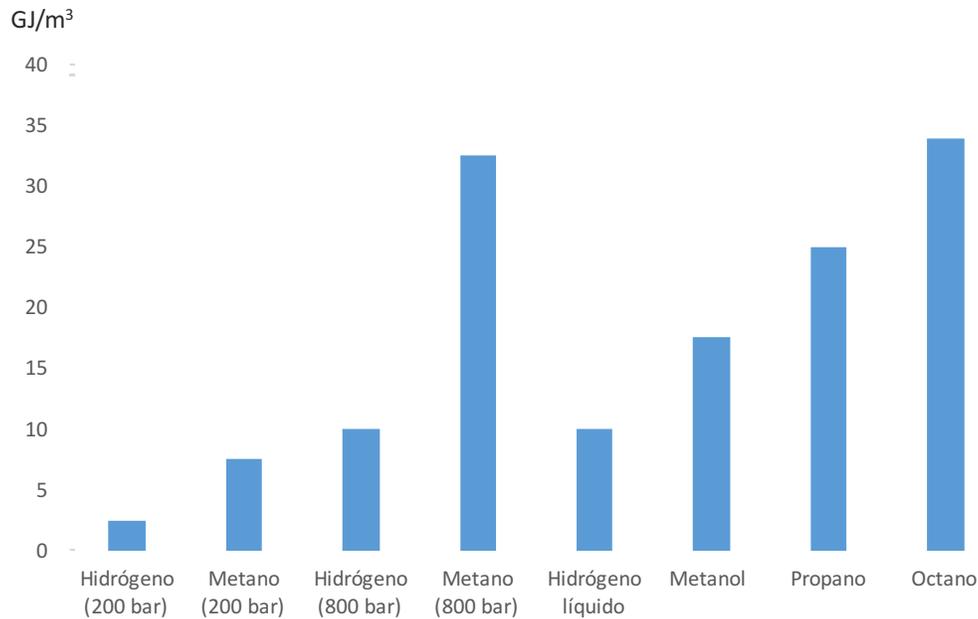


Figura 2.3. Comparativo de poder calorífico superior por unidad de volumen a diferentes presiones de diferentes combustibles^{xxiii}.

Métodos de almacenamiento.

- **Almacenamiento en tanques presurizados.**

El gas debe ser comprimido a altas presiones, típicamente entre 200 y 800 bar. El trabajo necesario para comprimir el gas está en función de las propiedades termodinámicas del proceso y el gas en cuestión. Generalmente la compresión es adiabática y el proceso involucre el coeficiente de expansión adiabático (γ), el cual es específico de cada gas por estar en función de la capacidad calorífica a presión y volumen constantes. Esto provoca que el hidrógeno requiera mayor compresión que el metano para almacenar la misma cantidad de energía, y que la compresión del hidrógeno requiera más energía que la del metano. La energía requerida para comprimir hidrógeno de presión atmosférica a 800 bar es alrededor del 13% de su contenido calorífico (excluyendo pérdidas eléctricas)^{xxiii}.

- **Almacenamiento en tanques criogénicos.**

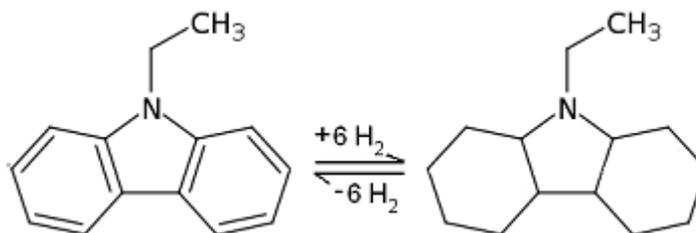
Almacenar hidrógeno en tanques criogénicos implica licuar el gas y mantenerlo a temperaturas muy bajas, menores a 20 K. Los procesos criogénicos son más complejos que los de compresión y los tanques deben ser más sofisticados para mantener la temperatura necesaria y evitar fugas. La licuefacción del gas sucede por refrigeración basada en ciclos de Carnot en procesos con múltiples etapas. El hidrógeno líquido tiene un contenido energético similar al comprimido a 800 bar (8.5 GJ/m^3)^{xxiv}, sin embargo, requiere de más energía que la compresión; cerca del 30% del contenido calorífico total.

- **Almacenamiento químico.**

Este método consiste en almacenar hidrógeno en compuestos químicos como hidruros o compuestos orgánicos con alto contenido de hidrógeno.

- **Almacenamiento con hidruros:** El almacenamiento en forma de hidruros no es una solución viable debido a que la demanda energética es aún mayor que el contenido del hidrógeno. La formación de hidruros metálicos, por ser energéticamente los menos demandantes como LiH, NaH y CaH_2 requieren entre 160% y 180% de la energía contenida en el hidrógeno (considerando la obtención de los metales, por ejemplo, Ca a partir de CaCO_3)^{xxiii}.
- **Almacenamiento con portadores orgánicos líquidos de hidrógeno, LOHC:** Este método proyecta mayor eficiencia que todos los métodos anteriores, incluyendo compresión y licuefacción. Este almacenamiento consiste en utilizar compuestos orgánicos como cicloalcanos, heterociclos y aromáticos que se hidrogenan a través de una reacción exotérmica y deshidrogenan con una endotérmica. La energía requerida es del 27%^{xxv}, sin embargo, ésta puede ser optimizada al utilizar el calor generado en la hidrogenación para las condiciones necesarias de la deshidrogenación. Este método es incipiente a nivel comercial, no obstante, ya existen comercializadores de equipos integrados para utilizarse.

Ecuación de la reacción reversible de hidrogenación del N-etilcarbazol (NEC)^{xxvi}



Distribución.

La distribución del hidrógeno es estándar en la industria. Existen 2 métodos principales: 1) transporte de los tanques presurizados o criogénicos por vías terrestres en autotanques o carrotanques (férreo) y marino a través de buques; 2) transporte a través de ductos con estaciones de compresión. El transporte terrestre presenta un costo mayor por unidad de masa que el transporte por ducto, aunque los ductos representan altos costos de capital para construcción de la infraestructura. Dentro del transporte por tanque, los tanques presurizados presentan un costo menor que los criogénicos debido a la tecnología necesaria para mantener las condiciones de operación. El transporte de hidrógeno a partir de LOHC es significativamente más económico que el transporte de tanques presurizados y por ende criogénicos, además de permitir un mayor transporte de masa en el mismo trayecto^{xxv}.

Mercado actual del hidrógeno.

Actualmente el hidrógeno tiene gran relevancia como gas industrial. La valuación global del mercado de hidrógeno en 2017 se estimó en 115 mil millones de dólares y se espera que crezca a 155 mil millones de dólares en 2022^{xxvii}; la demanda global en 2018 se estimó cercana a 300 mil millones de pies cúbicos^{xxviii}. La producción de hidrógeno se clasifica entre comercial (*merchant*) y captiva (*captive*). El primero siendo producción del gas para su venta a consumidores terceros a través de ductos, tanques criogénicos, cilindros presurizados, entre otros. El segundo engloba la producción *in situ* por el consumidor para uso interno.

La utilización del hidrógeno se concentra, principalmente, en la industria petroquímica en procesos de hidrocrackeo y desulfuración, en la química para formar amoníaco y derivados fertilizantes, en la fabricación de metales, producción de metanol, procesamiento de alimentos y en el sector electrónico. Es importante recalcar que en las industrias mencionadas el hidrógeno es un insumo dentro de cadenas de valor de productos no energéticos y más del 90% de su producción proviene de fuentes fósiles.

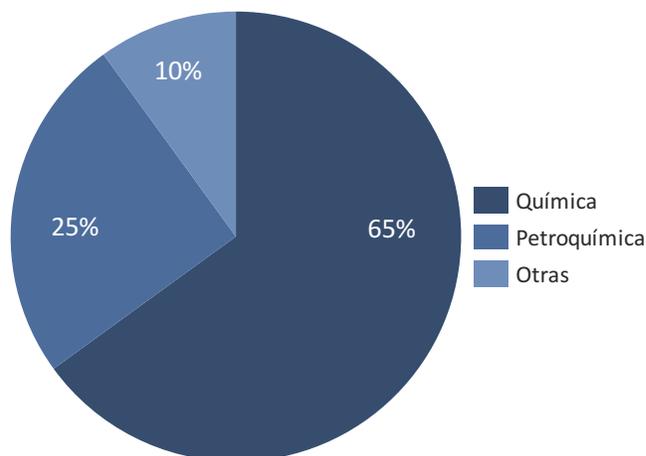


Figura 2.4. Demanda global de hidrógeno por industria, 2016^{xxi}

Economía del hidrógeno.

La economía del hidrógeno, teóricamente, puede ser parte de la solución al impacto ambiental generado por los combustibles fósiles y su emisión de gases contaminantes. Este sistema está basado en el hidrógeno como combustible principal y medio de transporte energético en todas las actividades fundamentales en una escala global. De ser así, virtualmente todo el abastecimiento energético del mundo sería sustentable y sin huella de carbono en el medio ambiente. Esta economía va acorde con la tendencia histórica de descarbonización de las fuentes de energía utilizadas por el hombre. Por milenios, la madera fue la fuente principal de energía hasta la llegada del carbón en la revolución industrial, posteriormente, en el siglo XX el petróleo y sus derivados hasta la tendencia actual de gas natural y otros medios sin carbono.

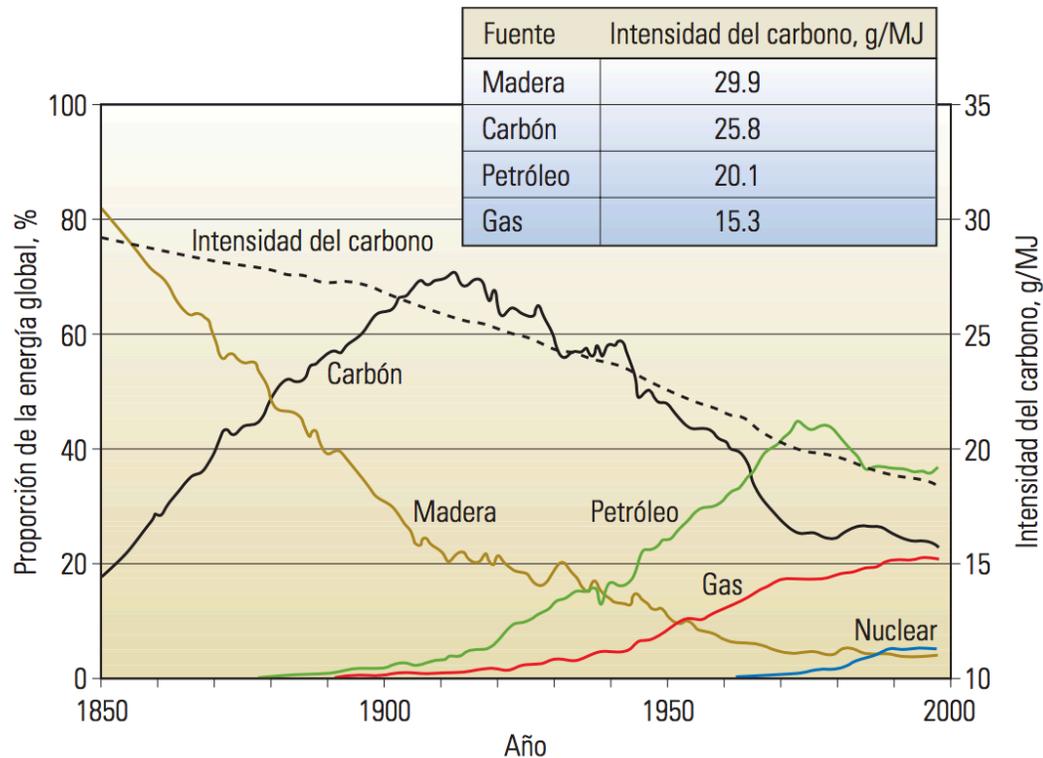
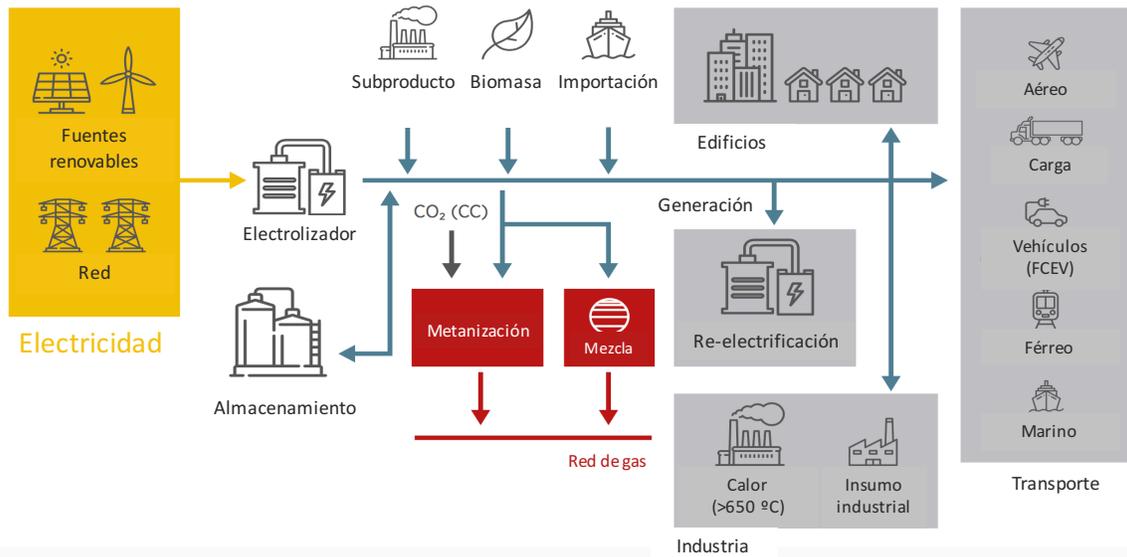


Figura 2.5. Tendencia global de descarbonización en fuentes de energía^{xxix}

Para que el hidrógeno sea considerado dentro de la transición energética debe ser un portador de energía proveniente de fuentes limpias, no fósiles. Actualmente el uso del hidrógeno se concentra casi exclusivamente en productos no energéticos; sin embargo, ha tenido un importante incremento como portador energético. Este gas ofrece un amplio espectro de posibilidades y flexibilidad en el sector energético para acelerar la transición energética a partir de fuentes limpias.

El almacenamiento de energía en hidrógeno puede atender la divergencia entre la curva de demanda eléctrica y la intermitencia de generación por fuentes limpias, consecuencia de fluctuaciones estacionales y diarias. El hidrógeno puede ser inyectado en las redes de gas natural para reducir la huella de carbono por un menor consumo del combustible fósil. En el sector transporte (terrestre, férreo, marino y aéreo) se puede lograr a través de vehículos eléctricos con celdas de combustible, FCEV (por sus siglas en inglés). Finalmente, en la industria que utiliza al gas como insumo, sustituyéndolo por el que provenga de fuentes limpias en lugar de fósiles.



Esquema 2.3. Integración de energías limpias para una economía del hidrógeno^{xxi}

Actualmente, la tecnología necesaria para llevar a cabo cada fase de la cadena existe; no obstante, cada tecnología se encuentra en diferentes etapas de desarrollo (p.ej., teórico, investigación comercial, etc.) cada una con ventajas y desventajas. El análisis para cada una de éstas se debe centrar en los requerimientos técnicos, económicos, ambientales y sociales, fundamentalmente. Es importante recalcar que, a pesar de existir factibilidad técnica y beneficios ambientales y sociales, cualquier alternativa energética debe competir económicamente con los combustibles convencionales.

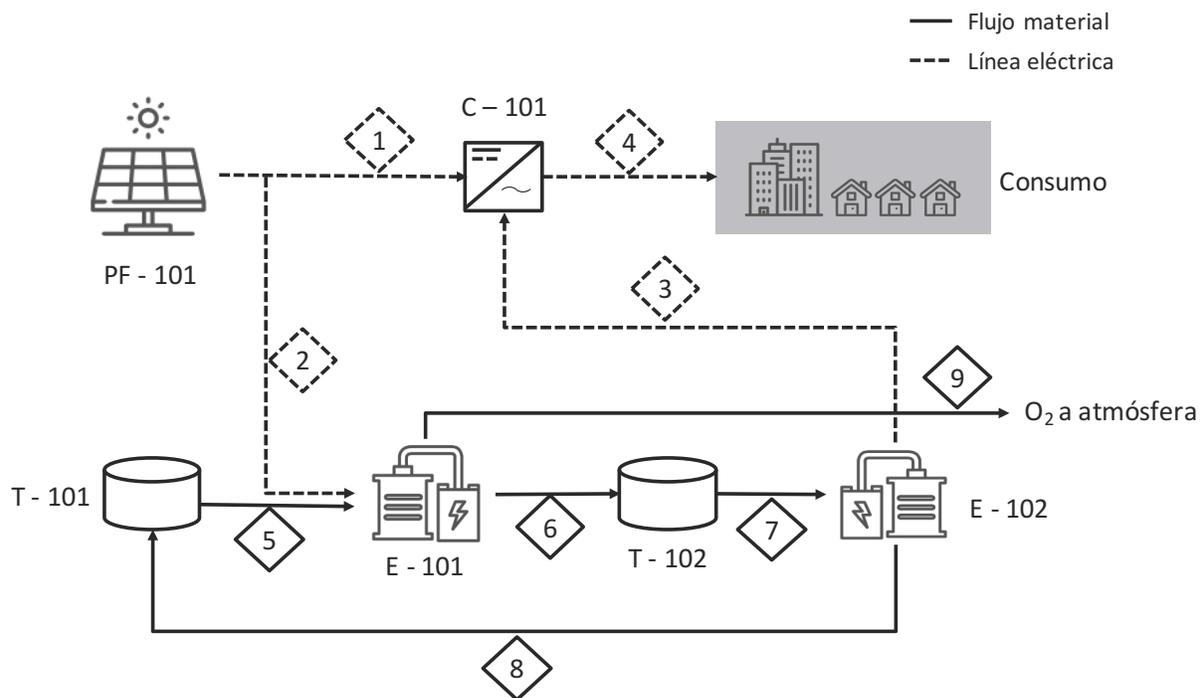
Capítulo III. Desarrollo y propuesta de modelo funcional.

La propuesta funcional consiste en un sistema que integra celdas fotovoltaicas para generar electricidad a partir de irradiación solar como fuente primaria y un sistema integrado de electrolizador y celda de combustible polimérica (PEM) para almacenamiento de energía que permita convergencia entre la generación eléctrica y la demanda por usuarios básicos en el sector residencial. El análisis se enfoca en la magnitud de los requerimientos por usuario para la generación eléctrica (superficie) y el almacenamiento de la energía en hidrógeno (volumen) en función de diferentes escenarios de irradiación solar y consumo eléctrico en México, considerando en ambas variables su fluctuación estacional y diaria.

Descripción del proceso.

Las celdas fotovoltaicas reciben irradiación del sol en función de la región y época del año y convierten parte de la energía de los fotones en corriente eléctrica alterna.

Esta corriente pasa hacia un convertidor de corriente para suministrar corriente directa hacia consumo. El excedente energético va hacia el electrolizador PEM, el cuál es alimentado por un tanque de agua para efectuar la separación de ésta. Una vez separado el hidrógeno y el oxígeno, el primero es dirigido hacia el tanque de almacenamiento en LOHC y el segundo tiene una salida atmosférica. Posteriormente, se efectúa la deshidrogenación de LOHC para obtener el hidrógeno almacenado y ser conducido hacia la celda de combustible PEM. En ésta se obtiene una corriente eléctrica alterna que es convertida a directa por el mismo convertidor y el subproducto de la oxigenación es agua, la cuál es recuperada y almacenada en el mismo tanque mencionado.



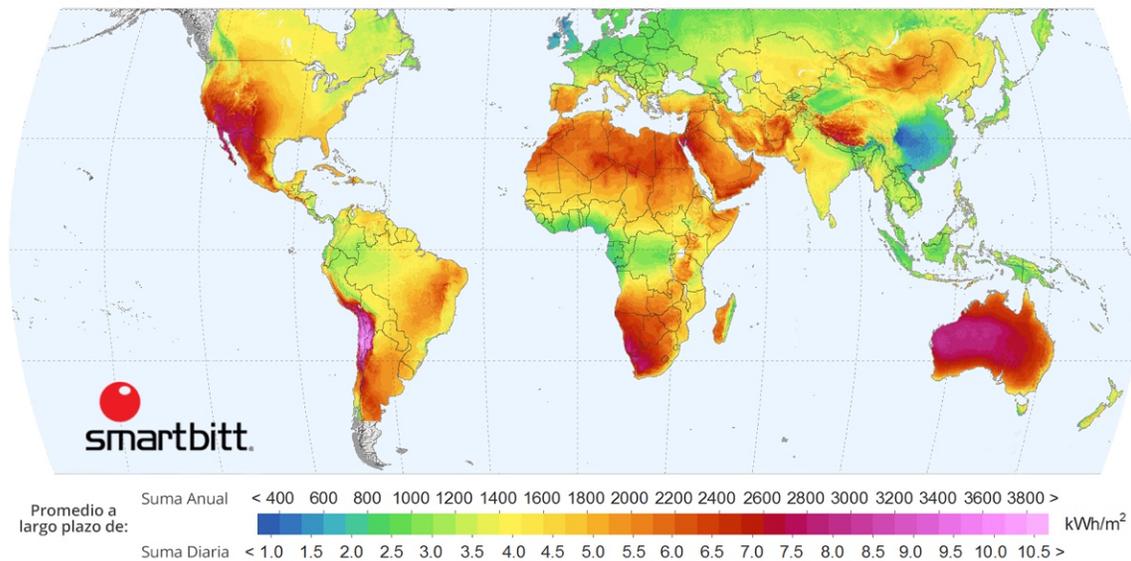
Esquema 3.1. Diagrama de flujo del proceso (DFP)

Tabla 3.1. Listado de equipos y líneas de flujo

Nombre	Equipo	Línea	Flujo
PF - 101	Panel fotovoltaico	1	Línea eléctrica AC
C - 101	Convertidor AC/DC	2	Línea eléctrica AC
T - 101	Tanque de H ₂ O	3	Línea eléctrica AC
T - 102	Tanque de H ₂ /LOHC	4	Línea eléctrica DC
E - 101	Electrolizador PEM	5	Flujo de H ₂ O
E - 102	Celda de combustible PEM	6	Flujo de H ₂
		7	Flujo de H ₂
		8	Flujo de H ₂ O
		9	Flujo de O ₂

Irradiación solar en México.

México es uno de los países con mayor potencial de generación eléctrica fotovoltaica. México se ubica geográficamente entre 15° y 35° de latitud. De acuerdo con la IRENA ésta es en una de las zonas con mayor irradiación solar. La posición privilegiada del país otorga 5.3 kWh/m² de irradiación solar en promedio anual^{xxx}. Finalmente, esto se traduce en un potencial de generación eléctrica probado de 25,052 GWh/a y 6,500,000 GWh/a en recursos posibles^{xxxii}.



Esquema 3.2. Mapa de irradiación solar en el mundo^{xxxii}

Es fundamental analizar el potencial solar por zonas del país, al igual que los ciclos estacionales a lo largo del año y el comportamiento diario para poder diseñar una propuesta factible. El Estado con el mayor irradiación solar anual promedio es Sonora con 6.2 kWh/m² y el menor es Veracruz con 4.1 kWh/m². Todo el país presenta una estacionalidad similar con los mayores índices entre los meses de abril y julio, mientras que los meses con menor irradiación son de octubre a febrero^{xxxii}.



Figura 3.1. Promedio de irradiación solar anual en México (valores en anexo)^{xxxii}

Para este análisis se compactaron todos los Estados de la República en tres escenarios; alto, medio y bajo. Estos escenarios son los terciles en función de la distribución de irradiación promedio anual.

Tabla 3.2. Agrupación de Estados en función de distribución de irradiación anual

Escenario	Estados (en orden descendente)
Alto	Sonora, Chihuahua, Querétaro, Zacatecas, Durango, Baja California Sur, Jalisco, Aguascalientes, Guanajuato, Oaxaca y Baja California
Medio	Puebla, Hidalgo, Ciudad de México, Guerrero, Campeche, Estado de México, Sinaloa, Tlaxcala, San Luís Potosí, Michoacán, Colima y Nayarit
Bajo	Chiapas, Yucatán, Quintana Roo, Coahuila, Tamaulipas, Nuevo León y Veracruz

*Nota: No están incluidos Morelos ni Tabasco por falta de datos consistentes



Figura 3.2. Escenarios de irradiación solar en México

Por último, es importante considerar la distribución de la irradiación solar diaria. Este fenómeno está en función de las coordenadas de la región en cuestión y la posición de la Tierra con respecto al Sol. Entre más cerca esté una región el ecuador las horas de luz tendrán menos fluctuación, por el contrario, cerca de los polos será mayor.

Para dimensionar esta irradiación en cada día existen las horas de sol pico (HSP), este concepto agrupa la distribución en “paquetes” de tiempo. Una HSP equivale a 1 kWh/m².

Fórmula para cálculo las HSP de una región específica:

$$HSP_{región} = \frac{\text{irradiación}}{HSP}$$

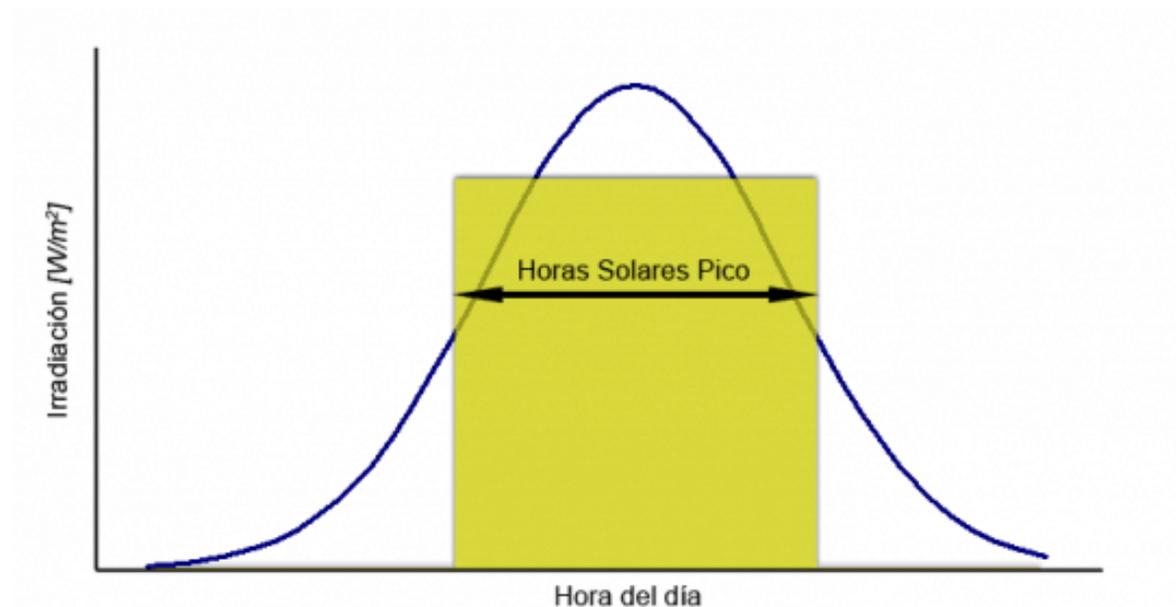
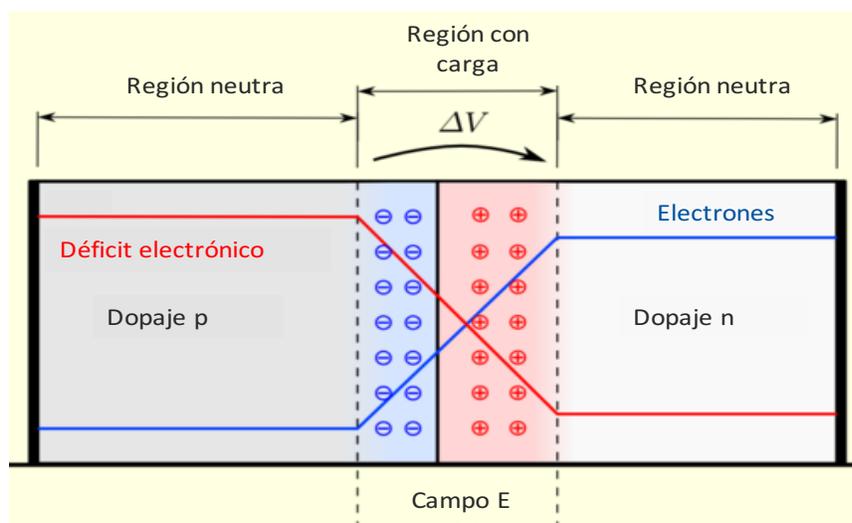


Figura 3.3. Distribución de la irradiación solar diaria^{xxxiii}

Es importante recalcar que el punto máximo del Sol en el cielo no necesariamente coincide con las 12:00 h debido a la configuración de los husos horarios y los cambios de horario, sin embargo, por practicidad en este análisis se va a considerar esta hora como el punto máximo.

Generación fotovoltaica de electricidad.

Las tecnologías celdas fotovoltaicas convierten directamente la energía del sol en electricidad a través de materiales semiconductores, generalmente películas sílicas cristalinas. Las celdas consisten de dos capas de silicio dopado, una superior con dopaje tipo n y la inferior con tipo p. El tipo n genera una densidad electrónica superior al silicio puro y el tipo p una menor, cuando los fotones provenientes del Sol impactan en la capa superior excitan los átomos del material creando una capa de electrones libres que son atraídos hacia la capa inferior con menor densidad electrónica, generando un potencial eléctrico.



Esquema 3.3. Diagrama de configuración electrónica de una celda fotovoltaica^{xxxiv}

Al igual que todas las tecnologías, las celdas fotovoltaicas tienen una eficiencia asociada a la energía de entrada por medio de irradiación solar y a la de salida como electricidad, además la corriente eléctrica generada es directa y debe convertirse a alterna para poder consumirse. Actualmente, la tecnología con celdas de silicio monocristalino tiene una eficiencia de entre 15% y 25% mientras que el factor promedio de degradación por transformación de DC a AC en sistemas fotovoltaicos es de 0.77^{xxxv}.

Demanda eléctrica en México.

La electricidad es un servicio fundamental para realizar una extensa gama de actividades en todos los sectores del país. El Sistema Eléctrico Nacional (SEN) está compuesto por 7 regiones interconectadas entre sí a través del Sistema Interconectado Nacional y 3 regiones aisladas en la península de Baja California.



Esquema 3.4. Regiones del Sistema Eléctrico Nacional^{xxxvi}

La demanda eléctrica del país considera el consumo eléctrico de las regiones, pérdidas, comportamiento histórico de carga, entre otros factores. En 2017 la demanda máxima del país fue de 43,319 MWh/h en donde las regiones Central, Occidental y Noreste fueron las más demandantes. Como se ha mencionado en el Capítulo I la CFE da servicio a los usuarios en 3 modalidades; suministro básico, suministro calificado y suministro de último recurso. Este análisis está enfocado exclusivamente en el suministro básico, específicamente en el sector residencial. Este sector presenta diferentes niveles de demanda en función de los requerimientos estacionales y las regiones del país.



Figura 3.4. Demanda total del sector residencial de México en 2017^{xxxvii}

La gráfica anterior muestra la demanda eléctrica total de México en el año, sin embargo, el modelo propuesto debe contemplar la demanda por Estados en función de los escenarios de irradiación (alto, medio y bajo). Por lo tanto, la demanda de estos escenarios debe ser porcentual en función de la demanda máxima, en donde septiembre es el mes con mayor demanda y enero el menor.

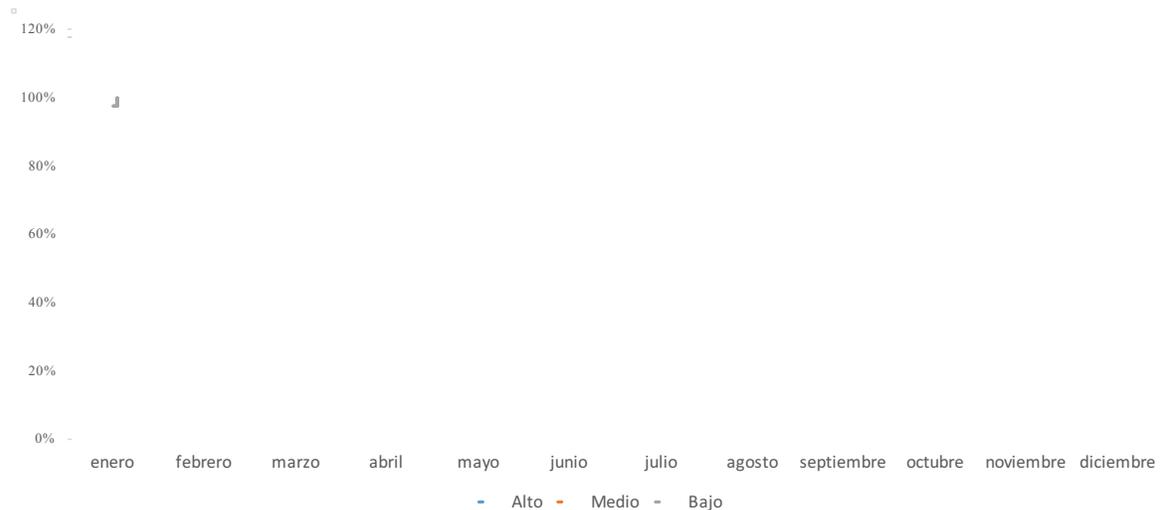


Figura 3.5. Demanda porcentual en función de los escenarios de irradiación

Demanda eléctrica promedio por usuario en el sector residencial.

El consumo eléctrico por usuario en el sector residencial en México depende de diferentes factores, principalmente, el clima de la región y la situación económica de los usuarios. El consumo medio anual nacional por usuario en 2017 fue de 1.58 MWh que representa 4.3 kWh al día^{xxxviii}. La CFE tiene 2 tipos de tarifa para el cobro de electricidad en el sector residencial; DB1 para consumo menor a 150 kWh por mes o 5 kWh al día (esta tarifa tiene subsidio por parte del Estado) y DB2 (anteriormente DAC) para consumos mayores a 150 kWh al mes (esta tarifa no tiene subsidio)^{xxxvi}. Por otra parte, la CFE permite celebrar un contrato de interconexión con un usuario básico en donde el usuario puede tener generación a partir de fuentes renovables o sistemas de cogeneración para autoconsumo.

Este contrato implica que la CFE instala medidores bilaterales en donde registra el consumo neto en función del consumo o generación del usuario generando un crédito a favor del usuario si en un periodo éste tiene una generación neta a su favor. El contrato aplica hasta una generación de 0.5 MW en el sector residencial^{xxxix}. Con base en esta información, el análisis contempla 3 escenarios de consumo promedio diario; bajo consumo de 2.5 kWh, medio consumo de 5.0 kWh y alto consumo de 7.5 kWh. Es fundamental considerar la distribución de la demanda horaria promedio en el sector para dimensionar los requerimientos de almacenamiento por la divergencia entre consumo y generación. La demanda máxima promedio en el sector residencial ocurre entre las 20:00 y las 22:00 h mientras que el máximo de irradiación solar y generación ocurre a las 12:00 h.

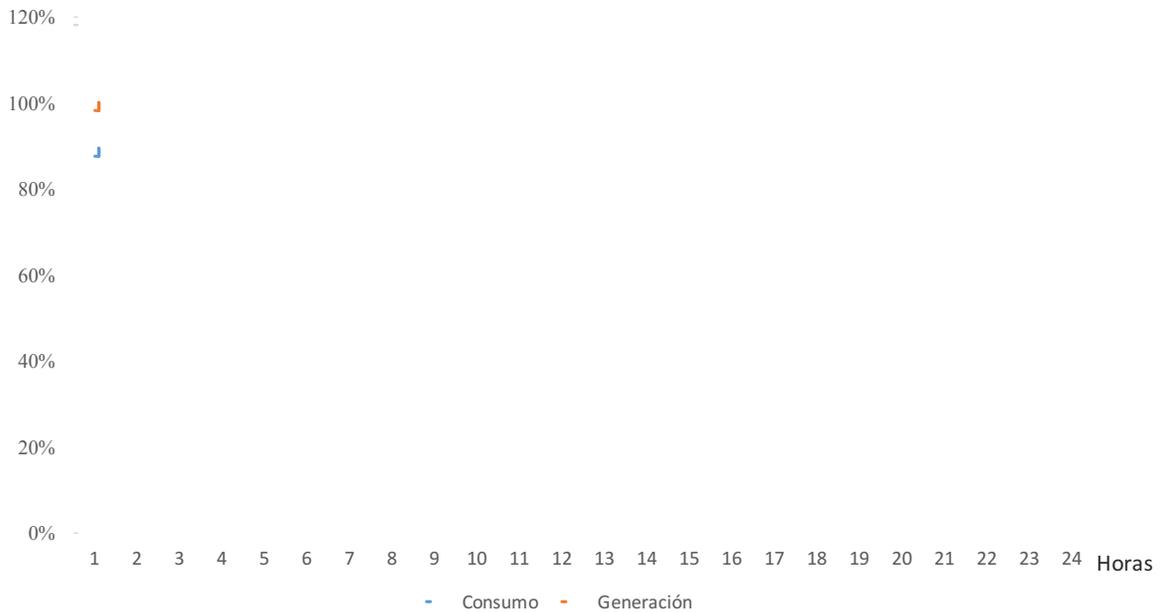


Figura 3.6. Curva de demanda porcentual horaria promedio del sector residencial en México y distribución porcentual de generación fotovoltaica^{xI}

Almacenamiento de energía.

Como consecuencia de la divergencia entre generación y demanda es necesario almacenar la energía eléctrica que supera la demanda en los periodos de irradiación para poder utilizarla cuando no hay más generación, cuando no hay sol. El volumen energético por almacenar está en función de las dimensiones de los paneles solares propuestos para cada escenario de irradiación y consumo eléctrico, este dimensionamiento debe ser tal que haya un balance energético neto entre demanda y generación.

El sistema propuesto es una implementación de electrolizadores y celdas de combustible PEM debido a la flexibilidad de operación y eficiencia que presentan estos sistemas. Las celdas de combustible son prácticamente el arreglo inverso del electrolizador PEM, en dónde un catalizador hace que el hidrógeno reaccione se oxide en presencia del oxígeno en el aire generando una corriente eléctrica, sin embargo, las eficiencias de cada sistema están asociadas a fenómenos distintos.

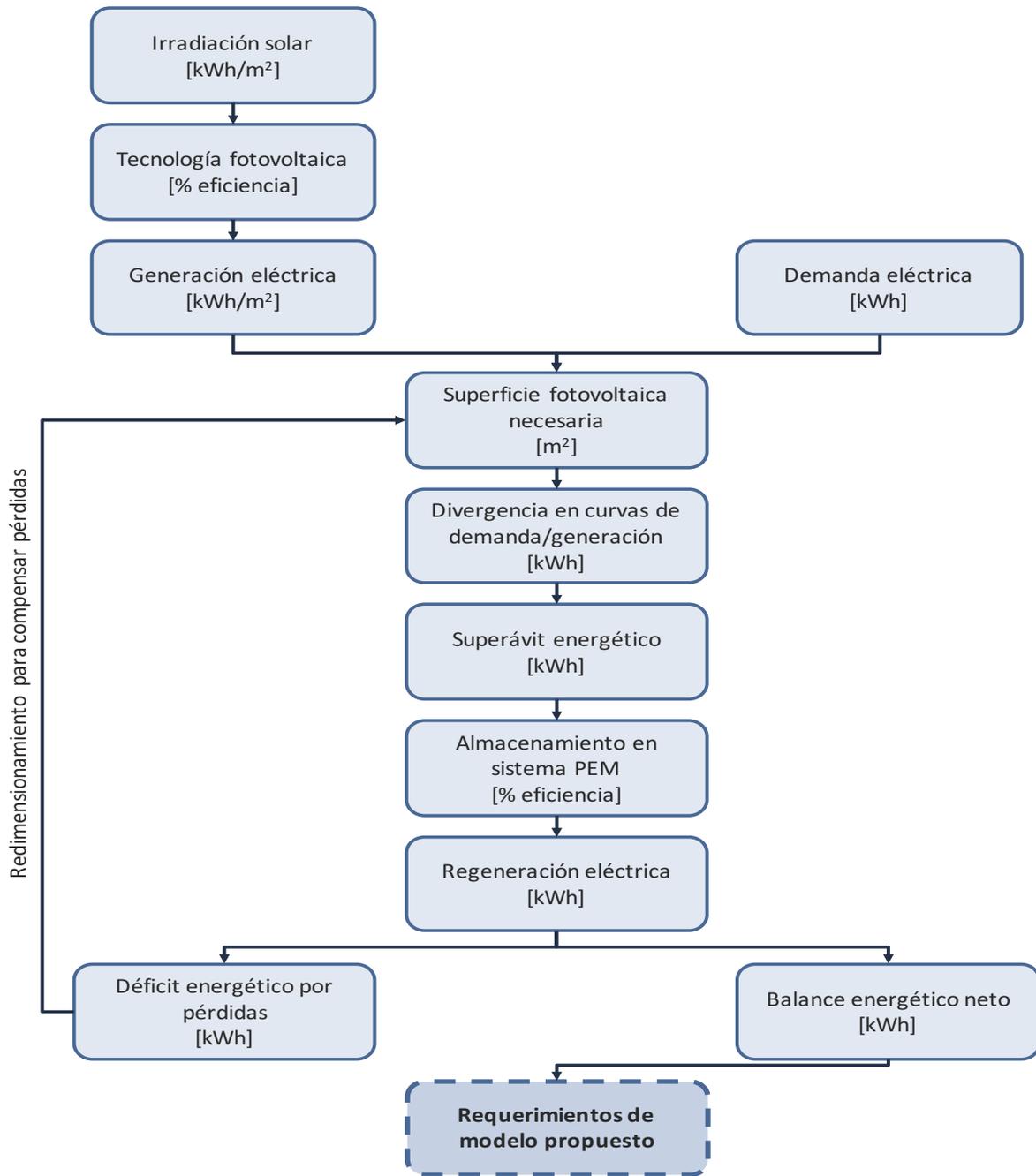
Los electrolizadores tienen su eficiencia asociada al sobre potencial voltaico necesario para separar el agua, aproximadamente 1.76 volts. Por otro lado, las celdas de combustible presentan pérdidas de energía en calor, sin embargo, son considerablemente menores que las de combustión interna. El arreglo consiste en módulos apilados de electrolizador/celda de combustible, dimensionados en función de los requerimientos energéticos. Los sistemas PEM tienen ventajas operativas, sobre ALK y SOEC, para el modelo propuesto; operan a condiciones atmosféricas y temperaturas menores a 80°C, tienen un tiempo de encendido/apagado de 1 a 5 segundos, un rango de operación de hasta 160% de la carga nominal y bajo mantenimiento por corrosión mínima. Por último, el almacenamiento del hidrógeno propuesto es en portadores orgánicos LOHC, ya que presentan ventajas operativas acorde al sistema PEM; almacenamiento atmosférico y dinamismo entre carga y descarga.

Tabla 3.3. Condiciones de operación del sistema^{xli}

Sistema PEM	Eficiencia [HHV]
Electrolizador PEM	60%
Celda de combustible PEM	53%
Total	32%
Sistema LOHC	gramo de H₂ / litro de LOHC
Almacenamiento de H ₂	25.4
Degradación por ciclo	0.1%

Capítulo IV. Resultados y análisis técnico y económico del modelo propuesto.

Los cálculos para dimensionar los requerimientos energéticos y másicos del modelo propuesto fueron hechos en el programa Microsoft Excel 15.13.3. siguiendo la metodología descrita a continuación. Esta metodología considera como variables la irradiación solar por región y la demanda eléctrica, como se mencionaron los escenarios en el capítulo anterior, debido a que éstas son necesarias para poder dimensionar los requerimientos particulares de la región. Los otros factores, como eficiencias de las tecnologías y tipo de tecnología, dependen directamente del estado de desarrollo en el que se encuentren y no tienen un efecto directo en función de las regiones en que se implementen.



Esquema 4.1 Metodología para desarrollar la propuesta de modelo funcional

Resultados técnicos del modelo propuesto.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios de irradiación y de consumo por usuario. Es importante mencionar que a pesar de que el sistema de almacenamiento tiene una eficiencia total del 32%, ésta sólo representa un 5% extra en el redimensionamiento del área fotovoltaica necesaria, ya que este extra en área es suficiente para compensar en generación.

Tabla 4.1. Resultados técnicos del modelo propuesto

Escenario de irradiación	Escenario de demanda	Generación promedio [kWh/m ²]	Consumo [kWh/día]	Área fotovoltaica [m ²]	H ₂ [kg]	H ₂ O [l]	LOHC [l]
Alto	Alto consumo	0.88	7.50	8.96	5.73	51.60	226.14
	Medio consumo		5.00	5.97	3.82	34.40	150.76
	Bajo consumo		2.50	2.99	1.91	17.20	75.38
Medio	Alto consumo	0.79	7.50	10.05	5.29	47.64	208.78
	Medio consumo		5.00	6.70	3.53	31.76	139.19
	Bajo consumo		2.50	3.35	1.76	15.88	69.59
Bajo	Alto consumo	0.70	7.50	11.40	5.89	52.97	232.15
	Medio consumo		5.00	7.52	3.55	31.97	140.12
	Bajo consumo		2.50	3.80	1.96	17.66	77.38

Tabla 4.2. Capacidad instalada de sistema fotovoltaica y PEM

Escenario de irradiación	Escenario de demanda	Capacidad instalada fotovoltaica [kWp]	Capacidad instalada electrolizador [kWp]	Capacidad instalada celda de combustible [kWp]
Alto	Alto consumo	1.79	0.72	0.43
	Medio consumo	1.19	0.48	0.28
	Bajo consumo	0.60	0.24	0.14
Medio	Alto consumo	2.01	0.68	0.39
	Medio consumo	1.34	0.45	0.26
	Bajo consumo	0.67	0.23	0.13
Bajo	Alto consumo	2.28	0.67	0.45
	Medio consumo	1.50	0.44	0.30
	Bajo consumo	0.76	0.22	0.15

Con la finalidad de ilustrar el comportamiento, se presentan los resultados en detalle del escenario de alto consumo en un escenario de irradiación alto; comportamiento mensual del año y comportamiento diario en el mes de mayo (por ser máximo de irradiación) y septiembre (por ser máximo de consumo).



Figura 4.1. Generación, consumo y almacenamiento promedio anual en escenario de irradiación alto y alto consumo

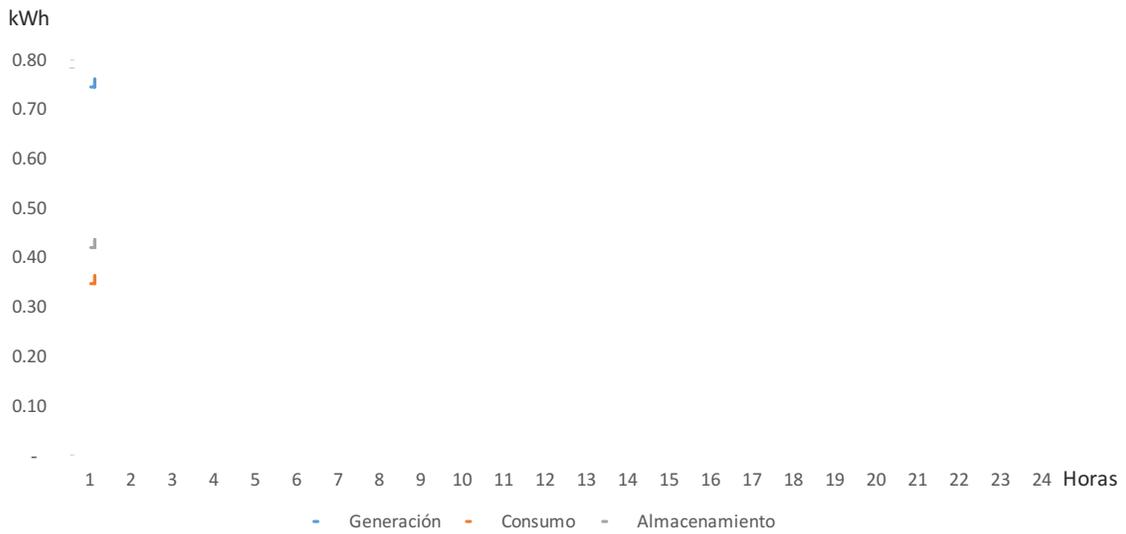


Figura 4.2. Generación, consumo y almacenamiento diario en el mes de mayo en escenario de irradiación alto y alto consumo

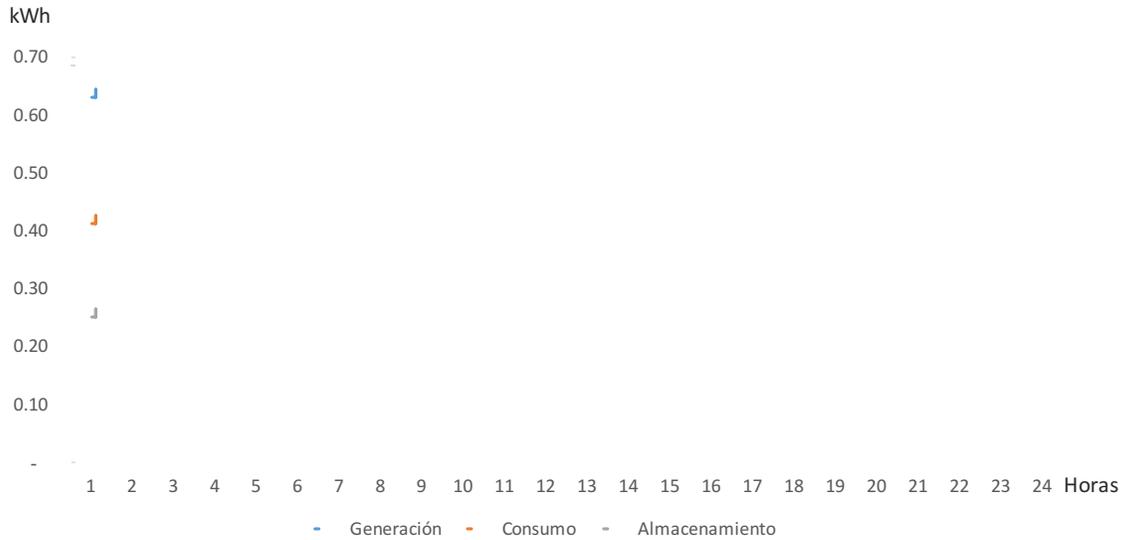


Figura 4.3. Generación, consumo y almacenamiento diario en el mes de mayo en escenario de irradiación alto y alto consumo

Las gráficas anteriores muestran el comportamiento del modelo propuesto en el escenario de alta irradiación y alto consumo. En la figura 4.1 se puede observar que durante los meses de enero a julio la generación eléctrica excede los requerimientos del usuario, hasta 2 kWh por día. Durante estos meses se lleva a cabo almacenamiento de energía a través del sistema electrolítico PEM, que no sólo es utilizada diariamente en las horas en dónde no hay generación fotovoltaica, sino para los meses posteriores donde la generación es menor al consumo. Este comportamiento diario es evidente en las figuras 4.2 y 4.3; en el mes de mayo la generación fotovoltaica y el almacenamiento de energía son superiores al consumo, mientras que en el mes de septiembre la generación y el almacenamiento no son suficientes para cubrir el consumo y es aquí cuando se utiliza la energía almacenada entre enero y julio.

Resultados económicos del modelo propuesto.

A partir de los resultados técnicos obtenidos se analizaron las implicaciones económicas de dicho modelo. El análisis contempla el costo de capital de inversión (CAPEX), el costo de operación y mantenimiento (OPEX) y el ahorro en tarifas de la CFE (no considera subsidio).

Tabla 4.3. Supuestos económicos^{xlii}

	Generación fotovoltaica [\$/kWp]	Electrolizador [\$/kWp]	Celda de combustible [\$/kWp]	LOHC [\$/l]	Tarifa CFE [\$/kWh]
CAPEX	31,844.00	25,536.00	143,222.00	83.00	Base: 107.80 Consumo: 5.29
OPEX [% de CAPEX]	1%	2%	2%	4%	

*Nota: datos en pesos mexicanos considerando la paridad de 19.00 pesos/dólar^{xliii}

A partir de los supuestos económicos anteriores se proyectaron los flujos de efectivo anuales, con la finalidad de identificar el momento en el que se recupera la inversión por implementar el modelo propuesto a partir del ahorro en tarifas eléctricas de la CFE. En seguida se presentan las gráficas del flujo acumulado de efectivo divididas en los escenarios de irradiación, cada escenario de irradiación con los tres escenarios de consumo.

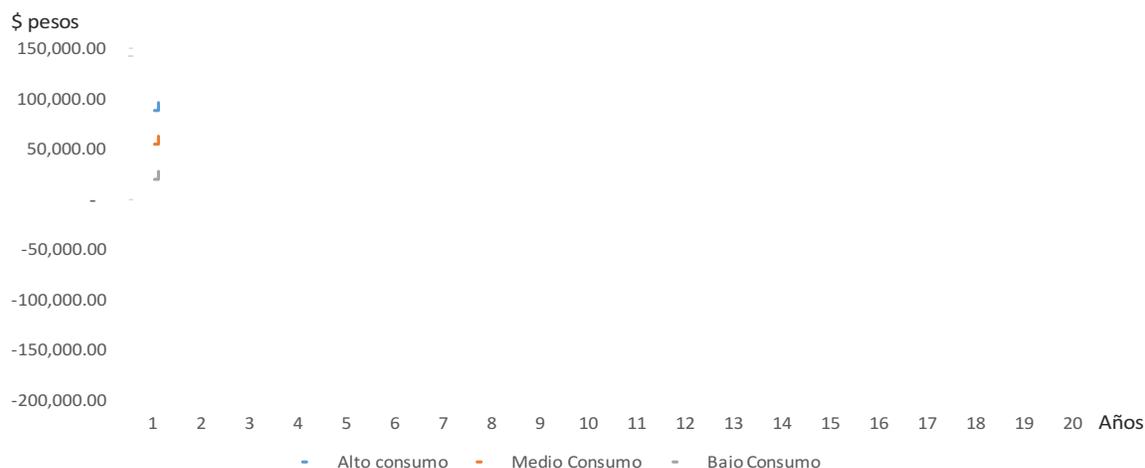


Figura 4.4. Flujo acumulado de efectivo de escenario de irradiación alto

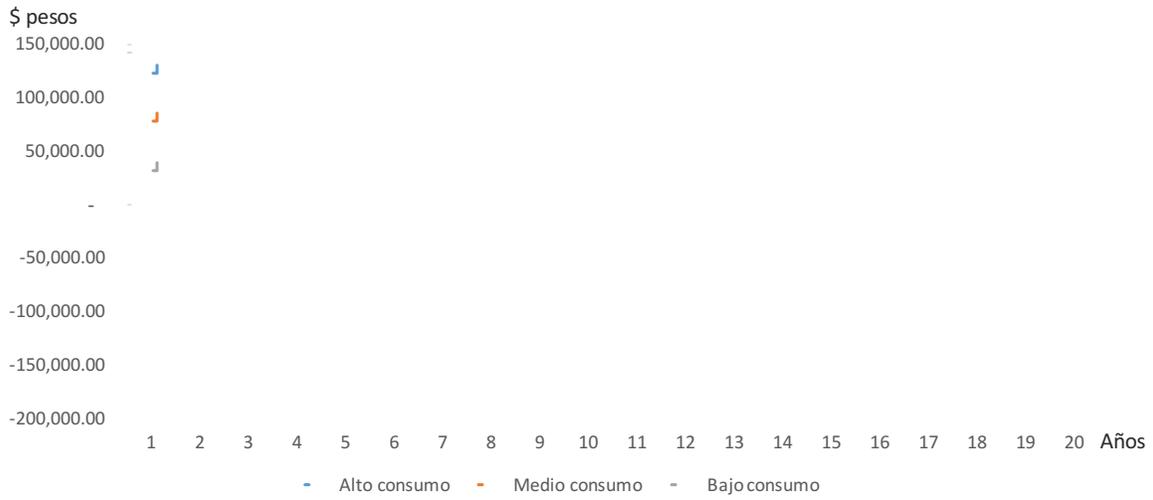


Figura 4.5. Flujo acumulado de efectivo de escenario de irradiación medio

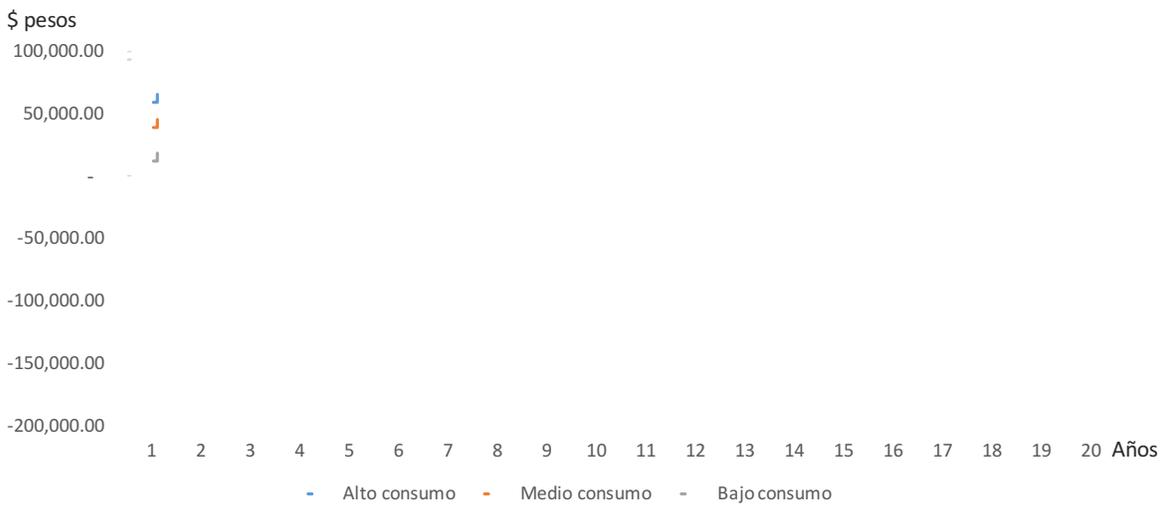


Figura 4.6. Flujo acumulado de efectivo de escenario de irradiación bajo

De acuerdo el dimensionamiento de los sistemas necesarios para cada escenario de consumo e irradiación se obtiene un retorno de inversión de entre 12 y 15 años; 13 años para el escenario de irradiación alto, 12 años para el escenario de irradiación medio y 15 años para el escenario de irradiación bajo. El comportamiento no lineal entre estos escenarios se atribuye a que el escenario de irradiación alto, a pesar de tener mayor generación por unidad de área, presenta mayor desviación en irradiación energética durante el año causando un mayor requerimiento en el sistema de almacenamiento y por lo tanto impactando en un mayor CAPEX que se recupera en más tiempo. Finalmente, estos flujos para cada escenario fueron traídos a valor presente con una tasa de descuento anual del 10% para identificar el costo actual del modelo propuesto.

Tabla 4.4. Valor presente del modelo propuesto

Escenario de irradiación	Escenario de demanda	Valor presente
Alto	Alto consumo	-\$72,447.22
	Medio consumo	-\$48,880.34
	Bajo consumo	-\$25,313.45
Medio	Alto consumo	-\$62,576.43
	Medio consumo	-\$42,299.81
	Bajo consumo	-\$22,023.19
Bajo	Alto consumo	-\$92,310.63
	Medio consumo	-\$60,101.44
	Bajo consumo	-\$31,934.59

Capítulo V. Conclusión y próximos pasos.

El panorama energético global se encuentra en un punto de inflexión, en donde los paradigmas del siglo XX están siendo obsoletos. El impacto ambiental causado por los métodos de producción, no sólo energéticos, ha escalado a niveles críticos y esto ha focalizado la necesidad de acelerar la transición energética actual. Existen diferentes acuerdos a nivel global y objetivos nacionales que apuntan a un panorama optimista, sin embargo, para poder alcanzarlos es fundamental el desarrollo de sistemas integrales de energía acorde a las sociedades que impactan. Este desarrollo debe considerar viabilidad técnica, económica y social para que exista realmente un progreso en materia energética sustentable. Debe haber conciencia de la gran dependencia energética que existe aún en combustibles fósiles, particularmente en México. Sin embargo, es imperativo apuntar en una dirección sustentable y descarbonizada, no sólo por las implicaciones ecológicas, sino por la relevancia tecno-económica que México debe buscar para generar mayor beneficio social.

El modelo propuesto se genera a partir de considerar un amplio espectro de tecnologías y sistemas energéticos para satisfacer y almacenar las necesidades de energía eléctrica en un modelo descentralizado. El enfoque descentralizado busca ofrecer a los usuarios individuales una alternativa energética, ya que en otras circunstancias se puede caer en deslindar la responsabilidad a instancias superiores como el gobierno para que exista un cambio. Además, brinda la oportunidad de implementar un sistema energético sustentable con una huella ambiental casi nula que no depende de factores económicos externos como el precio de los combustibles.

Este análisis concluye que el modelo tiene factibilidad técnica al integrar sistemas fotovoltaicos y almacenamiento de energía a partir del hidrógeno como vector energético en el sector residencial. Esta factibilidad consiste en las dimensiones de equipo y área necesaria para llevarse a cabo en el sector residencial. Las tecnologías existen y han estado en una etapa comercial por varios años o décadas, sin embargo, es fundamental que puedan ser implementadas dentro del contexto del sector.

En ninguno de los escenarios analizados se exceden 12 m² de superficie fotovoltaica ni 2 kWp de capacidad instalada de ningún sistema. Estos resultados indican factibilidad para usuarios de consumo básico, ya que, el dimensionamiento es congruente con el sector residencial. Por otro lado, el hidrógeno obtenido por medio de electrólisis de agua presenta viabilidad como almacén energético en el sector. El hidrógeno ha sido considerado durante décadas como una solución viable para frenar el impacto ambiental de los combustibles fósiles, pero la realidad es que una economía del hidrógeno todavía es distante. No obstante, en esta propuesta el hidrógeno es una respuesta viable debido a que el sector permite descartar grandes retos de la cadena de valor del hidrógeno; transporte y almacenamiento a gran escala.

El análisis de factibilidad económico igualmente es positivo, aunque no tan optimista como el análisis técnico. Actualmente, algunas de las tecnologías utilizadas son relativamente nuevas y las bajas escalas propias del sector residencial hacen que los costos de inversión sean altos, en comparación a otras opciones. El costo de implementación en valor presente oscila entre 20 mil y 90 mil pesos por usuario y un retorno de inversión entre 12 y 13 años, siendo una inversión considerable para los usuarios. Es importante recalcar que los medios convencionales de abastecimiento energético han sido desarrollados, junto con su infraestructura, por más de un siglo lo que ha permitido que su proliferación se traduzca en menores costos. A pesar de esto, las tecnologías de sustentabilidad energética han mostrado en los últimos años un gran decremento en sus costos y mejoramiento en sus eficiencias energéticas, como ninguna otra.

El alcance de este análisis deja un precedente para estudios posteriores sobre diferentes factores que permitan generar aún mejores resultados y que contribuyan a la transición energética. Algunos de los temas de desarrollo identificados por esta propuesta consisten tanto en factores técnicos como económicos. Es fundamental buscar sistemas cogeneración que aprovechen el calor generado como pérdida energética, sobre todo en las celdas de combustible. Estos sistemas de cogeneración pueden aportar una parte de los requerimientos calóricos del sector residencial.

Aunque existen modelos similares ya implementados en Europa, principalmente, es vital desarrollar pruebas pilotos en México para detallar los parámetros técnicos y económicos, en particular las eficiencias y el manejo asociados al almacenamiento en sistemas LOHC. Además de estos temas técnicos, se deben desarrollar modelos de negocio que implementen estructuración financiera y fiscal, para permitir que el costo de la inversión sea menor y el retorno de inversión más corto. Actualmente existen diferentes incentivos fiscales por parte del gobierno para incentivar el desarrollo e implementación de tecnologías sustentables, como depreciación acelerada y exención de ISR. Finalmente, un análisis detallado de las regiones y sectores donde mayor impacto puede tener este sistema y similares. Ampliar la implementación en otros sectores como comercial, servicios y hotelero.

Anexo

Irradiación solar anual por Estado, kWh/m²

Estado	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
Ags	4.50	5.20	5.90	6.60	7.20	6.30	6.10	5.90	5.70	5.10	4.80	4.00
BC	4.15	4.50	5.15	5.90	6.55	7.20	6.70	6.20	6.25	5.30	4.60	3.80
BCS	4.70	5.55	5.90	6.25	6.70	6.35	6.05	6.20	5.85	5.80	5.05	4.30
Cam	4.80	5.70	6.00	5.30	5.40	4.90	4.90	5.30	5.20	5.40	5.00	4.30
Chih	5.03	5.70	6.00	6.20	6.30	6.07	6.03	6.20	6.43	6.43	5.83	5.17
Chis	4.54	4.82	4.86	4.86	4.98	4.76	5.26	5.14	4.66	4.46	4.36	4.08
Coah	3.45	3.90	4.50	4.80	5.20	5.95	6.30	5.95	5.05	4.25	3.45	3.10
Col	4.40	5.10	5.30	5.80	6.00	5.20	4.90	5.00	4.60	4.40	4.40	3.90
D.F.	5.40	6.00	6.40	5.90	5.30	5.10	4.50	4.90	4.50	4.80	5.20	5.20
Dgo	4.40	5.40	6.50	7.00	7.50	6.80	6.00	5.60	5.70	5.10	4.80	3.90
Gro	4.90	5.23	5.67	5.63	5.53	5.23	5.33	5.43	5.03	5.07	4.87	4.67
Gto	4.40	5.10	6.10	6.30	6.60	6.00	6.00	5.90	5.80	5.20	4.80	4.60
Hlgo	4.60	5.10	5.60	6.80	6.00	5.70	5.90	5.80	5.30	4.90	4.60	4.20
Jal	4.73	5.55	6.23	6.85	7.20	6.03	5.63	5.55	5.50	5.20	4.90	4.20
Méx	4.50	5.10	5.60	5.80	5.90	5.40	5.20	5.20	5.00	4.70	4.60	3.90
Mich	4.20	4.90	5.50	5.80	5.90	5.20	5.00	5.10	4.90	4.60	4.30	3.70
Nay	3.90	4.30	4.80	5.50	6.10	5.30	4.90	5.30	4.40	4.40	4.00	4.80
NL	3.20	3.60	4.10	4.30	4.80	5.50	6.10	5.60	5.00	3.80	3.30	3.00
Oax	5.15	6.00	6.20	5.95	6.05	5.20	5.75	5.75	5.10	5.40	5.25	4.80
Pue	4.90	5.50	6.20	6.40	6.10	5.70	5.80	5.80	5.20	5.00	4.70	4.40
Qr	3.90	4.65	5.35	5.70	5.25	4.75	4.90	4.95	4.55	4.40	4.00	3.75
Qro	5.00	5.70	6.40	6.80	6.90	6.40	6.40	6.40	6.30	5.40	5.00	4.40
Sin	4.13	4.80	5.33	5.67	5.90	5.87	5.17	5.17	5.13	5.13	4.53	3.87
SLP	3.95	4.65	5.20	5.65	5.85	5.85	6.10	5.90	5.30	4.50	3.95	3.50
Son	4.77	5.57	6.23	6.90	7.50	7.37	6.40	6.30	6.60	6.40	5.27	4.90
Tamps	3.35	4.15	4.80	5.65	5.05	5.10	5.15	5.15	4.75	4.60	3.70	3.20
Tlax	4.60	5.10	5.50	5.40	5.60	5.20	5.30	5.20	5.10	4.90	4.70	4.00
Ver	3.33	3.77	4.10	4.40	4.60	4.53	4.73	4.87	4.37	4.00	3.50	3.13
Yuc	3.83	4.33	4.37	5.37	5.57	5.30	5.47	5.40	4.97	4.47	4.00	3.63
Zac	4.90	5.70	6.60	7.50	7.80	6.20	6.20	5.90	5.40	4.80	4.80	4.10

Fuentes bibliográficas y referencias.

*Las páginas de internet fueron consultadas entre septiembre de 2018 y abril de 2019.

-
- i CFE, Costos de inversión y mantenimiento, COPAR 2013.
 - ii Jordan Hanania, Jason Donev, Energy Education, Chapter 9, Calgary University, 2019. (<https://energyeducation.ca/encyclopedia>)
 - iii Enerdata, Global Energy Statistical Yearbook 2018.
 - iv International Energy Agency, Key World Energy Statistics 2017.
 - v British Petroleum, BP Statistical Review of World Energy June 2018.
 - vi CENACE, Costo nivelado: costo de inversión y operación (en valor presente) de generación de electricidad durante la vida útil de la tecnología, 2015.
 - vii IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2017.
 - viii Our World in Data, World Population Growth, 2017. (<https://ourworldindata.org/world-population-growth>)
 - ix EPA, Overview of greenhouse gases, 2017. (<https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>)
 - x CDIAC, Carbon Dioxide Information Analysis Center, 2017. (<https://cdiac.ess-dive.lbl.gov>)
 - xi NASA, Global Climate Change, 2019. (<https://climate.nasa.gov>)
 - xii CIEP, Los ingresos petroleros del sector público en 2016 y 2017.
 - xiii Secretaria de energía, Prospectiva del sector eléctrico 2017-31.
 - xiv Secretaria de energía, Programa Quinquenal de Licitaciones para la Exploración y Extracción de Hidrocarburos 2015-2019, edición abril 2018.
 - xv Secretaria de energía, Prospectiva de petróleo crudo y petrolíferos 2017 – 2031.
 - xvi CNH, Reservas 2P y 3P al 1 de enero de 2018, edición mayo 2018.
 - xvii Chemistry, Chang, 10th edition, 2010.
 - xviii INFRA Air Products, Hoja de datos de seguridad (HDS) hidrógeno H₂ (gas), 1999.

-
- xix World Nuclear Association, Heat values of various fuels, 2018. (<http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx>)
- xx UNEP, The Hydrogen Economy, A non-technical review, 2006.
- xxi IRENA, Hydrogen from Renewable Power, septiembre 2018.
- xxii Fahad Suleman, Comparative Study of Various Hydrogen Production Methods for Vehicles, 2014.
- xxiii Ulf Bossel, Baldur Eliasson, Energy and the Hydrogen Economy, 2002.
- xxiv Zittel, Werner & Wurster, Reinhold & Bolkow, Advantages and Disadvantages of Hydrogen, 1994.
- xxv Markus Hurskainen & Janne Kärki, Liquid organic hydrogen carriers (LOHC) - Concept evaluation and techno-economics, 2018.
- xxvi Dr.Cueppers, Wikicommons, 2019 (https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_storage#/media/File:Perhydro-N-Carbazol.PNG)
- xxvii IEA Hydrogen, Global Outlook and Trends for Hydrogen 2017.
- xxviii Freedonia, World Hydrogen Industry Study with Forecasts for 2018 & 2023.
- xxix Oil Field Review, El hidrógeno: ¿Un futuro portador energético?, 2005.
- xxx Secretaria de energía, Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias, AZEL, 2018.
- xxxi Secretaria de energía, Prospectiva de Energías Renovables 2017 -2031.
- xxxii Smartbitt, Radiación solar, 2019. (<http://energiasolar.smartbitt.com/radiacion-solar/>)
- xxxiii Jorge Alarcón, Wikipedia, 2008. (https://es.wikipedia.org/wiki/Hora_solar_pico#/media/File:Horas_solares_pico.png)
- xxxiv TheNoise, Wikipedia, 2007. (https://es.wikipedia.org/wiki/Célula_fotoeléctrica#/media/File:Pn-junction-equilibrium-graphs.png)
- xxxv Secretaria de Economía, La industria solar fotovoltaica y fototérmica en México, 2017.

-
- xxxvi Secretaría de energía, Prospectiva del sector eléctrico 2018 – 2032.
- xxxvii Sistema de información energética, Ventas internas de energía eléctrica por sector tarifario, abril 2019.
- xxxviii CONUEE, Análisis de la evolución del consumo eléctrico del sector residencial entre 1982 y 2017 e impactos de ahorro de energía por políticas públicas, 2018.
- xxxix CFE, Contratación de servicios fotovoltaicos, 2019.
(<https://www.cfe.mx/Casa/InformacionCliente/Pages/Contratación-de-servicios-Fotovoltaicos.aspx>)
- xl Secretaría de energía, Prospectiva del sector eléctrico 2015 – 2029.
- xli US Department of Energy, Energy efficiency and renewable energy, 2019.
(<https://www.energy.gov/eere/education/energy-efficiency-and-renewable-energy-science-technology-and-policy-program>)
- xlii EIA, Cost and Performance Characteristics of New Generating Technologies, Annual Energy Outlook 2019.
- xliii CFE, Tarifa DAC 2019.
(<https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Tarifas/TarifaDAC.aspx>)