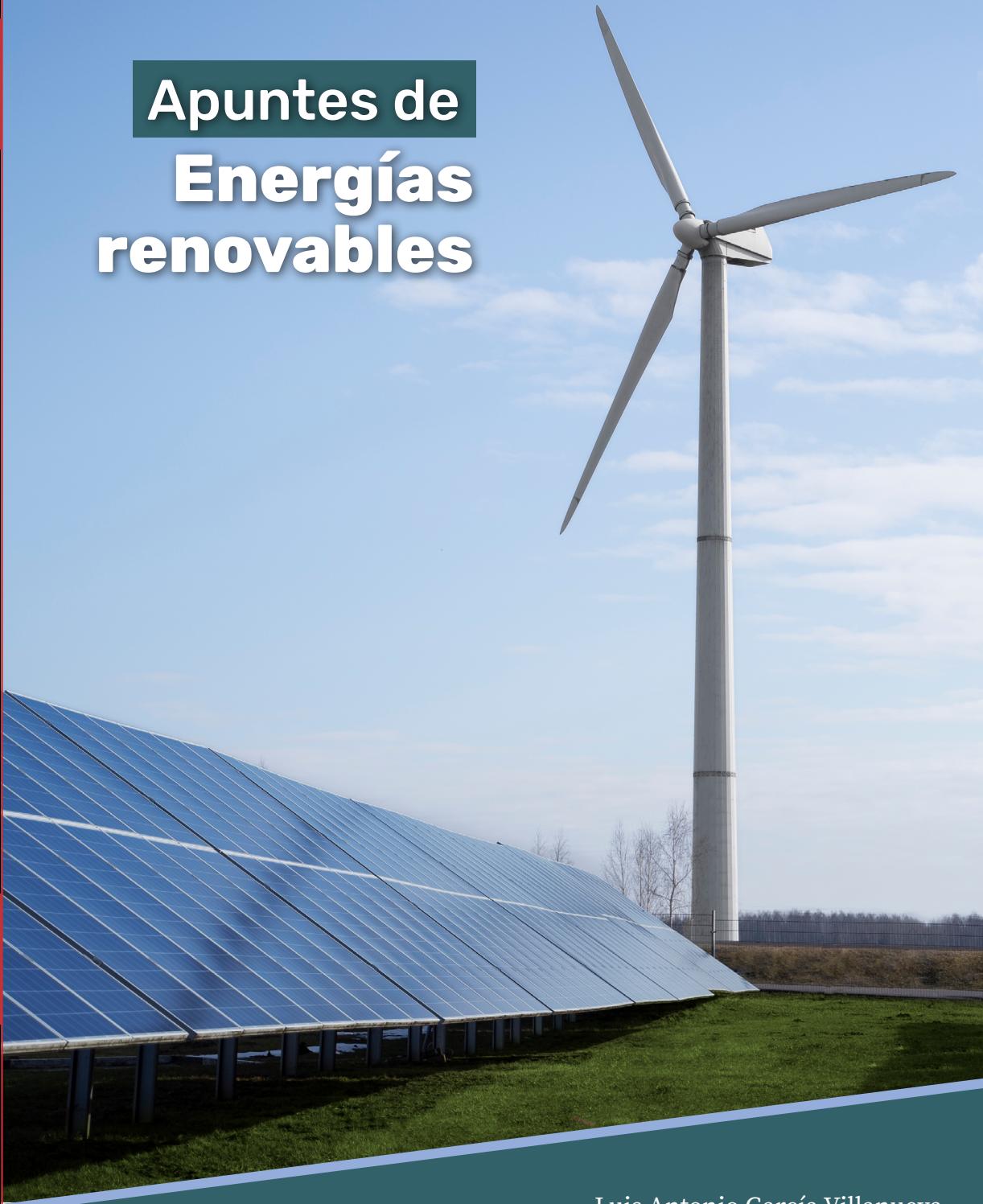




Apuntes de Energías renovables



Luis Antonio García Villanueva



Apuntes de Energías renovables

División de Ingenierías Civil y Geomática
Departamento De Ingeniería Sanitaria Y Ambiental

Luis Antonio García Villanueva, Griselda Berenice Cruz Hernández, Manuel Salvador Tovar Cardona, Diego Alejandro Archila Carias, Jorge Emiliano Alfaro Guillén, Dionisio Arturo Cabrera Rivas, Carlos Eduardo Citalán Figueroa, Óscar Omar Martínez Martínez, Gustavo Alejandro Méndez Moctezuma, Alan Humberto Moreno Hernández, Denise Michel Villarreal Hernández, Rodrigo Muñoz Sánchez, Fausta Ulalume Alvarado Durán

Universidad de Cantabria Santander, España
Camilo Estevan Peralta Hernández



Para visualizar la obra te sugerimos

Acrobat Reader
Haz Click

GARCÍA VILLANUEVA, Luis Antonio, et al.
Apuntes de Energías Renovables
Universidad Nacional Autónoma de México,
Facultad de Ingeniería, 2025, 206 p.
ISBN: 978-607-642-064-5

Apuntes de Energías Renovables

Primera edición electrónica
de un ejemplar (13 MB) en formato PDF
Publicado en línea en noviembre de 2025

D.R. © 2025, Universidad Nacional Autónoma de México,
Avenida Universidad 3000, Col. Universidad Nacional Autónoma de México,
Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, México, CDMX.

FACULTAD DE INGENIERÍA
<http://www.ingenieria.unam.mx/>

ISBN: 978-607-642-064-5

Esta edición y sus características son propiedad de la Universidad
Nacional Autónoma de México. Prohibida la reproducción
o transmisión total o parcial por cualquier medio
sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Hecho en México.

UNIDAD DE APOYO EDITORIAL

Diseño y formación editorial: Nismet Díaz Ferro
Cuidado de la edición: Patricia Eugenia García Naranjo

Fotografía de portada:
Planta de energía eólica y paneles solares de ángulo bajo, Freepik.

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

III

Contenido temático

| | |
|--|-----|
| Cambio climático | 1 |
| Calentamiento global | 3 |
| 1. Antecedentes de energía renovables..... | 7 |
| 1.1. Electricidad..... | 7 |
| 1.2. Energía | 9 |
| 1.3. Energía renovable, baja en carbono, y limpia | 11 |
| 1.4. Aspectos ambientales..... | 12 |
| 1.4.1. Tipos de energías renovables | 13 |
| 1.4.2. Ventajas de las energías renovables | 15 |
| 1.4.3. Desventajas de las energías renovables | 18 |
| 1.5. Aspectos políticos y normativos en México y el mundo..... | 21 |
| 2. Energía fotovoltaica | 31 |
| 2.1. Principio y funcionamiento de los paneles fotovoltaicos..... | 31 |
| 2.2. Clasificación de los sistemas fotovoltaicos | 33 |
| 2.3. Componentes de un sistema fotovoltaico | 34 |
| 2.4. Tarifas eléctricas residenciales en México | 39 |
| 2.5. Cálculo de un sistema interconectado residencial..... | 42 |
| 2.6. Ejercicios propuestos | 63 |
| 3. Energía Termosolar | 65 |
| 3.1. Fundamentos de la energía solar..... | 65 |
| 3.2. Clasificación de los sistemas termo solares | 71 |
| 3.3. Componentes de un sistema termo solar | 74 |
| 3.4. Dimensionamiento de un sistema residencial para ACS | 79 |
| 3.5. Aplicaciones no residenciales de la energía termo solar | 86 |
| 3.6. Introducción a la energía solar termoeléctrica..... | 89 |
| 3.7. Ejercicios propuestos | 92 |
| 3.8. Fuentes consultadas | 98 |
| 4. Energía Eólica | 102 |
| 4.1. Principio de funcionamiento de un aerogenerador | 103 |
| 4.2. Clasificación de aerogeneradores | 104 |
| 4.3. Evaluación del recurso eólico | 105 |
| 4.4. Parques eólicos terrestres y marinos | 110 |
| 4.5. Impacto ambiental | 111 |
| 5. Energía hidroeléctrica | 114 |
| 6. Energía de biomasa | 120 |
| 6.1. Materias primas | 122 |
| 6.2. Biomasa sólida | 123 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 6.2.1. | Astillas forestales | 124 |
| 6.2.2. | Gránulos o pellets | 125 |
| 6.2.3. | Carbón de madera | 125 |
| 6.3. | Biocombustibles | 126 |
| 6.3.1. | Biocombustibles líquidos | 127 |
| 6.3.2. | Biodiésel | 128 |
| 6.3.3. | Bioetanol | 130 |
| 6.4. | Biocombustibles gaseosos | 131 |
| 6.4.1. | Materia prima | 131 |
| 6.4.2. | Gasificación | 132 |
| 6.4.3. | Biogás | 134 |
| 6.4.4. | Biohidrógeno | 136 |
| 6.5. | Controversia sobre la neutralidad de carbono | 139 |
| 7. | Otras energías | 142 |
| 7.1. | Energía geotérmica | 142 |
| 7.1.1. | Introducción | 142 |
| 7.1.2. | Origen | 145 |
| 7.1.3. | Recursos Geotérmicos | 147 |
| 7.1.4. | Energía geotérmica en México | 148 |
| 7.1.5. | Sistemas termoeléctricos | 150 |
| 7.1.6. | Cuestionario de evaluación | 150 |
| 7.2. | Energía Nuclear | 150 |
| 7.2.1. | Generalidades de Energía Nuclear | 150 |
| 7.2.2. | Contribución de la Energía Nuclear a la Energía Renovable | 155 |
| 7.2.3. | Impacto Ambiental de la Energía Nuclear | 157 |
| 7.2.4. | Emisiones efecto invernadero | 158 |
| 7.2.5. | Fuentes de Radiación | 159 |
| 7.2.6. | Radiación y alteración molecular | 160 |
| 7.2.7. | Residuos radioactivos | 162 |
| 7.2.8. | Gestión de Residuos Nucleares | 162 |
| 7.2.9. | Impacto a Futuro | 169 |
| 7.3. | Energía mareomotriz | 172 |
| 8. | Almacenamiento de energía | 174 |
| 8.1. | Motivación y necesidad de almacenamiento | 174 |
| 8.2. | Parámetros de los sistemas de almacenamiento | 177 |
| 8.3. | Baterías | 178 |
| 8.4. | Plantas de rebombeo | 181 |
| 8.5. | Economía de hidrógeno | 184 |
| 8.6. | Otras tecnologías de almacenamiento | 186 |
| 9. | Aspectos económicos y financiamiento | 189 |
| 9.1. | Levelized Cost of Energy (Costo de apalancamiento de energía) | 190 |
| 10. | Sustentabilidad y certificación | 197 |
| 10.1. | Beneficios de las certificaciones | 197 |
| 10.2. | Estándares de edificación sustentable | 198 |
| 10.3. | Criterios y requerimientos ambientales mínimos | 199 |
| | Bibliografía Consultada | 201 |

Cambio climático

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

1

En la actualidad, la humanidad se enfrenta a desafíos cada vez mayores en relación con la energía y el medio ambiente. La alta dependencia de los combustibles fósiles ha tenido un impacto devastador en el medio ambiente. Para lograr la neutralidad de carbono y las metas de cero emisiones netas, se han llevado a cabo varias iniciativas internacionales, como la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP26) y el Acuerdo de París. Estas iniciativas tienen como objetivo principal limitar el aumento de la temperatura global a 1.5 grados Celsius en comparación con los niveles preindustriales y alcanzar el objetivo de emisiones netas cero para el año 2050 [1]. Por lo tanto, es fundamental comprender el origen de nuestras emisiones de gases de efecto invernadero para poder establecer estrategias efectivas destinadas a reducir estas emisiones mediante la implementación de tecnologías de baja emisión de carbono. En el 2016, a nivel global, las emisiones de gases de efecto invernadero tuvieron su origen principalmente en la generación de energía (para fines industriales, transporte, edificaciones, entre otros), contribuyendo en un 73.2 % del total (figura 1). La industria (incluyendo la producción química y de cemento) aportó un 5.2 % de estas emisiones, mientras que los desechos (como vertederos y aguas residuales) representaron el 3.2 %. Por su parte, la agricultura y el uso de la tierra contribuyeron en un 18.4 % al total de las emisiones de CO₂ [2].

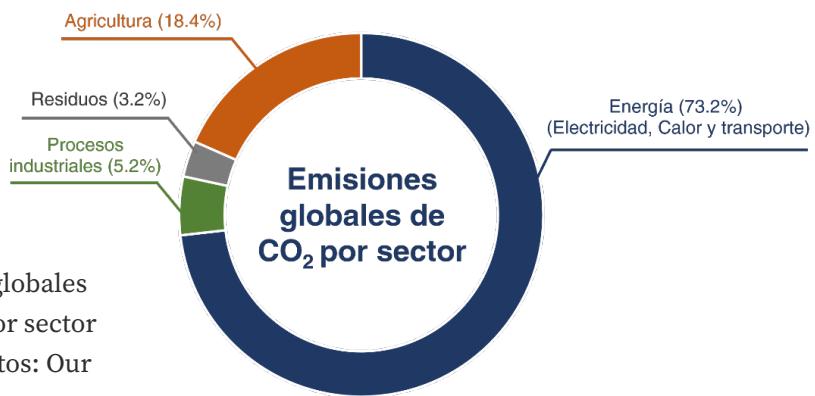


Figura 1. Emisiones globales de CO₂ equivalente por sector en 2020. Fuente de datos: Our World in Data [2]

Si nos enfocamos en el ámbito energético, que constituye la principal fuente de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera, podemos examinar las fuentes de producción de energía más significativas para evaluar el progreso en la implementación de las tecnologías requeridas para alcanzar los objetivos climáticos. En el año 2022, el consumo global de energía alcanzó los 604.04 exajulios (EJ), y más del 80 % de esta energía provino de la quema de combustibles fósiles [3]. La figura 2 representa el consumo mundial de energía en el año 2020, dividido según sus diferentes fuentes. A primera vista, se puede evidenciar la fuerte dependencia a nivel global de las fuentes de energía convencionales, como el petróleo, el gas y el carbón, las cuales representaron la mayor parte del consumo total de energía (un 82 %), destinadas a cubrir las necesidades energéticas. Por otro lado, las fuentes de energía renovable, incluyendo la energía hidroeléctrica, solo representaron el 13.3 % y la energía nuclear contribuyó con el 4 % del consumo total.

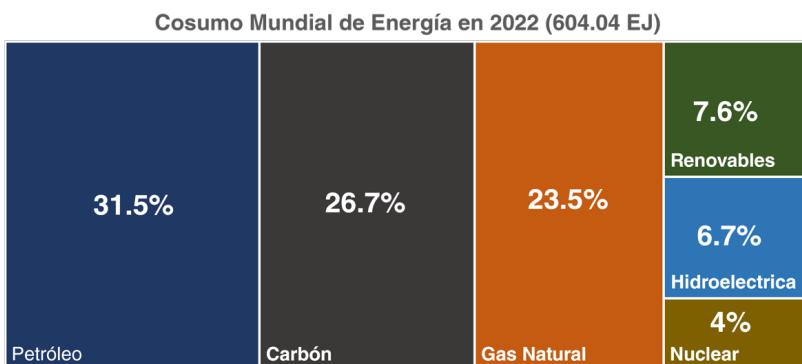


Figura 2. Consumo mundial de energía en 2020 (604.04 EJ). Fuente de datos: 2023 Statistical Review of World Energy [3]

De este modo, la implementación de las energías renovables para sustituir los combustibles fósiles emerge como una prometedora solución para descarbonizar la economía y contribuir alcanzar los objetivos climáticos. Las energías renovables se definen como aquellas fuentes de energía que se obtienen de fuentes naturales (e.g., sol, viento, agua y biomasa) y pueden ser constantemente reemplazadas [4]. A diferencia de los combustibles fósiles, estas fuentes de energía no producen emisiones de gases de efecto invernadero ni contaminantes que contribuyen al cambio climático y a la mala calidad del aire. No obstante, la transición a las energías renovables trae enormes desafíos ya que requiere de inversión, investigación y de política pública para promover su adopción a gran escala.

Calentamiento global

Los cambios en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera son mayormente atribuibles a la quema de combustibles fósiles. En este proceso se liberan grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2) gas de efecto invernadero que promueve el calentamiento global. De acuerdo con la NASA, la radiación solar que entra en contacto con la tierra enfrenta un proceso complejo de interacciones. Un 29.3 % de esta radiación es devuelta al espacio por la superficie, la atmósfera y las nubes, mientras que un 22.6 % es absorbido por la atmósfera misma, y un porcentaje mayor, el 48 %, es capturado por la superficie terrestre. Parte de la radiación infrarroja, liberada desde la superficie terrestre, es absorbida y redirigida de vuelta hacia la misma superficie por los gases de efecto invernadero, este proceso se conoce como efecto invernadero (figura 3). Por lo tanto, a mayor concentración de gases de efecto invernadero, mayor será el calentamiento global.

Figura 3. Efecto invernadero. Fuente: Elaboración propia



A lo largo de los años, las variaciones en el clima se han explicado mediante los ciclos de Milankovitch. El científico serbio Milutin Milankovitch planteó la hipótesis de que los efectos a largo plazo de los cambios en la posición de la Tierra con respecto al Sol son un factor determinante en el clima y son responsables de iniciar y finalizar los períodos de glaciación (Alan Buis, 2020). Los ciclos de Milankovitch son: precesión, oblicuidad y cambios en excentricidad (figura 4).

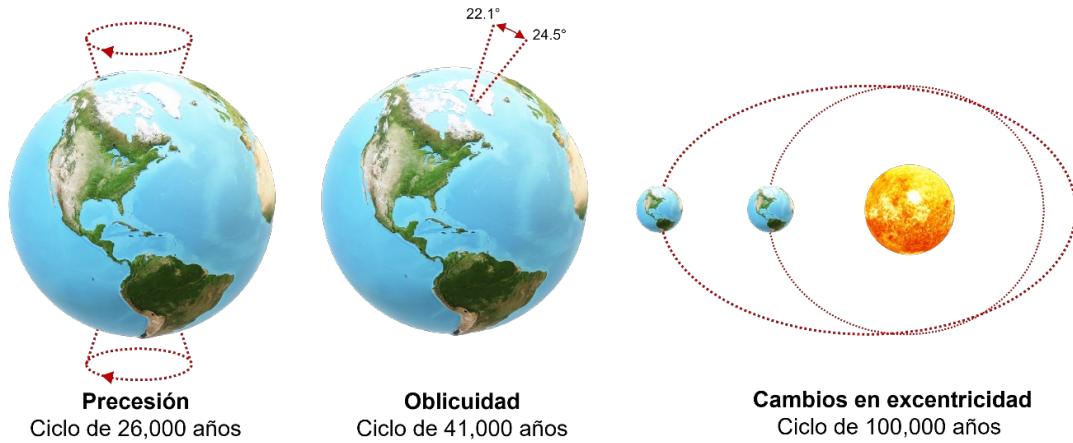


Figura 4. Ciclos de Milankovitch

La precesión es un cambio gradual en la dirección del eje de rotación de la Tierra. Este ciclo tiene un período de alrededor de 26 000 años y afecta la época en que ocurren las estaciones. Por otra parte, la oblicuidad se refiere a los cambios en la inclinación del eje de rotación de la Tierra y varía de los 22.1° a los 24.5° en un periodo de 41 000 años. Finalmente, los cambios en la excentricidad orbital describen cómo la forma de la órbita de la Tierra alrededor del sol cambia de una elipse a un círculo y viceversa en un periodo de 100,000 años. Estos ciclos explican las variaciones del clima a lo largo de millones de años. Sin embargo, no pueden dar cuenta del actual período de rápido calentamiento que la Tierra ha experimentado desde el período preindustrial (el período entre 1850 y 1900), especialmente desde mediados del siglo XX [6]. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) estableció que: "La mayor parte del aumento observado en las temperaturas medias globales desde mediados del siglo XX se debe,

probablemente, al aumento observado en las concentraciones de gases de efecto invernadero de origen antropogénico” (Pachauri et al., 2007). Desde el siglo XIX, la cantidad de emisiones de dióxido de carbono antropogénicas (i.e., por la actividad humana) experimentó un incremento drástico que ha continuado hasta nuestros días. La figura 5 muestra una clara tendencia del aumento en la concentración de **CO₂** en la atmósfera terrestre desde la Revolución Industrial (1760). También se puede evidenciar que antes de la era industrial, nunca se habían alcanzado concentraciones de dióxido de carbono superiores a las 300 ppm.

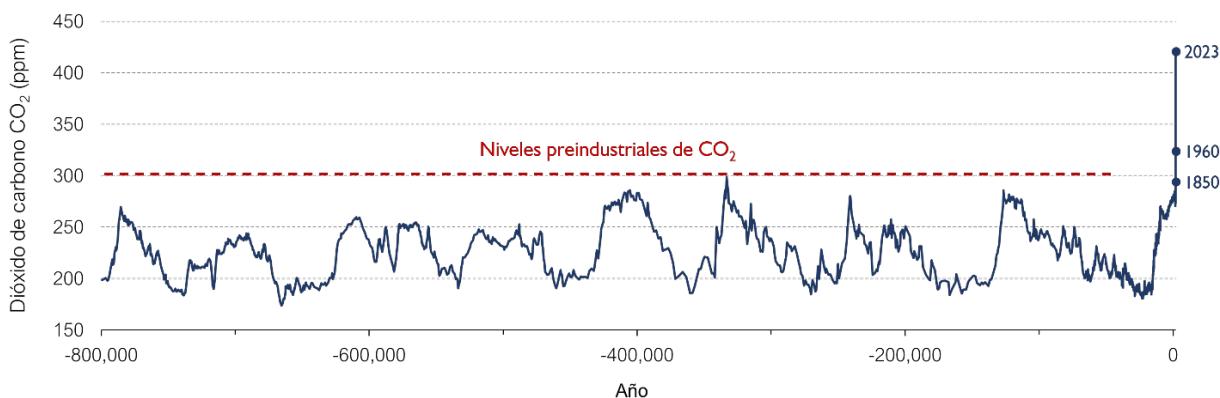


Figura 5. Emisiones de CO₂ antropogénicas. Fuente de datos: NOAA

Las emisiones antropogénicas de **CO₂** provienen principalmente de la generación de energía, el transporte, fuentes industriales, producción química, extracción de petróleo y prácticas agrícolas. De esta manera, la quema de combustibles fósiles actúa como catalizador en la elevación de los niveles de **CO₂**, impulsando un incremento en los gases de efecto invernadero que, a su vez, incrementa la temperatura global (figura 6).

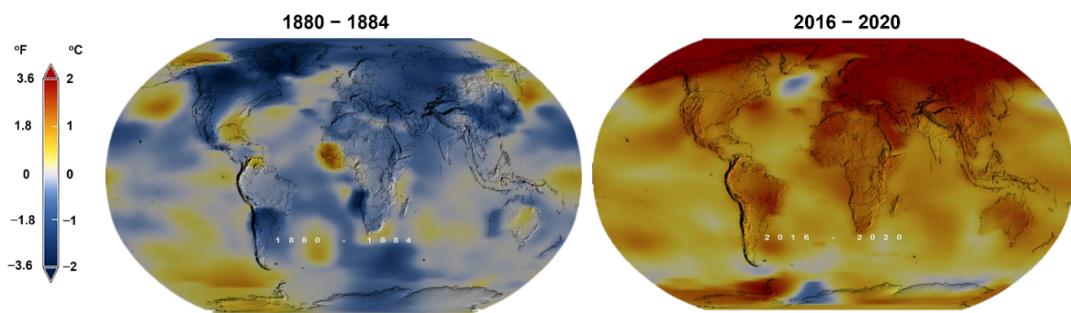


Figura 6. Anomalías en la temperatura. Fuente: NASA's Scientific Visualization Studio

Este efecto de calentamiento es necesario para mantener una temperatura habitable en la tierra, pero en exceso puede causar graves consecuencias, por ejemplo, el cambio climático.

1. Antecedentes de energías renovables

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

7

1.1 Electricidad

La electricidad es una fuerza omnipresente en nuestra vida cotidiana. Desde iluminar nuestras casas hasta impulsar dispositivos electrónicos y alimentar la industria, la electricidad juega un papel fundamental en nuestro mundo moderno. Pero ¿alguna vez te has preguntado qué es exactamente la electricidad y cómo se produce?

La electricidad es una forma de energía que se deriva de la interacción de partículas subatómicas cargadas, especialmente electrones. Estas partículas cargadas pueden moverse a lo largo de un conductor, como un cable metálico, creando un flujo de carga eléctrica conocido como corriente eléctrica.

La electricidad se origina en la mayoría de los casos debido a la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, lo que genera un flujo de electrones desde el punto de mayor potencial eléctrico (positivo) hacia el punto de menor potencial eléctrico (negativo). Este flujo de electrones es lo que constituye la corriente eléctrica, la cual permite que la electricidad sea aprovechada para realizar una amplia variedad de tareas y funciones, como iluminación, generación de calor, funcionamiento de dispositivos electrónicos y motores, entre otros.

En resumen, la electricidad es una forma de energía que se manifiesta mediante el movimiento de electrones cargados en un circuito eléctrico. Es una

parte esencial de nuestra vida moderna y tiene una amplia gama de aplicaciones en tecnología, industria, comunicaciones y muchas otras áreas.

La electricidad se produce de diversas maneras que se pueden agrupar en seis categorías principales:

Electricidad producida por fricción: Este método, descubierto por los griegos, implica frotar ciertos materiales juntos, como seda y vidrio, lo que provoca la transferencia de electrones y crea cargas eléctricas estáticas. Por ejemplo, caminar sobre una alfombra y tocar una perilla metálica puede generar una descarga eléctrica debido a la electricidad estática.

Electricidad producida por reacciones químicas: Algunas sustancias químicas pueden interactuar con ciertos metales y provocar una transferencia de electrones, como en el funcionamiento de una batería. Este proceso se basa en la electroquímica y se ilustra en una pila húmeda básica.

Electricidad producida por presión: Cuando se aplica presión a ciertos materiales, los electrones se desalojan de sus órbitas y se acumulan en un lado del material, creando cargas positivas y negativas. Este fenómeno se conoce como piezoelectricidad y se usa en aplicaciones como micrófonos y pastillas de fonógrafo.

Electricidad producida por calor: Algunos metales liberan electrones cuando se ponen en contacto con otros materiales, especialmente a temperaturas normales. Por ejemplo, el cobre y el zinc pueden generar electricidad mediante el efecto termoeléctrico. Cuanto más calor se aplique, mayor será la carga eléctrica.

Electricidad producida por luz: La luz, compuesta por fotones, puede liberar electrones de ciertos materiales al incidir sobre ellos, un fenómeno conocido como efecto fotoeléctrico. Esto se utiliza en aplicaciones como la fotoemisión, la fotovoltaica y la fotoconducción.

Electricidad producida por magnetismo: Los imanes generan campos magnéticos que pueden desplazar electrones en materiales conductores, dando lugar a la magnetoelectricidad. Este proceso se utiliza en generadores eléctricos.

La corriente eléctrica es esencial para aprovechar la electricidad y así realizar trabajo útil. Se produce cuando en un conductor hay una gran cantidad de electrones libres que se mueven en la misma dirección. Cuantos más electrones se muevan en esta dirección, mayor será la corriente y, por lo tanto, la cantidad de energía disponible para realizar trabajo. La corriente eléctrica es esencial para alimentar dispositivos y realizar diversas funciones eléctricas.

1.2 Energía

El concepto de energía es fundamental en la comprensión de la física y el funcionamiento del mundo. La palabra “energía” encuentra sus raíces en el griego antiguo, donde “en” significa “dentro de” y “ergon” se traduce como “trabajo”.

En un contexto científico, la energía se convierte en una herramienta poderosa para analizar una amplia gama de procesos, desde la quema de combustibles hasta el funcionamiento de máquinas de propulsión y la carga de baterías.

Las diversas formas de energía son fundamentales en la descripción y comprensión de cómo funciona el universo. Algunas de estas formas incluyen la energía térmica, que se refiere al calor generado o transferido entre objetos; la energía química, presente en sustancias como combustibles o baterías; la energía cinética, asociada con el movimiento de objetos; la energía eléctrica, que impulsa la mayoría de los dispositivos electrónicos; y la energía potencial gravitacional, que se relaciona con la posición de los objetos en un campo gravitatorio.

La estandarización de las unidades de medida a nivel internacional llevó a la creación del Sistema Internacional de Unidades (SI), que se basa en unidades fundamentales como el metro (m) para longitud, el kilogramo (kg) para masa y el segundo (s) para tiempo. A partir de estas unidades básicas, se derivan otras unidades que son esenciales en la medición de la energía y el trabajo.

Por ejemplo, la fuerza, medida en newtons (N), se define como la cantidad necesaria para acelerar una masa de un kilogramo a una velocidad de un metro por segundo al cuadrado (m/s^2). La energía se mide en julios (J) y representa la capacidad de realizar trabajo. Un julio es la energía suministrada por una fuerza de un newton al mover un objeto a través de una distancia de un metro. Por lo tanto, la energía se puede calcular como el producto de la fuerza y la distancia.

La potencia, medida en vatios (W), se refiere a la velocidad a la que se convierte la energía de una forma a otra o se transfiere de un lugar a otro. Un vatio se define como un julio por segundo, y se utiliza para cuantificar la cantidad de energía consumida o producida por una máquina o dispositivo en un período de tiempo específico.

Un aspecto fundamental en la comprensión de la energía es la conservación de esta, como lo establece la primera ley de la termodinámica. Según este principio, la cantidad total de energía en un sistema aislado siempre se mantiene constante, aunque puede cambiar de una forma a otra. Esto significa que la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma.

En última instancia, la diversidad de formas de energía y su capacidad para convertirse y transferirse de una forma a otra son conceptos esenciales en la física y la ingeniería, y desempeñan un papel crucial en la tecnología y la vida cotidiana.

1.3 Energía renovable, baja en carbono, y limpia

En un contexto formal, la energía se define como la capacidad que tiene un sistema para realizar un trabajo, y su papel en la sociedad moderna es innegable. Sin embargo, cuando se explora la diversidad de fuentes energéticas disponibles en el planeta, surge una distinción crucial entre dos categorías principales: la energía renovable y la no renovable.

La energía renovable se distingue por su carácter sostenible y la capacidad de aprovecharse de manera prácticamente ilimitada. Una de las fuentes más destacadas de energía renovable es el Sol. La radiación solar que llega a la Tierra se convierte en una variedad de efectos que son esenciales como recursos energéticos. Entre estos, destacan la energía eólica, generada por el viento; la energía de la biomasa, que proviene de organismos vegetales y animales; la energía hidráulica, que se obtiene del movimiento del agua en ríos y corrientes; la diferencia de temperaturas en los océanos; y la energía de las olas del mar. Todas ellas son fuentes de energía renovable de gran importancia.

Por otro lado, las fuentes de energía no renovable son aquellas que se encuentran almacenadas en cantidades finitas, generalmente en el subsuelo, y se agotan a medida que se consumen. Ejemplos notables de fuentes de energía no renovable incluyen el petróleo, el gas natural, el carbón mineral y el uranio. La disponibilidad de estas fuentes depende de la viabilidad técnica y económica de su explotación, así como del descubrimiento de nuevos yacimientos y del ritmo de extracción y consumo.

La elección entre fuentes de energía renovable y no renovable se ha convertido en un tema crítico en la búsqueda de un futuro más sostenible y respetuoso con el medio ambiente. La transición hacia fuentes de energía renovable desempeña un papel fundamental en la lucha contra el agotamiento de recursos no renovables y en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que promueve un mundo más limpio y equilibrado para las generaciones futuras.

1.4 Aspectos ambientales

La energía renovable se define como la energía obtenida de fuentes que se renuevan continuamente en el entorno natural, según lo establecido por Twidell y Weir en 1986, o como flujos de energía que se reponen al mismo ritmo que son “usados”, según la perspectiva de Sorenson en 2000.

En el contexto de las fuentes de energía renovable en la Tierra, es evidente que la radiación solar juega un papel fundamental. Aproximadamente el 30% de los 5.4 millones de julios por metro cuadrado al año que llegan a la Tierra se refleja nuevamente en el espacio. El 70% restante está disponible para su uso en el planeta, lo que equivale a aproximadamente 3.8 millones de exajulios (EJ), más de 8200 veces la tasa de consumo de combustibles fósiles y nucleares en 2009, que fue de alrededor de 462 EJ. Si se incluyen los biocombustibles y la energía hidroeléctrica, el consumo total de energía en el mundo alcanza los 502 EJ, como se mencionó anteriormente. Además de la radiación solar, existen dos fuentes no solares y renovables de energía: el movimiento de las mareas oceánicas y el calor geotérmico del interior de la Tierra, que se manifiesta en forma de convección en volcanes y aguas termales, así como en forma de conducción en rocas.

Las fuentes de energía renovable se caracterizan por ser de origen natural y, en principio, pueden emplearse de manera ilimitada debido a dos razones fundamentales. En primer lugar, su suministro es abundante, como en el caso del sol, y prácticamente inagotable. En segundo lugar, las materias primas que alimentan estas energías, como la biomasa, pueden renovarse. Esto se traduce en un bajo impacto ambiental, lo que las convierte en una opción esencial para abordar el cambio climático y proteger el entorno.

Resulta paradójico que, hasta hace apenas un siglo, el 90 % de la energía consumida por la humanidad proviniera de fuentes renovables. En esa época, la madera era la fuente energética principal, entre otras fuentes energéticas renovables y limpias que aún se utilizan en muchos países. Estas incluyen el viento, que impulsaba barcos de vela y corrientes de ríos que se empleaban

para el transporte. Los molinos de viento eran esenciales para producir harina a partir de cereales o aceite de aceitunas.

Sin embargo, la llegada de los combustibles fósiles, como el petróleo, el carbón y el gas, cambió el panorama. Estos recursos permitieron un funcionamiento constante de barcos, transporte terrestre, industrias y sistemas de calefacción, independientemente de las condiciones climáticas. Lo que no se sabía en ese entonces era que su uso se generalizaría de tal manera que se presentarían problemas de escasez de combustibles y graves problemas ambientales relacionados con sus residuos.

Actualmente, se encuentra el desafío de sustituir gradualmente los combustibles fósiles por fuentes de energía renovable para mitigar el cambio climático y garantizar un futuro sostenible. Por esta razón, resulta crucial aprovechar la tecnología y la innovación para desarrollar sistemas de energía renovable más eficientes y accesibles, con el objetivo de preservar el planeta y sus recursos naturales para las generaciones futuras.

1.4.1 Tipos de energías renovables

a) Energía Solar

La energía solar es la base de todas las demás fuentes de energía renovable. Se refiere a la energía obtenida de la radiación solar, que es interceptada por la Tierra. Esta radiación es esencial para la vida en el planeta, y se estima que el sol seguirá suministrando energía durante aproximadamente 5000 millones de años. La energía solar se utiliza principalmente en forma de energía fotovoltaica para producir electricidad, así como para calentar agua y climatizar edificios.

b) Energía Eólica

La energía eólica se deriva del viento, que a su vez es una consecuencia del calentamiento solar. Se utiliza principalmente para la generación de electricidad a través de modernos molinos de viento en parques eólicos. También se pueden instalar pequeños molinos eólicos en casas, granjas y edificios

aislados para generar electricidad. Esta energía es una manifestación de la energía cinética del viento y ha sido aprovechada históricamente en la navegación y la molienda de granos.

c) Biomasa

La biomasa es una fuente de energía que proviene de la materia orgánica y puede liberarse a través de diversos procesos como la combustión, la fermentación y la rotura celular. Durante siglos, la madera fue la principal fuente de energía basada en biomasa. Actualmente, se fomenta el uso de biomasa vegetal, semillas como el girasol y desechos orgánicos para producir energía en forma de biodiesel, biogás y bioetanol.

d) Energía Geotérmica

La energía geotérmica se aprovecha de la energía almacenada en la corteza terrestre. Se utiliza para climatizar viviendas, edificios y conservar alimentos, entre otras aplicaciones. Esta fuente de energía se basa en la transferencia de calor desde el interior de la Tierra a la superficie y se manifiesta en forma de convección en volcanes y aguas termales, así como en conducción en rocas.

e) Energía Hidráulica

La energía hidráulica se obtiene a partir de caídas de agua, ya sean naturales o artificiales. Se utiliza ampliamente en todo el mundo para la generación de electricidad y es la responsable del 90 % de la electricidad de origen limpio. Esta energía es el resultado del ciclo hidrológico impulsado en última instancia por el sol.

f) Energía de las Mareas

Este tipo de energía se genera aprovechando las variaciones de altura de las mareas en regiones costeras con mareas especialmente altas y bajas. Se pueden construir represas costeras para generar electricidad a partir de la gran cantidad de agua movida por las mareas. Esta fuente de energía se debe principalmente a la atracción gravitacional de la Luna y el Sol.

g) Energía de las Olas

La energía de las olas se obtiene aprovechando el movimiento de las olas del mar. Al igual que la energía de las mareas, se deriva en última instancia de la energía solar, ya que las olas son generadas por el efecto del viento sobre el agua. Aunque es una fuente conocida, aún se están desarrollando técnicas para su mejor aprovechamiento.

h) Hidrógeno

El hidrógeno se considera una fuente de energía interesante y versátil. Se están desarrollando tecnologías, como las pilas de combustible, para su aprovechamiento en diversas aplicaciones energéticas. El hidrógeno puede ser producido a partir de diversas fuentes, incluyendo la electrólisis del agua, y tiene un alto potencial como vector energético.

i) Procesos Atómicos de Fusión

Los procesos atómicos de fusión representan una tecnología en estudio que podría liberar una gran cantidad de energía al fusionar átomos de hidrógeno. A diferencia de las centrales nucleares actuales, la fusión nuclear no genera residuos radiactivos peligrosos. Aunque aún está en desarrollo, tiene el potencial de ser una fuente de energía limpia en el futuro.

Estas fuentes de energía renovable representan un enfoque fundamental para abordar los desafíos actuales de la energía y el cambio climático, además de que tienen un papel crucial en la transición hacia un futuro más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

1.4.2 Ventajas de las energías renovables

Energía Solar:

- ➔ **Renovable e inagotable:** La energía solar se basa en la radiación solar, que es una fuente de energía prácticamente inagotable y disponible de manera constante.

- ➔ **Bajo impacto ambiental:** La generación de energía solar no produce emisiones de gases de efecto invernadero ni contaminantes atmosféricos, lo que contribuye a la reducción del cambio climático.
- ➔ **Bajo costo de mantenimiento:** Los sistemas solares requieren un mantenimiento mínimo y tienen una vida útil larga, lo que reduce los costos a largo plazo.
- ➔ **Generación distribuida:** Puede ser utilizada de manera descentralizada, lo que aumenta la resiliencia del sistema energético y reduce la dependencia de grandes centrales eléctricas.

Energía Eólica:

- ➔ **Renovable y abundante:** La energía eólica se basa en el viento, que es una fuente de energía renovable y ampliamente disponible en muchas regiones del mundo.
- ➔ **Cero emisiones directas:** La generación de energía eólica no produce emisiones de gases de efecto invernadero ni contaminantes atmosféricos.
- ➔ **Espacio eficiente:** Los parques eólicos pueden ubicarse en tierras que no son aptas para otros usos, lo que no compite con la agricultura u otros fines.
- ➔ **Bajo costo de operación:** Una vez construidas, las turbinas eólicas tienen costos operativos relativamente bajos.

Biomasa:

- ➔ **Utilización de residuos:** La biomasa puede aprovechar residuos orgánicos como madera, residuos agrícolas y desechos alimentarios, lo que reduce la necesidad de eliminar estos materiales de manera costosa.
- ➔ **Energía local:** Promueve la producción de energía a nivel local y regional, lo que puede estimular la economía local.
- ➔ **Baja huella de carbono:** La biomasa puede ser neutra en carbono si se gestiona adecuadamente y se planta más biomasa de la que se consume.

Energía Geotérmica:

- ➔ **Constante y confiable:** La energía geotérmica es una fuente de energía constante y predecible, independientemente de las condiciones climáticas.
- ➔ **Bajo impacto ambiental:** Produce bajas emisiones de gases de efecto invernadero y no requiere grandes infraestructuras en la superficie.
- ➔ **Eficiencia energética:** Tiene una alta eficiencia energética y puede utilizarse para calefacción y refrigeración directamente en edificios.

Energía Hidráulica:

- ➔ **Alta capacidad de generación:** La energía hidráulica puede generar grandes cantidades de electricidad de manera constante y confiable.
- ➔ **Almacenamiento de energía:** Las presas hidroeléctricas pueden utilizarse para almacenar energía y liberarla cuando sea necesario, lo que contribuye a la estabilidad del suministro eléctrico.
- ➔ **Cero emisiones directas:** No produce emisiones de gases de efecto invernadero durante la generación de electricidad.

Energía de las Mareas:

- ➔ **Predecible y constante:** Las mareas son predecibles y constantes, lo que facilita la generación de energía de manera confiable.
- ➔ **Bajo impacto ambiental:** Las instalaciones de energía de las mareas tienen un impacto ambiental limitado en comparación con otras formas de generación de energía.
- ➔ **Baja huella de carbono:** La generación de energía de las mareas es una fuente de energía con bajas emisiones de carbono.

Energía de las Olas:

- ➔ **Renovable y constante:** Las olas del mar son una fuente de energía renovable y constante, ya que están impulsadas por el viento y las corrientes oceánicas.

- ➔ **Potencial de generación eléctrica significativo:** Las olas tienen un gran potencial para generar electricidad en regiones costeras.
- ➔ **Bajo impacto ambiental:** La generación de energía de las olas tiene un impacto ambiental relativamente bajo en comparación con algunas otras fuentes de energía.

Hidrógeno:

- ➔ **Alta densidad energética:** El hidrógeno tiene una alta densidad energética y puede ser utilizado como una fuente versátil de energía.
- ➔ **Almacenamiento y transporte:** Puede utilizarse para almacenar y transportar energía de manera eficiente.
- ➔ **Cero emisiones directas:** Cuando se produce a partir de fuentes de energía limpias, como la energía solar o eólica, el hidrógeno no produce emisiones directas de gases de efecto invernadero.

Procesos Atómicos de Fusión:

- ➔ **Enorme potencial energético:** La fusión nuclear tiene el potencial de liberar una cantidad masiva de energía a partir de una pequeña cantidad de combustible de hidrógeno.
- ➔ **Bajo riesgo de radiactividad:** A diferencia de la fisión nuclear, la fusión nuclear no genera residuos radiactivos peligrosos.
- ➔ **Fuente segura:** La fusión nuclear es intrínsecamente segura y no tiene el riesgo de fusiones descontroladas como en la fisión nuclear.

1.4.3 Desventajas de las energías renovables

Energía Solar:

- ➔ **Intermitencia:** La generación de energía solar depende de la disponibilidad de luz solar, lo que hace que sea intermitente y variable, afectada por el clima y la ubicación geográfica.

- ➔ **Necesidad de espacio:** Los paneles solares requieren grandes áreas de terreno o techos para generar cantidades significativas de electricidad.
- ➔ **Almacenamiento costoso:** Para superar la intermitencia, se necesitan sistemas de almacenamiento de energía, como baterías, que pueden ser costosos.

Energía Eólica:

- ➔ **Dependencia del viento:** La generación de energía eólica depende de la velocidad y la consistencia del viento, lo que puede hacer que la producción de energía sea irregular.
- ➔ **Impacto visual y ambiental:** Los parques eólicos pueden tener un impacto visual y ambiental en el paisaje y la vida silvestre locales.
- ➔ **Ruido y vibraciones:** Las turbinas eólicas pueden generar ruido y vibraciones que pueden ser molestos para las comunidades cercanas.

Biomasa:

- ➔ **Emisiones de carbono:** La quema de biomasa puede liberar emisiones de carbono y contaminantes atmosféricos si no se maneja adecuadamente.
- ➔ **Competencia con alimentos:** En algunos casos, la producción de biocombustibles a partir de cultivos puede competir con la producción de alimentos.
- ➔ **Necesidad de recursos:** Requiere recursos agrícolas y forestales, lo que puede ser limitante en términos de disponibilidad y sostenibilidad.

Energía Geotérmica:

- ➔ **Ubicación geográfica limitada:** La energía geotérmica solo es viable en regiones con actividad geotérmica, lo que limita su disponibilidad geográfica.
- ➔ **Costos iniciales altos:** La perforación y la construcción de instalaciones geotérmicas pueden ser costosas.

- ➔ **Agotamiento localizado:** En algunos casos, el uso excesivo de recursos geotérmicos puede agotar la fuente de calor en una ubicación específica.

Energía Hidráulica:

- ➔ **Impacto ambiental:** La construcción de represas hidroeléctricas puede tener un impacto significativo en los ecosistemas fluviales y la vida acuática.
- ➔ **Desplazamiento de comunidades:** En algunos casos, la construcción de represas ha requerido el desplazamiento de comunidades locales.
- ➔ **Dependencia de recursos hídricos:** La generación de energía hidroeléctrica depende de la disponibilidad de recursos hídricos, lo que puede ser un problema en épocas de sequía.

Energía de las Mareas:

- ➔ **Ubicación geográfica limitada:** La generación de energía de las mareas sólo es viable en regiones con mareas significativas, lo que limita su disponibilidad.
- ➔ **Impacto ambiental:** La construcción de represas de mareas puede tener un impacto en los ecosistemas costeros y marinos.
- ➔ **Interferencia con la navegación:** Puede interferir con la navegación en áreas donde se instalan instalaciones de energía de las mareas.

Energía de las Olas:

- ➔ **Tecnología en desarrollo:** La tecnología de generación de energía de las olas aún está en desarrollo y no está ampliamente desplegada ni probada.
- ➔ **Impacto en la vida marina:** Las estructuras de generación de energía de las olas pueden tener un impacto en la vida marina y los ecosistemas costeros.
- ➔ **Dependencia de condiciones del mar:** La generación de energía de las olas depende de las condiciones del mar, lo que puede hacer que la producción sea irregular.

Hidrógeno:

- ➔ **Producción de hidrógeno:** La producción de hidrógeno a partir de fuentes limpias puede ser costosa y energéticamente intensiva.
- ➔ **Almacenamiento y transporte:** El almacenamiento y el transporte seguros y eficientes del hidrógeno pueden ser desafiantes.
- ➔ **Riesgos de seguridad:** El hidrógeno es altamente inflamable y puede plantear riesgos de seguridad.

Procesos Atómicos de Fusión:

- ➔ **Desarrollo en curso:** La fusión nuclear aún está en desarrollo y no se ha logrado una implementación práctica a gran escala.
- ➔ **Costos y complejidad:** La construcción y operación de reactores de fusión nuclear son extremadamente costosas y técnicamente desafiantes.
- ➔ **Residuos y seguridad:** Aunque produce menos residuos radiactivos que la fisión nuclear, todavía plantea desafíos en términos de gestión de residuos y seguridad.

Es importante destacar que las desventajas de estas fuentes de energía pueden variar según la ubicación, la tecnología utilizada y las prácticas de gestión. La elección de una fuente de energía renovable debe considerar cuidadosamente estos factores y equilibrar las ventajas y desventajas, en función de las necesidades específicas de cada región.

1.5 Aspectos políticos y normativos en México y el mundo

Para lograr el éxito de una política energética a largo plazo que promueva el crecimiento de las energías renovables, es esencial contar con un marco regulatorio actualizado en el ámbito energético. Este marco debe incentivar la inversión en nuevas tecnologías y asegurar el progreso del país en este sector como se ve en la Figura 1.14.

En esta línea, México ha implementado diversas acciones para impulsar las energías renovables, con el objetivo de diversificar las fuentes de generación de energía como una medida para mitigar los impactos negativos del cambio climático y fortalecer la seguridad energética del país. Estas acciones incluyen el desarrollo de políticas, legislación, regulaciones y normativas específicas. A continuación, se mencionan los principales instrumentos legales relacionados con las energías renovables:

Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética

Es una pieza de legislación mexicana publicada el 28 de noviembre de 2008 en el Diario Oficial de la Federación. El propósito de esta ley es fomentar el uso de fuentes de energía renovables en México y ayudar en la transición del país hacia un sistema energético más limpio y sustentable. Algunos de los puntos clave y objetivos detrás de esta ley:

- **Promoción de fuentes de energía renovables:** Entre otras fuentes de energía renovables, la ley tiene como objetivo fomentar la inversión y el desarrollo de la energía solar, eólica, geotérmica y de biomasa.
- **Establecimiento de objetivos:** para aumentar la proporción de fuentes de energía renovables en la combinación energética del país, la legislación puede establecer objetivos específicos para la generación de energía a partir de estas fuentes.
- **Incentivos fiscales:** Pueden incluir cláusulas que otorguen exenciones o reducciones fiscales a los proyectos de energías renovables con el fin de fomentar su desarrollo.

La ley podrá establecer mecanismos de financiamiento para iniciativas vinculadas a la transición hacia una matriz energética más limpia y sustentable. Estas disposiciones podrán cubrir la regulación y supervisión de los proyectos de energías renovables y sus operaciones.

Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos

Tiene por objeto promover y desarrollar los bioenergéticos como una alternativa energética que contribuya a la diversificación energética y el desarrollo sustentable, así como al apoyo al campo mexicano.

La ley establece las bases para:

- Definir los bioenergéticos como combustibles derivados de la biomasa que se utilizan para fines energéticos.
- Regular la producción, distribución, comercialización y uso de los bioenergéticos, así como los permisos y autorizaciones correspondientes.
- Establecer las atribuciones y coordinación de las secretarías y dependencias federales involucradas en el sector de los bioenergéticos.
- Promover la creación de infraestructura, incentivos fiscales, financiamiento, investigación y desarrollo tecnológico para la producción de bioenergéticos.
- Proteger el abasto nacional de alimentos y el equilibrio ecológico en el aprovechamiento de la biomasa.

Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía

Es una ley federal que tiene como objeto propiciar un aprovechamiento sustentable de la energía mediante el uso óptimo de la misma en todos sus procesos y actividades, desde su explotación hasta su consumo. La ley establece:

- Las bases para la planeación, instrumentación, evaluación y seguimiento de las políticas públicas en materia de aprovechamiento sustentable de la energía.
- Las atribuciones y coordinación de las autoridades federales, estatales y municipales en el ámbito de sus respectivas competencias.
- Los mecanismos para fomentar la participación de los sectores social y privado en el aprovechamiento sustentable de la energía.

- ➔ Las medidas para promover el uso eficiente y racional de la energía, así como el desarrollo y uso de tecnologías limpias y renovables.
- ➔ Las disposiciones para incentivar la investigación, innovación, capacitación y difusión en materia de aprovechamiento sustentable de la energía.
- ➔ Las sanciones administrativas y penales por incumplimiento de la ley y sus reglamentos.

Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo

Es una legislación importante en México que regula el sector petrolero y establece las bases para la exploración, explotación y aprovechamiento de los recursos petroleros en el país. A continuación, se presenta un resumen de los puntos clave de esta ley:

- ➔ La ley establece que la exploración y explotación de petróleo y otros hidrocarburos son exclusivos del Estado mexicano a través de la empresa estatal Petróleos Mexicanos (PEMEX).
- ➔ La legislación establece un marco regulador detallado para supervisar y controlar las actividades petroleras. Esto incluye la emisión de permisos y concesiones por parte del Estado para llevar a cabo proyectos en el sector.
- ➔ La ley aborda los procesos de exploración, perforación, producción y transporte de petróleo y gas natural. Establece normas técnicas y de seguridad para estas operaciones.
- ➔ La legislación establece disposiciones relacionadas con la fiscalización y el cobro de regalías y derechos por la explotación de hidrocarburos.
- ➔ Contiene disposiciones para mitigar los impactos ambientales de las actividades petroleras y garantizar la protección del medio ambiente.

Ley de Desarrollo Rural Sustentable

La ley tiene como objetivo promover el desarrollo rural sustentable en México, garantizando la mejora de la calidad de vida de las comunidades

rurales y la preservación del medio ambiente. A continuación, se presenta un resumen de los puntos clave de esta ley:

- Fomenta la participación de las comunidades rurales en la toma de decisiones y en la planificación de proyectos de desarrollo.
- Establece principios y políticas para asegurar que el desarrollo rural se realice de manera ambientalmente sostenible y respetuosa con los recursos naturales.
- Promueve la diversificación de actividades económicas en las zonas rurales para reducir la dependencia de la agricultura tradicional.
- Busca garantizar el acceso a la tierra y a recursos productivos para las comunidades rurales, incluyendo a grupos indígenas.
- Incentivas prácticas agrícolas sustentables, la conservación de suelos y la protección de la biodiversidad.
- Establece medidas para el desarrollo de infraestructura básica, como caminos rurales, electrificación y acceso a servicios de salud y educación.
- Reconoce y protege los derechos de tenencia de la tierra de las comunidades indígenas y campesinas.
- Establece sistemas de evaluación y seguimiento de políticas y programas de desarrollo rural para medir su impacto y eficacia.

Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable

La ley tiene como objetivo principal promover y regular el desarrollo forestal sustentable en México, preservando la biodiversidad, los servicios ecosistémicos y la riqueza de los recursos forestales. A continuación, se presenta un resumen de los puntos clave de esta ley:

- Establece medidas para la conservación y el manejo sostenible de los bosques y selvas, garantizando su uso racional y la regeneración de los recursos.
- Fomenta la participación de las comunidades locales en la toma de decisiones y la gestión de los recursos forestales en sus territorios.

- ➔ Regula las actividades de aprovechamiento forestal, imponiendo restricciones y normativas para garantizar prácticas sostenibles y evitar la sobreexplotación.
- ➔ Promueve la reforestación, restauración de áreas degradadas y la recuperación de ecosistemas forestales.
- ➔ Reconoce y protege los derechos de los pueblos y comunidades indígenas en relación con sus territorios forestales.
- ➔ Facilita la cooperación internacional en asuntos relacionados con la conservación y el manejo sostenible de los bosques.

Reglamento de la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética

Es un ordenamiento que tiene por objeto establecer las disposiciones para regular los mecanismos y procedimientos que permitan la instrumentación de la ley en materia de aprovechamiento de fuentes de energía renovables y las tecnologías limpias para generar electricidad con fines distintos a la prestación del servicio público de energía eléctrica, así como establecer la estrategia nacional y los instrumentos para el financiamiento de la transición energética.

El reglamento establece:

- ➔ Las bases para la planeación, coordinación, evaluación y seguimiento de las políticas públicas en materia de energías renovables y transición energética.
- ➔ Las atribuciones y obligaciones de las autoridades federales, estatales y municipales en el ámbito de sus respectivas competencias.
- ➔ Los mecanismos para fomentar la participación de los sectores social y privado en el aprovechamiento de las energías renovables y la transición energética.
- ➔ Los requisitos y procedimientos para obtener permisos, autorizaciones, certificados y registros relacionados con el aprovechamiento de las energías renovables y la transición energética.

- ➔ Las disposiciones para incentivar la investigación, innovación, capacitación y difusión en materia de energías renovables y transición energética.
- ➔ Las sanciones administrativas por incumplimiento del reglamento y la ley.

Reglamento de la Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía

Es un ordenamiento que tiene por objeto reglamentar la ley que propicia un aprovechamiento sustentable de la energía mediante el uso óptimo de la misma en todos sus procesos y actividades, desde su explotación hasta su consumo. El reglamento establece:

- ➔ Las bases para la planeación, coordinación, evaluación y seguimiento de las políticas públicas en materia de aprovechamiento sustentable de la energía, energías limpias y reducción de emisiones contaminantes de la industria eléctrica.
- ➔ Las atribuciones y obligaciones de las autoridades federales, estatales y municipales en el ámbito de sus respectivas competencias.
- ➔ Los mecanismos para fomentar la participación de los sectores social y privado en el aprovechamiento sustentable de la energía.
- ➔ Los requisitos y procedimientos para obtener permisos, autorizaciones, certificados y registros relacionados con el aprovechamiento sustentable de la energía.
- ➔ Las disposiciones para incentivar la investigación, innovación, capacitación y difusión en materia de aprovechamiento sustentable de la energía.
- ➔ Las sanciones administrativas por incumplimiento del reglamento y la ley.

La comunidad internacional ha adoptado diversas medidas para promover las energías renovables, con el fin de abordar los desafíos globales del cambio climático y mejorar la seguridad energética a nivel global. Estas acciones incluyen la formulación y el fortalecimiento de políticas, legislación, regulaciones y normativas específicas que fomenten la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.

Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, por sus siglas en inglés)

Es una organización intergubernamental que se encarga de promover el uso sostenible y la adopción de energías renovables a nivel mundial. Su enfoque principal está en fomentar el desarrollo y la utilización de fuentes de energía renovable como la solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica y bioenergía. A continuación, se detallan las principales responsabilidades y áreas de trabajo de IRENA:

- IRENA trabaja para acelerar la transición hacia un sistema energético más limpio y sostenible a nivel global. Proporciona orientación y asesoramiento técnico a los países para ayudarlos a integrar las energías renovables en sus políticas energéticas nacionales.
- La agencia lleva a cabo investigaciones y análisis en profundidad sobre diversas tecnologías y mercados de energías renovables. Sus informes y publicaciones son recursos valiosos para la toma de decisiones en el ámbito energético.
- IRENA fomenta la cooperación internacional en el desarrollo de proyectos de energías renovables, el intercambio de conocimientos y la transferencia de tecnología entre países miembros.
- La agencia brinda capacitación y desarrollo de capacidades a gobiernos, industrias y otros actores relevantes para impulsar la adopción de energías renovables.
- IRENA trabaja en la promoción de inversiones en proyectos de energías renovables, facilitando la creación de un entorno favorable para la inversión en este sector.
- Ayuda a los países en la formulación y la implementación de políticas y marcos regulatorios que promuevan la energía renovable y la eficiencia energética.

Directiva sobre fuentes de energía renovables (DFER)

Establece un marco jurídico común para promover el uso de la energía procedente de fuentes renovables en la Unión Europea. La directiva fija un

objetivo vinculante de que el 20 % del consumo final bruto de energía de la Unión proceda de fuentes renovables para 2020, así como objetivos nacionales individuales para cada Estado miembro. La directiva también establece normas sobre el acceso a la red, el apoyo a las energías renovables, la cooperación entre los Estados miembros y con terceros países, el uso de biocarburantes y bio-líquidos en el transporte y la sostenibilidad de estos. La directiva prevé la elaboración de planes nacionales de acción en materia de energías renovables y la supervisión del progreso mediante informes periódicos.

México, Las relaciones Internacionales en la Secretaría de Energía (DGRI)

Se encarga de asesorar y proponer la política y lineamientos que en materia de energía sigue esta dependencia en el ámbito internacional.

- **Relaciones Bilaterales:** Se explica que la DGRI da seguimiento y fomenta el diálogo político y la cooperación en las relaciones bilaterales que sostiene la SENER con sus equivalentes en otros gobiernos en el extranjero (cerca de 50 países).
- **Relaciones Multilaterales:** Se detalla que la DGRI participa activamente en los foros multilaterales relacionados con la energía, como la Agencia Internacional de Energía (AIE), el Foro Internacional de Energía (FIE), el Consejo Mundial de Energía (CME), la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), entre otros.
- **Cooperación Internacional:** Se describe que la DGRI gestiona y coordina los proyectos de cooperación internacional que recibe y otorga la SENER, con el apoyo de organismos internacionales como el Banco Mundial (BM), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), entre otros, así como con países donantes como Alemania, Canadá, Estados Unidos, Francia, Japón, Noruega, Reino Unido, entre otros.
- **Asuntos Jurídicos Internacionales:** Se indica que la DGRI brinda asesoría jurídica internacional a las áreas sustantivas de la SENER, así como a

los órganos desconcentrados y entidades coordinadas del sector energético, en materia de tratados internacionales, arbitrajes internacionales, contratos internacionales, asuntos consulares, entre otros.

Estado global de las Energías Renovables

Actualmente se tiene presente una crisis energética, por lo que es de gran importancia la implementación de las energías renovables, con el fin de satisfacer la demanda energética. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (2023), las energías renovables presentarán un enorme crecimiento los próximos años.

Es importante mencionar que el país más desarrollado en este campo es China, cuentan con el 91 % de la nueva capacidad instalada de energía solar fotovoltaica y el 50 % de la nueva capacidad instalada de energía eólica.

Las inversiones en energía renovable crecieron un 2 %, llegando a los 303.500 millones de dólares, impulsadas por el aumento de la demanda de electricidad y el abaratamiento de las tecnologías renovables.

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

2. Energía fotovoltaica

1

2

3

4

5

6

7

8

9

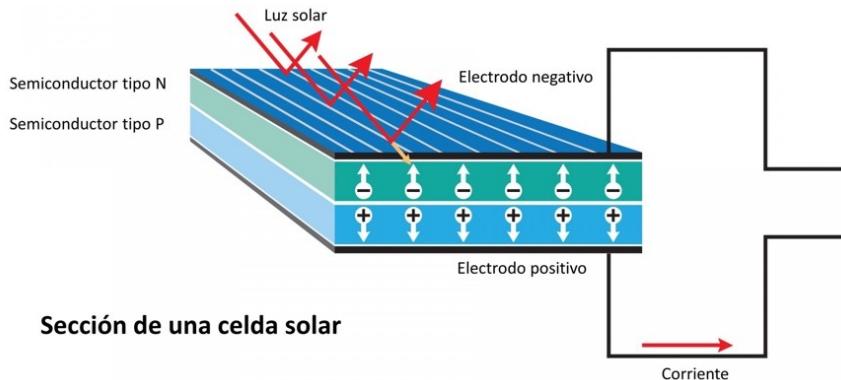
10

2.1 Principio y funcionamiento de los paneles fotovoltaicos

Un material es fotovoltaico, o aprovecha el efecto fotovoltaico, cuando se genera una corriente eléctrica en su interior al ser expuesto a la luz. Este fenómeno fue descrito por Edmond Becquerel en 1839, pero no fue entendido en su totalidad hasta que en 1905 Albert Einstein descubrió el efecto fotoeléctrico, que junto con la teoría de la relatividad le valió el premio Nobel de Física. En el efecto fotoeléctrico, un electrón salta de un nivel de más energía a uno de menos energía y en el proceso libera un fotón, es decir, luz. El efecto fotovoltaico es lo contrario, un fotón incide en un electrón y lo libera para que pueda formar una corriente. El material fotovoltaico por excelencia es el silicio, que también se utiliza para fabricar los semiconductores de los circuitos de computadora.

El silicio se forma en pequeños rectángulos delgados llamados celdas fotovoltaicas (figura 2.1). Para facilitar el movimiento de electrones se utilizan dos capas de silicio: una capa *n* (negativa), que tiene electrones móviles, y otra capa *p* (positiva), que tiene “huecos” receptores de electrones, formando una unión *n-p*. Las celdas pueden ser monocrystalinas, que siguen un proceso más delicado y da lugar a una cristalización continua y son más eficientes (~20 %) o policristalinas, que son más económicas, pero menos eficientes (~17 %) (fig. 2.2). También hay celdas amorfas, flexibles, pero de baja eficiencia (~10 %) y que se suelen usar en equipos como calculadoras y relojes. El límite teórico de eficiencia de conversión de energía solar a energía eléctrica

es de 34 %, y en la actualidad las celdas comerciales más eficientes utilizan tecnologías como PERC para aumentar la cantidad de energía que logra captar el silicio. Existen otros materiales fotovoltaicos como las celdas fotovoltaicas orgánicas y de perovskita, pero aún no hay aplicaciones comerciales.



Sección de una célula solar

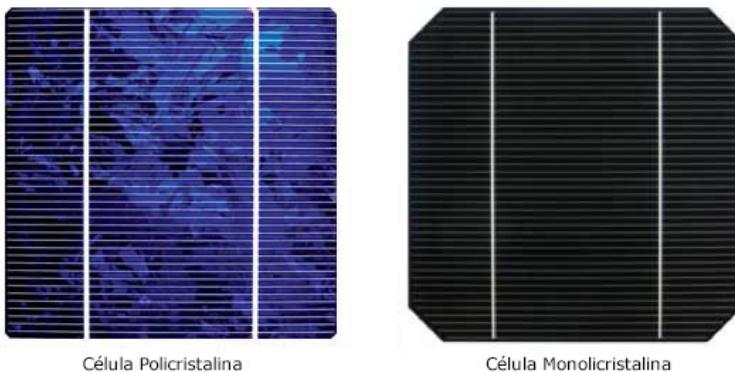


Figura 2.2. Tipos de celdas solares (Ineldec, s.f.).



Figura 2.3. Clasificación por tamaño y uso: izquierda: sistema residencial (Solhé, 2020), centro: sistema industrial (Timestech, 2020), derecha: parque solar (Stocker, 2016).

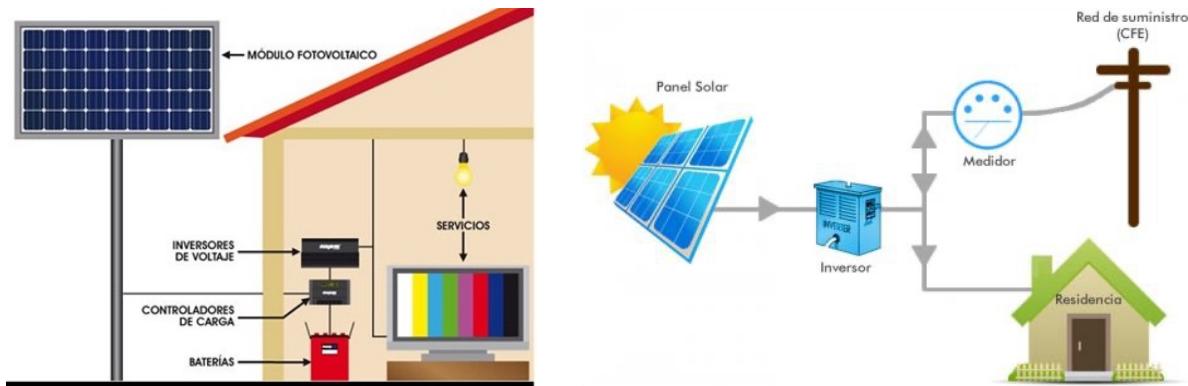


Figura 2.4. Clasificación por conexión a la red: izquierda: sistema isla (Corpovalle, 2017), derecha: sistema interconectado (Chávez, 2020).

2.2 Clasificación de los sistemas fotovoltaicos

Una posible clasificación de los sistemas fotovoltaicos es por su tamaño o potencia y uso. **Las instalaciones residenciales** (figura 2.3, izquierda) son sistemas generalmente pequeños (<5 kW) que satisfacen las necesidades de una casa individual y se colocan en el techo de las casas. **Una instalación comercial e industrial** (figura 2.3, centro) llega hasta 500 kW, y tiene requisitos eléctricos mucho más estrictos; este tipo de giros suele tener amplio espacio de azotea para hacer instalaciones de este tamaño. **Los parques solares** (figura 2.3, derecha) generan energía que se vende exclusivamente por mayoreo al mercado eléctrica y sirve para el consumo de una gran cantidad de usuarios. Existen ya parques solares de más de 1 GW de potencia instalada con millones de paneles fotovoltaicos; la central solar más grande del mundo es el Bhadia Solar Park en India con 2.7 GW y en México el parque solar Villanueva en Viesca, Coahuila tiene 828 MW de potencia.

Otra posible clasificación de los sistemas es por su tipo de conexión a la red eléctrica. En la gran mayoría de las poblaciones, la electricidad se produce en grandes centrales eléctricas que generan electricidad día y noche y se transporta por redes de transmisión y distribución hasta llegar a los hogares y negocios. En un lugar muy remoto donde no sea posible conectarse a estas redes será necesario instalar un **sistema isla o aislado** (figura 2.4., izquierda) que dependa únicamente del sistema fotovoltaico como su principal fuente

de energía. Como en las noches nunca hay energía solar, y también hay días nublados donde la generación solar disminuye, es necesario generar energía de más cuando esté disponible y almacenarla de alguna manera. La energía eléctrica se debe utilizar instantáneamente y no es posible almacenarla, por lo que se debe convertir a otro tipo de energía para lograrlo. En la gran mayoría de los sistemas isla se utilizan baterías para almacenar la energía generada como energía química. Estos sistemas pueden llegar a costar el doble de un sistema convencional o interconectado, por lo que no se recomiendan a menos que sean absolutamente necesarios, como repetidores de telecomunicaciones en zonas remotas.

Otro tipo de sistema aislado que no utiliza baterías es el del **bombeo solar**. Cuando hay suficiente irradiancia, el agua se bombea de un pozo a un tanque elevado donde la energía se almacena como energía potencial hidráulica. Durante la noche o en días nublados, se puede mantener un suministro constante de agua gracias a este tanque elevado.

En un **sistema interconectado** (figura 2.4., derecha), se mantiene la conexión con la red eléctrica regional o nacional. En la noche se obtiene energía de la red eléctrica, mientras que en el día la energía proviene del sistema fotovoltaico. Si hay un exceso de energía producida, es decir, se genera más de lo que se consume, la energía restante se exporta a la red eléctrica, donde será consumida por las casas o negocios aledaños. Para este efecto la compañía eléctrica debe medir tanto lo que la casa consume como lo que exporta, y cobrar al usuario únicamente la diferencia; esto se conoce como **medición neta** o net metering. En este caso no son necesarias las baterías, ya que la red eléctrica actúa como el respaldo o la batería del sistema.

2.3 Componentes de un sistema fotovoltaico

Paneles fotovoltaicos

Una **celda solar** produce un voltaje muy pequeño (alrededor de 0.5V), por lo que las celdas se conectan en serie y en paralelo para formar un panel

fotovoltaico (figura 2.5. izquierda), que es el elemento fundamental de un sistema fotovoltaico. Las celdas y sus conexiones se funden y “ahogan” dentro de una película plástica transparente de etil-vinilo-acetato (EVA), que las protege del medio ambiente. En la parte trasera se coloca otra película plástica opaca llamada base o backsheet, que aísla eléctricamente a las celdas y permite la disipación de calor. En el frente se coloca vidrio templado, que protege mecánicamente a las celdas y evita daños por impactos de granizo (de hasta 75 mm, 203 g a una velocidad de 39.5 m/s). El resto de la resistencia mecánica y aterrizamiento eléctrico se da mediante un marco de aluminio, que debe ser de una aleación anticorrosiva. Aunque los paneles pueden sostener a una persona caminando sobre ellos, no es recomendable hacerlo ya que se pueden generar microfracturas conocidas como snail trails. Por último, se tienen elementos de protección eléctrica conocidos como diodos de bypass y cables que permiten conectar a los paneles entre sí mediante una conexión conocida como MC4.

La gran mayoría de los paneles son planos, rígidos y las celdas cubren casi toda su área, pero también hay paneles flexibles de silicio amorfo, y con espejos concentradores, donde un paraboloide concentra la luz en un área muy pequeña, permitiendo tener un silicio de gran eficiencia y muy caro. Otros paneles no tienen marco para ser utilizados como fachadas de acristalamiento.



Figura 2.5. Izquierda: Componentes de un panel fotovoltaico (Soliclima, 2019), derecha: Curvas I-V y V-P para un panel de 450 W con diferentes irradiancias (Jinko Solar, s.f.). El eje vertical izquierdo representa la corriente (A), el izquierdo la potencia (W), y el horizontal el voltaje (V).

Los paneles fotovoltaicos producen energía en corriente directa (CD) y tienen dos características eléctricas fundamentales: la **corriente de corto circuito** (I_{sc}) y el **voltaje de circuito abierto** (V_{oc}). Estos parámetros se miden bajo las **condiciones estándar (STC)**, por sus siglas en inglés) (1,000 W/m², 20°C, y 1 m/s de viento). Cuando el panel se encuentra bajo carga, es decir, está generando electricidad, el voltaje y la corriente se van a encontrar en un valor intermedio entre 0 y I_{sc} y V_{oc} . El conjunto de posibles combinaciones se representa en una curva corriente-voltaje (I-V). Es posible generar **curvas I-V** (fig. 2.5, derecha) para condiciones diferentes a las STC. Si se multiplican estas dos características se obtiene una curva voltaje-potencia (V-P), y es posible observar que cuando se tiene I_{sc} o V_{oc} la potencia es 0 y que hay un **punto de máxima potencia (MPP)**, por sus siglas en inglés). Las características eléctricas en el MPP se denominan I_{mp} , V_{mp} , y P_{mp} .

Los altos voltajes en CD son mucho más peligrosos que en CA, por lo que se requieren más protecciones para los inversores de cadena. Por otro lado, tienen una menor vida útil que un panel fotovoltaico (~25 años para el panel y ~10-15 para el inversor de cadena), por lo que es necesario una segunda inversión a la mitad de la vida útil del sistema. En el caso de tener sombreado diferente en algunos paneles, toda la cadena se ve afectada debido a la existencia de un solo MPPT.

El otro tipo de inversores son los microinversores (fig. 2.6, derecha), que son inversores para un solo panel. Cada panel tiene su propio MPPT, casi todo el cableado es en CA, tienen una mayor eficiencia, y tienen una vida útil igual a la del panel fotovoltaico. Su principal problema es el elevado costo. Son competitivos en instalaciones pequeñas (<5 kW) y arriba de 10 kW es muy difícil lograr menores costos que con un inversor de cadena. En años recientes se han creado microinversores para 2 o 4 paneles, creando un punto medio que es mucho más competitivo en costos.

Para los sistemas que requieren baterías, se tienen inversores que pueden manejar a la vez la carga de los paneles y de las baterías, inversores con baterías integradas, e inversores híbridos, que pueden funcionar de manera interconectada a la red y también pueden funcionar por su cuenta con baterías en

caso de que haya una interrupción del suministro eléctrico. En los parques fotovoltaicos se utilizan inversores centrales, que siguen el mismo principio de los inversores de cadena, pero con un inversor para cientos o miles de paneles.



Figura 2.6. Inversores fotovoltaicos. Izquierda: inversor de cadena (Fronius, s.f.), del tamaño de un boiler de paso. Derecha: microinversor (Enphase, s.f.), del tamaño de una libreta o agenda.

Estructura

El panel fotovoltaico debe ir sujeto al suelo o a losa del edificio mediante una estructura (figura 2.7), que además permite dar un aterrizamiento eléctrico y dar la orientación e inclinación adecuada. La estructura más común para suelos y techos consiste en **marcos de aluminio anodizado aleación 6061** que son fáciles y rápidas de armar, pueden soportar vientos de huracanes, y son resistentes a la corrosión. Para el aterrizamiento eléctrico es importante utilizar roldanas especiales que rompen el anodizado y dan continuidad eléctrica. Este tipo de aluminio no es el que se utiliza en cancelería, sino uno especial para cubiertas de barcos. Es importante recordar que el marco del panel es de aluminio, y que si se utilizar otro material más económico para la estructura como el hierro, existe el riesgo de oxidación de la estructura y de un fenómeno conocido como **corrosión bimetálica** cuando dos metales diferentes generan un **par galvánico** debido a la diferencia de potencial en

la serie galvánica. En el caso de montar una estructura de paneles sobre otra estructura de acero se debe utilizar un material aislante. Existen también estructuras de plástico, de madera, sistemas para crear estacionamientos solares donde los paneles dan sombra a los carros, sistemas para que paneles sin marco funjan como acristalamiento de techo o fachada, estructuras para montaje en muros, para montaje en postes de luminarias, etc.



Figura 2.7. Estructura de aluminio para paneles fotovoltaicos (Suneast Technology, s.f.).

El anclaje de la estructura es fundamental para desarrollar una eficiencia adecuada al viento. En suelo se suele utilizar una cimentación de concreto o anclajes helicoidales, que son una especie de tornillos que perforan el suelo, desarrollan mejor resistencia a la tensión que una cimentación convencional y se suelen utilizar en torres de comunicaciones. En techo lo ideal es utilizar varillas roscadas soldadas a la estructura y coladas sobre una base elevada, pero lo más común es utilizar taquetes de alta resistencia. En el segundo caso se rompe la barrera impermeabilizante, y en caso de contar con membrana asfáltica se debe evitar esto y colocar lastres de concreto que mantengan a la estructura en su lugar.

Otros componentes

En caso de tener un sistema aislado de la red, se utilizan baterías que pueden ser de litio (alto costo) o de plomo-ácido de descarga profunda (similares visualmente, pero de mayor calidad a las baterías de auto). Las baterías suelen

tener una vida útil de aproximadamente 5 a 10 años. Las baterías se cargan con un controlador de carga y pueden llegar a requerir su propio inversor, aunque muchos inversores solares aislados ya integran todos estos elementos.

El monitoreo es fundamental para conocer el comportamiento, diagnosticar problemas, y verificar la producción calculada. En varios países, como México, es obligatorio tener un sistema de monitoreo. Es posible medir la producción directa del inversor, así como el consumo de toda la casa o edificio. Los medidores de consumo eléctrico de las compañías suministradoras deben ser digitales y reprogramarse para ser bidireccionales, es decir, poder medir energía en ambos sentidos de circulación.

El cableado que se utiliza en la instalación eléctrica es el convencional, tipo THHN/THWN, aunque si se superan 600 V en el circuito de CD se debe cambiar al tipo XHH o XHHW que resiste hasta 1000 V. En el caso de tener cable expuesto al sol, como es el caso del cable que conecta entre sí a los paneles de una cadena, se debe utilizar un tipo especial de cable solar que resiste los rayos UV. Sin embargo, para el resto de los circuitos debe procurarse canalizar el cableado en conductos metálicos conocidos como conduit en exteriores, mientras que en interiores también es posible utilizar rieles de canalización para instalaciones industriales.

2.4 Tarifas eléctricas residenciales en México

En México, las tarifas eléctricas residenciales están subsidiadas, es decir, a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) le cuesta más dinero generar la electricidad que lo que gana al venderla a los hogares. El esquema de subsidio se denomina **Tarifa de Bloque Incremental** (IBT, en inglés), y consiste en diferentes escalones o bloques de consumo que se cobran a una tasa diferente, la cual incrementa a mayor consumo hasta llegar a un valor no subsidiado. La tarifa básica residencial se conoce como tarifa 1, y en diciembre de 2022 se cobraba \$ 0.939 por cada uno de los primeros 75 kWh consumidos (básico), \$ 1.146 por cada uno de los siguientes 65 kWh (intermedio), y \$ 3.346 por los kWh restantes (excedente).

Existe además una tarifa de castigo para los hogares que tienen un consumo excesivo de electricidad. Esta tarifa se llama DAC (Doméstica de Alto Consumo). Los clientes pasan automáticamente a ella cuando el promedio de consumo mensual a lo largo del año anterior supera los 250 kWh. En esta tarifa existe un cargo fijo mensual más una tasa plana para todos los kWh consumidos. Para el centro del país, en diciembre de 2022, el cargo fijo era de \$ 132.49 y el cargo por kWh era de \$ 6.569.

Adicional al cargo calculado por el consumo eléctrico, se debe agregar el IVA (Impuesto al Valor Agregado) que es del 16 %, y dependiendo de la localidad, el DAP (Derecho al Alumbrado Público), que suele ser del 8.5 %. La tarifa subsidiada tiene incrementos inflacionarios, mientras que las tarifas no subsidiadas varían de acuerdo con los mercados nacionales e internacionales de los costos marginales de generación eléctrica, es decir, de cuánto le cuesta a CFE producir un kWh más. Para las energías tradicionales, el **costo marginal** está relacionado con el costo del combustible, mientras que en el caso de las energías renovables el costo marginal es prácticamente nulo, por lo que una mayor mezcla de energías renovables en la generación de un país implica costos menos volátiles.

Existen otras tarifas residenciales que dependen del clima de la localidad. La tarifa 1A aplica para las localidades que tienen una temperatura en verano de al menos 25°C, mientras que la tarifa 1F es para aquellos lugares con temperaturas de al menos 33°C. En las tarifas 1A-F los escalones de consumo son más grandes, el costo por kWh es menor, y el umbral para pasar a tarifa DAC es mayor. Para los comercios, las tarifas dependen del voltaje de conexión a la red eléctrica (baja, media, o alta tensión) y de la carga o potencia conectada. Dependiendo de la tarifa, puede haber un cargo por energía consumida (kWh) y otro por demanda o potencia máxima (kW), así como diferentes tasas de acuerdo con la hora del día y la época del año. El detalle de tarifas se puede obtener en la página de CFE¹.

¹ <https://app.cfe.mx/Applicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Casa.aspx>

Ejemplo 2.4.1.

Calcula el pago de electricidad de una casa en tarifa 1 que consumió 200 kWh en diciembre de 2022.

El cálculo consiste en separar los 200 kWh en cada escalón de consumo, y multiplicarlo por la tasa de cada escalón. Finalmente se multiplica por el IVA y el DAP. El proceso se resume en la tabla mostrada a continuación:

| Escalón | Consumo [kWh] | Cargo [\$/kWh] | Total [\$] |
|--------------|---------------|----------------|------------------|
| Básico | 75 | \$ 0.939 | \$ 70.43 |
| Intermedio | 65 | \$ 1.146 | \$ 79.49 |
| Excedente | 60 | \$ 3.346 | \$ 200.760 |
| SUMA | 200 | | \$ 345.68 |
| IVA (16 %) | | | \$ 55.31 |
| SUMA | | | \$ 400.98 |
| DAP (8.5 %) | | | \$ 34.08 |
| TOTAL | | | \$ 435.07 |

Ejemplo 2.4.2.

Calcula el pago de electricidad de una casa en región tarifaria 1 en el centro del país que consumió 260 kWh en diciembre de 2022 y que tiene un promedio de consumo mensual de 260 kWh en el último año.

La casa supera el umbral de promedio mensual para pasar a tarifa DAC. El cálculo consiste en sumar el cargo fijo y el cargo variable por consumo, y agregar el IVA y el DAP. Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

| Cargo | Consumo [kWh] | Cargo [\$/kWh] | Total [\$] |
|--------------|---------------|----------------|--------------------|
| Fijo | | | \$ 132.49 |
| Consumo | 260 | \$ 6.569 | \$ 1,707.94 |
| SUMA | | | \$ 1,840.43 |
| IVA (16 %) | | | \$ 294.47 |
| SUMA | | | \$ 2,134.90 |
| DAP (8.5 %) | | | \$ 181.47 |
| TOTAL | | | \$ 2,316.37 |

Al comparar los dos ejemplos anteriores, es posible observar que una diferencia muy pequeña en el consumo mensual puede implicar un incremento sustancial en el pago por electricidad. Por esta razón, los sistemas fotovoltaicos son altamente rentables en hogares que se encuentran en tarifa DAC y se pueden obtener grandes ahorros incluso con un sistema pequeño si es capaz de regresar a los usuarios a la tarifa subsidiada.

2.5 Cálculo de un sistema interconectado residencial

Toda instalación eléctrica debe cumplir con la NOM-001-SEDE-2012 – Instalaciones Eléctricas (Utilización). Los capítulos que hablan específicamente de energía fotovoltaica son el 690 – Sistemas solares fotovoltaicos y el 706 – Sistemas de generación interconectada.

Para dimensionar un sistema fotovoltaico interconectado se debe hacer el cálculo de la cantidad de paneles solares necesarios para generar la cantidad de energía necesaria y además seleccionar el equipo que tenga parámetros eléctricos concordantes entre sí. La secuencia de cálculo general es la siguiente:

1. Definir los objetivos de generación

En el caso de un sistema residencial, debe decidirse si se quiere reducir el pago de electricidad al mínimo, con lo que la generación deberá ser casi igual al consumo. Debe cuidarse no producir más de lo que se consume, porque

entonces se estará regalando energía a CFE. Otra posibilidad es generar únicamente la cantidad necesaria para salir de tarifa DAC con cierto margen de seguridad. En el caso de los sistemas en comercio e industria, el límite de generación estará determinado por el espacio disponible.

2. Obtener la información de radiación solar regional

La información de radiación solar más actualizada y con mayor resolución se obtiene a partir de información satelital. Dos de las mejores fuentes de información para México se encuentran el *Prediction Of Worldwide Energy Resources* (POWER) de la NASA², que tiene información con una resolución de 0.5°x0.5°. La variable necesaria es “Latitude Tilt Radiation”, que tiene unidades de kWh/m² día y se puede obtener un promedio anual o mensual.

Otra fuente importante de información es la Base de Datos Nacional de Radiación Solar de Estados Unidos³ (NSRDB, en inglés). Esta base de datos tiene información con gran resolución temporal y espacial (hasta 5 minutos y 2 km) para Estados Unidos y México, y se puede acceder fácilmente desde la aplicación *PVWatts*⁴ del Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos (NREL, en inglés). Se puede obtener también información de promedios mensuales de radiación. Además, se puede realizar un dimensionamiento rápido de un sistema fotovoltaico.

3. Analizar el espacio disponible

La ubicación del sistema debe minimizar la cantidad de sombras y la longitud del cableado necesario. También es importante considerar la parte estética de la instalación, ya que el cliente puede desear que el sistema sea o no visible desde la calle. En ocasiones, el sistema se coloca paralelo al techo para

² <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

³ <https://nsrdb.nrel.gov>

⁴ <https://pvwatts.nrel.gov/>

minimizar el impacto visual, lo que se conoce como **superposición arquitectónica** o instalación coplanar. En este caso rara vez se logra obtener la inclinación ideal, por lo que deben aceptarse pérdidas mayores. Para sistemas más grandes, también es importante contemplar pasillos de mantenimiento ya que no es correcto caminar sobre los paneles; aunque la resistencia del vidrio lo permita pueden generar microgrietas que disminuyan la vida útil del sistema. Por último, es importante considerar el desarrollo urbano circundante y prever la aparición de edificios que en el futuro puedan crear un sombreadamiento.

4. Escoger el tipo de inversor que se va a utilizar

El escoger un inversor de cadena o microinversores implica una metodología de diseño diferente; la eficiencia del sistema también cambia, así como los costos. Por lo general, para sistemas pequeños (<5 kW) los microinversores ganan por costo, dada la velocidad de instalación; en sistemas más grandes casi siempre se colocan inversores de cadena. Por otro lado, los microinversores dan la mayor seguridad en la instalación eléctrica, al minimizar el uso de voltajes altos en circuitos de corriente directa, y además se adaptan mejor a condiciones complejas de sombreadamiento, ya que cada panel tendrá su propio MPPT.

5. Determinar las pérdidas del sistema

Existen pérdidas **físicas** en el sistema y pérdidas **eléctricas**. La **suciedad** que se acumula en los paneles disminuye la producción. Con un buen mantenimiento se puede llegar a una pérdida de 2 %, aunque en lugares áridos y con mala calidad del aire puede ser mucho mayor. En las zonas donde hay nieve también puede haber pérdidas importantes en invierno y la inclinación es importante para que la nieve se desliza y descubra los paneles.

Otras pérdidas se dan en sistema con una **orientación e inclinación** diferente a la ideal. La orientación ideal en el hemisferio norte es un acimut de 0° al

sur, y la inclinación ideal es igual a la latitud del lugar, que es de 19.5° en el caso de la Ciudad de México. Para calcular estas pérdidas, se utilizan tablas o gráficas que deben generarse para las condiciones locales y que no existen para México. Otra opción es utilizar software que tenga implementados modelos de radiación solar como el modelo de Pérez. *PVWatts* es una opción sencilla para calcular estas pérdidas. Las pérdidas por orientación no deben superar 10 % en un sistema normal y 20 % en un sistema con superposición arquitectónica. Para la Ciudad de México se tiene una pérdida de 5.36 % si el sistema se coloca a 0° de inclinación.

Si hay obstáculos que generen sombras en los paneles durante ciertas horas del día, se tiene una pérdida por **sombreamiento**. Rara vez se tendrá una pérdida menor al 2.5 %, mientras que un valor mayor al 10 % en una instalación normal y de 15 % en la superposición arquitectónica es excesivo. Un valor estándar es de 5%; un cálculo detallado se hace de la misma manera que para un colector termosolar. Si se colocan varias filas de paneles fotovoltaicos, debe haber una separación entre ellas para evitar que la fila de enfrente tape a la de atrás. La distancia mínima (L) entre filas es:

$$L = H \tan \beta_{c \min}$$

Donde H es la altura de la fila de paneles (seno del ángulo de inclinación), y $\beta_{c \min}$ es la altura solar en el solsticio de invierno. Para la Ciudad de México, esto da aproximadamente $1.1H$.

En cuanto a las pérdidas eléctricas, el **inversor** tiene una cierta eficiencia en la conversión de DC a CA. Las **conexiones** entre cables generan una mayor resistencia eléctrica. La **longitud del cableado** también implica una resistencia y una caída de voltaje; debe procurarse que ésta sea menor a 2 %. Por otro lado, cada panel individual tiene una variación de su **capacidad nominal** con respecto a lo que indica el fabricante; esto aparece en la ficha técnica. En inversores de cadena, solo hay un MPP y debido a la variación de la capacidad nominal no todos los paneles trabajarán en su punto óptimo; se llama pérdida por **mismatch**. La pérdida por **disponibilidad** contempla el tiempo en que el sistema está fuera de operación por mantenimiento o alguna otra

razón que no sea falta de luz. El último tipo de pérdida se debe a la **degradación** de los paneles solares, que pierden aproximadamente 20 % de su capacidad en 25 años (ver cada ficha técnica) más una degradación inicial en la primera exposición a la luz. En la siguiente tabla se resumen las diferentes pérdidas para un sistema con inversor de cadena y microinversores:

| Pérdida | Factor de eficiencia del sistema | |
|----------------|----------------------------------|---------------|
| | Inversor de cadena | Microinversor |
| Capacidad | 0.990 | 0.990 |
| Mismatch | 0.980 | 1.000 |
| Conexiones | 0.995 | 0.995 |
| Cableado CD | 0.980 | 0.995 |
| Cableado CA | 0.980 | 0.980 |
| Suciedad | 0.970 | 0.980 |
| Disponibilidad | 0.990 | 0.998 |
| Degradoación | 0.881 | 0.930 |
| Total | 0.881 | 0.930 |

La pérdida por **temperatura** es considerable, ya que los paneles son semiconductores. Si la temperatura de las celdas sube de las condiciones estándar (25°C), hay una caída de voltaje y de potencia, que se indica en la ficha técnica y suele ser de $k_{TV} = 0.4\%/\text{°C}$ y $k_{TP} = 0.3\%/\text{°C}$, respectivamente. La celda suele estar a una temperatura mayor que el aire, por la disipación de calor de la corriente eléctrica. Para un sistema colocado sobre techo, separado a más de 10 cm, se agregan 30°C, sobre piso se suelo 25°C, y sobre poste o elevado 20°C. Hay software como *PVWatts* que incluyen un modelo de transferencia de calor para evaluar este efecto con mayor precisión. El incremento de voltaje por bajas temperaturas también puede llegar a causar problemas y se debe calcular.

$$V_{\min} = V_{oc} \left[100\% - k_{TV} (T_{\max} + T_{add} - T_{STC}) \right]$$

$$V_{\max} = V_{oc} \left[100\% - k_{TV} (T_{\min} + T_{add} - T_{STC}) \right]$$

$$\eta_T = 100\% - k_{TP} (T_m + T_{add} - T_{STC})$$

Donde $V_{mín}$ es el voltaje mínimo del panel [V], $V_{máx}$ es el voltaje máximo, V_{oc} es el voltaje de circuito abierto del panel [V], $T_{máx}$ es la temperatura máxima de la localidad, $T_{mín}$ es la temperatura mínima [°C], T_m es la temperatura promedio [°C], T_{add} es la temperatura que se adiciona a la celda [°C], $T_{STC} = 25$ [°C] es la temperatura de las condiciones estándar, η_T es la eficiencia por temperatura, k_{TP} [%/°C] es el factor de temperatura para la potencia, y k_{TV} [%/°C] es el factor de temperatura para el voltaje.

6. Calcular el número de paneles

El número de paneles se calcula con la siguiente fórmula:

$$N_p = \frac{E}{RP \eta_T \eta_s \eta_{io} \eta_{sh}}$$

Donde N_p es el número de paneles, a redondear hacia abajo en caso de querer cubrir todo el consumo y hacia arriba en caso de querer salir de tarifa DAC, E es la energía por generar en el periodo en cuestión [kWh/año, kWh/mes, etc.], R es la radiación solar en el periodo en cuestión [kWh/año, kWh/mes, etc.], P es la potencia nominal del panel [kW], η_T es la eficiencia por temperatura, η_s es la eficiencia del sistema, η_{io} es la eficiencia por inclinación y orientación, y η_{sh} es la eficiencia por sombreadamiento.

La energía producida se tiene que volver a calcular con el número entero de paneles que resulte.

Si se tiene información de radiación en horas pico de sol:

$$R = HPS\Delta t$$

Donde R es la radiación solar en el periodo en cuestión [kWh/año, kWh/mes, etc.], HPS son las horas pico de sol [kWh], y Δt es la cantidad de días en el periodo en cuestión [días/año, días/mes, etc.]

7. Seleccionar el inversor

Para el inversor de cadena, debe verificarse que cada el voltaje total mínimo y máximo (voltaje por número de paneles en la cadena) esté dentro del rango de MPPT del inversor de cadena y que cada cadena tenga el mismo número de paneles. En sistemas grandes a veces es necesario colocar cadenas en paralelo, donde se suma la corriente, y debe verificarse que quede dentro del rango del inversor. En ocasiones es conveniente utilizar varios inversores de cadena, por seguridad ante fallas, para tener más MPPT y ser más flexibles en condiciones complejas de sombreado. Sin embargo, seleccionar el inversor más grande implicará el menor costo.

Para los microinversores, se debe verificar que el voltaje, corriente y potencia del panel sea compatible. Hay microinversores de un solo panel, como los de la marca *Enphase*, y para 2 o 4 paneles, como los de *APSystems*. Los microinversores de varios paneles suelen ser más económicos. Los microinversores se colocan en una “cadena” y cada fabricante indica el número de microinversores máximos por cadena; en sistemas trifásicos se debe tener un múltiplo de 3.

Para los inversores es necesario seleccionar la potencia de acuerdo con la potencia del sistema (la suma de los paneles). Sin embargo, como los paneles en realidad producirán menos que la potencia del sistema debido a la pérdida de temperatura, la potencia del inversor se selecciona como el valor más cercano por arriba del producto de la eficiencia por temperatura, la eficiencia por orientación e inclinación, la eficiencia por sombreado y la potencia del sistema. Para reducir costos es posible incluso bajar la potencia del inversor, pero debe hacerse un análisis horario para ver el porcentaje de horas que se saturará el inversor y se tendrá pérdida de energía.

8. Seleccionar los sistemas de protección

Los inversores suelen tener una corriente máxima en la ficha técnica. El interruptor por sobrecorriente debe ser de la cantidad de fases adecuada y del valor más cercano por arriba de la corriente máxima. En caso de no tener la

corriente máxima, se debe calcular la ampacidad del sistema, donde se multiplica la corriente por 1.25 y esto se toma como la corriente máxima.

Para los sistemas en cadena, también se requiere un interruptor en la zona de CD, aunque algunos inversores ya lo tienen integrado. Otro tipo de protecciones son los interruptores por falla de arco (ACFI, en inglés), por falla a tierra (GFCI, en inglés), y el protectore de sobretensiones transitorias, que protege en caso de impacto de un rayo. También es importante aterrizar los elementos eléctricos y los elementos metálicos no conductores.

9. Dimensionar el cableado

El diámetro del cable se mide ya sea en mm² o en calibre AWG (en Estados Unidos y en México), donde un valor menor indica un cable de mayor diámetro. Cada calibre tiene una resistencia asociada en Ohm/m, y una ampacidad, o capacidad de corriente máxima. La corriente que circula por el cable debe multiplicarse por 1.25 y verificarse que sea menor a la ampacidad del calibre. La ampacidad debe corregirse por temperatura en caso de que la trayectoria del cableado esté expuesta a la radiación solar.

La longitud máxima del cableado se calcula con la siguiente fórmula:

$$L = \frac{k_v V}{k I R}$$

Donde L es la longitud del cable [m], kV es la caída de voltaje, usualmente de 2 %, V es el voltaje, usualmente 127 o 220 [V], k es factor que vale 2 para CD y CA en una o dos fases, y 3 para CA trifásica, I es la corriente en el cable [A], y R es la resistencia del cable [Ohm/m].

Para los microinversores, el fabricante indica una pérdida por cada microinversor dentro de la cadena, y la longitud máxima del cable se calcula con un valor de kV igual a la caída de voltaje esperada menos la caída de voltaje en la cadena de microinversores.

Es importante que la cantidad de cables cumpla con el requisito de porcentaje de llenado del diámetro de *conduit* que se utilice. Sin embargo, no es fácil calcular el diámetro exterior del cable ni el interior del *conduit*, ya que varía mucho del tipo de producto que se use. Lo más sencillo es utilizar calculadoras en línea⁵, y respetar un 53 % de llenado si se tiene un cable, 31 % con dos cables, y 40 % con tres o más cables. La cantidad de hilos (cables) dependerá de la cantidad de fases, de los requisitos de la NOM-001 y de las características detalladas en los diagramas multifilares de conexión de cada fabricante (figura. 2.8).

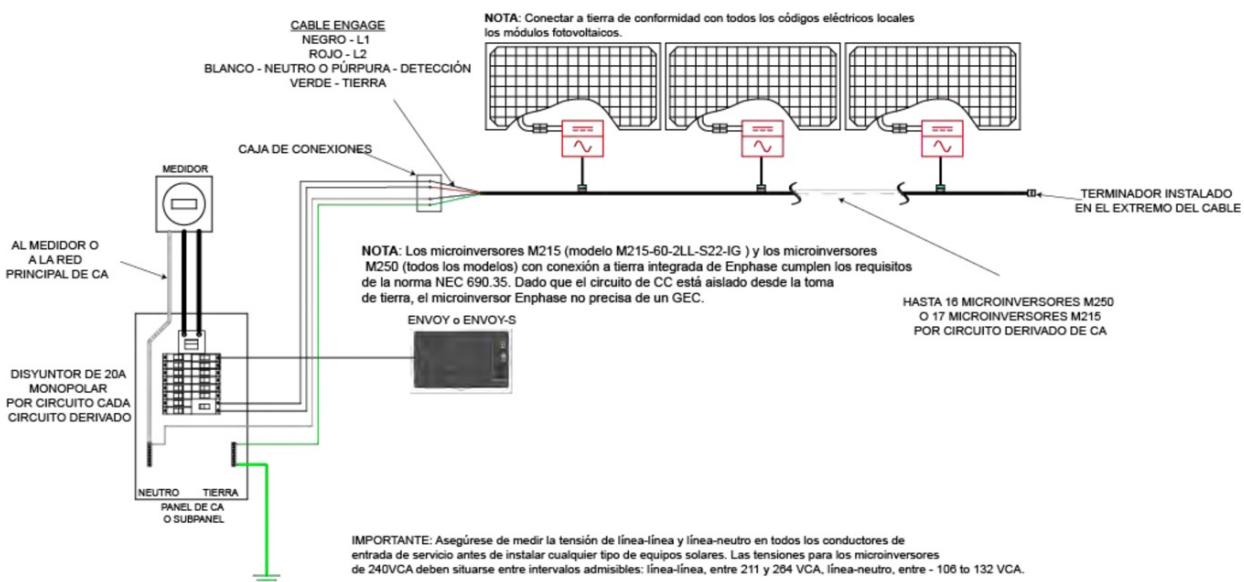


Figura 2.8. Ejemplo de diagrama de conexiones para un microinversor (Enphase, 2016)

10. Realizar el análisis financiero

El análisis financiero más sencillo consiste en dividir la inversión inicial del sistema entre el ahorro mensual para obtener el **tiempo de retorno**. Los negocios suelen considerar que un tiempo de retorno menor a 3 años es bueno.

⁵ Como por ejemplo <http://conduitfillcalculator.com/>

Los sistemas fotovoltaicos residenciales pueden llegar a tener tiempos de retorno menores a un año y medio, mientras que en ámbitos industriales suelen rondar en los 5 años. Como un sistema fotovoltaico tiene una vida útil muy larga, puede ser conveniente para los negocios, aunque el tiempo de retorno sea relativamente largo.

Un análisis más avanzado contemplará el valor del dinero en el tiempo, implementando la inflación, exigiendo una cierta tasa de descuento al proyecto, y calculando la tasa interna de retorno del proyecto.

Ejemplo 2.6.1.

Dimensiona un sistema fotovoltaico para el techo de una casa en la Ciudad de México en tarifa DAC que consume 3,500 kWh en el año y que quiere salir de tarifa DAC.

Estima una radiación solar de 1,850 kWh/m², una temperatura promedio de 20°C, máxima de 35°C, y mínima de 10°C. Los paneles se colocarán en superposición arquitectónica en un techo horizontal. Se usarán paneles de 450 W de potencia, 54 V de voltaje de circuito abierto, 10 A de corriente de corto circuito.

Realiza el cálculo con microinversores para un panel de 400 a 500 W con una pérdida de 0.01 % por microinversor en la cadena y un máximo de 10 microinversores en la cadena, y con inversores centrales con un rango de voltaje en MPPT de 150 a 250 V.

Contempla una instalación bifásica a 240 V con cable calibre 10 AWG con una resistencia de 3.34 Ohm/km.

Obtén además el tiempo de retorno si el sistema tiene un costo de \$ 35.00 por Watt de potencia instalada en el caso de microinversores y de \$ 30.00 en el caso de inversores de cadena.

Para salir de tarifa DAC, es necesario bajar el consumo a menos de 3,000 kWh. Se ha decidido bajar el consumo a 2,500 kWh para tener un margen de seguridad, ya que al tener un pago menor es posible que el cliente quiera instalar nuevos aparatos eléctricos. La cantidad por generar es entonces 1,000 kWh/año.

En primer lugar, calculamos los efectos de la temperatura:

$$V_{\min} = 54 \left[1 - 0.004(35 + 30 - 25) \right] = 45.4 \text{ [V]}$$

$$V_{\max} = 54 \left[1 - 0.004(10 + 30 - 25) \right] = 50.8 \text{ [V]}$$

$$\eta_T = 1 - 0.003(20 + 30 - 25) = 0.925$$

Continuamos con el cálculo para el sistema de microinversores. La cantidad de paneles es:

$$N_p = \frac{1,000}{1,850 \cdot 0.2 \cdot 0.925 \cdot 0.930 \cdot 0.9464 \cdot 0.95} = 3.49 \approx 4 \text{ [paneles]}$$

La cantidad producida con 4 paneles es:

$$E = 4 \cdot 1,850 \cdot 0.2 \cdot 0.925 \cdot 0.930 \cdot 0.9464 \cdot 0.95 = 1,145 \text{ [kWh/año]}$$

Los 4 paneles quedan dentro del rango máxima de la cadena de microinversores, y se tiene una caída de voltaje en la cadena de 0.04 %, por lo que la pérdida en el cableado de CA deberá ser de no más de 0.16 %. La potencia instalada del sistema es 1.8 kW, lo que da un costo de \$ 63,000.00. La corriente en CA se calcula con la ley de Ohm, $I = P/V = 1,800 / 240 = 7.5 \text{ A}$. La amperiedad entonces es de $7.5 \times 1.25 = 9.4 \text{ A}$, por lo que se necesita un protector de sobrecorriente de 2 polos (o fases) de 10 A.

La longitud máxima del cableado es:

$$L = \frac{(0.02 - 0.0016)240}{2 \cdot 7.5 \cdot 0.00334} = 88.1 \text{ [m]}$$

Por lo que no hay restricciones en la longitud del cable, e incluso reducirse la sección de éste.

La cantidad de paneles para el sistema de inversor de cadena es:

$$N_p = \frac{1,000}{1,850 \cdot 0.2 \cdot 0.925 \cdot 0.881 \cdot 0.9464 \cdot 0.95} = 3.69 \approx 4 \text{ [paneles]}$$

La cantidad producida con 4 paneles es:

$$= 4 \cdot 1,850 \cdot 0.2 \cdot 0.925 \cdot 0.881 \cdot 0.9464 \cdot 0.95 = 1,084 \text{ [kWh/año]}$$

El rango de voltaje de operación de la cadena de 4 paneles es de 181.6-203.2 V, que se encuentra dentro del rango del inversor. La potencia instalada del sistema es 1.8 kW, lo que da un costo de \$ 54,000.00.

La longitud máxima del cableado en corriente alterna es:

$$L_{CA} = \frac{0.02 \cdot 240}{2 \cdot 7.5 \cdot 0.00334} = 95.8 \text{ [m]}$$

En corriente directa el cálculo sería:

$$L_{CD} = \frac{0.02 \cdot 181.6}{2 \cdot 10 \cdot 0.00334} = 54.4 \text{ [m]}$$

El consumo restante mensual con el sistema fotovoltaico sería de 196 kWh con microinversores y de 201 kWh con inversor de cadena, que corresponde a un pago mensual en tarifa 1 de \$ 418.22 y \$ 439.28, respectivamente. El consumo mensual original era de 292 kWh, que en tarifa DAC corresponde a un pago de \$ 2,580.93 Esto significa que el ahorro mensual es de \$ 2,162.71 y \$ 2,141.68 y que el tiempo de retorno es de 2.4 y 2.1 para el sistema de microinversores y el de inversor de cadena, respectivamente.

Ejemplo 2.6.2.

Un sistema fotovoltaico aislado instalado en una casa de campo presenta una demanda diaria de 5,000 Wh a una tensión nominal de 48 V.

Determina la capacidad del banco de baterías para que tenga una autonomía de 5 días, considerando los datos obtenidos en las fichas técnicas:

- La eficiencia del inversor es del 88 %
- En conjunto el regulador y el banco de baterías tienen un rendimiento del 83 %.
- La profundidad de descarga máxima es del 70 %

Solución:

Cantidad de corriente diaria

$$I_{diaria} = \frac{\text{Demanda}}{\text{Tensión del sistema}}$$

$$I_{diaria} = \frac{5,000}{48} = 104 \text{ [Ah]}$$

Capacidad del banco de baterías

$$A = 5 \text{ días}$$

$$\eta_{inversor} = 88 \%$$

$$\eta_{r+b} = 83 \%$$

$$D_{máx} = 70 \%$$

$$A = \frac{\eta_{inversor} * \eta_{r+b} * C * D_{máx}}{I_{diaria}}$$

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

$$C = \frac{A * I_{diaria}}{D_{máx} * \eta_{inversor} * \eta_{r+b}}$$

$$C = \frac{A * I_{diaria}}{D_{máx} * \eta_{inversor} * \eta_{r+b}} = 995 \text{ [Ah]}$$

Ejemplo 2.6.3.

Un edificio requiere un sistema fotovoltaico de 4.0 kWp, contactamos al distribuidor de paneles fotovoltaicos e inversores y nos indica que cuenta con los siguientes equipos:

| Panel solar disponible | Símbolo | Unidad | Valor |
|-----------------------------|---------|--------|-------------|
| Potencia nominal | Pp | Wp | 150 |
| Tensión pico | Vp | V | 37.5 |
| Tensión en circuito abierto | Vcap | V | 40 |
| Corriente pico | Ip | A | 4 |
| Corriente a cortocircuito | Iccp | A | 4.5 |

| Inversor disponible | Símbolo | Unidad | Valor |
|---|----------|--------|-------|
| Potencia nominal CA (Corriente Alterna) | P inv | W | 2,000 |
| Potencia máx. CC (Corriente continua) | Pc máx. | Wp | 2,100 |
| Potencia mín. CC (Corriente continua) | Pc mín. | Wp | |
| Tensión máx. CC | Vc máx. | V | 560 |
| Tensión mín. CC | Vc min. | V | 175 |
| Tensión máx. CC en circuito abierto | Vcca inv | V | 560 |
| Intensidad máx. de CC | Ic inv | A | 12 |

1. Determinar el número de paneles fotovoltaicos e inversores requeridos para el sistema de 4 kWp.
2. Determinar el número de paneles conectados en serie, en paralelo y analiza el voltaje de arranque de los inversores para validar que el arreglo fotovoltaico entrar en operación.

3. Determinar si el amperaje de los circuitos en paralelo está dentro del rango de operación del inversor.

Solución:

1. Cantidad de inversores y paneles:

El sistema requiere 28 paneles de 150 Wp y dos inversores con potencia de 2,100 W.

| Datos iniciales | Fórmula | Unidad | Valor |
|---|--------------------|--------|-------|
| Potencia nominal de instalación (Pt) | Pt | W | 4,000 |
| Potencia del inversor (P inv) | P_{inv} | W | 2,100 |
| Número de inversores y de grupos (G) | $G = Pt / P_{inv}$ | | 2 |
| Potencia máxima CC inversor | $P_{cc\ inv}$ | W | 2,100 |
| Potencia del panel (Pp) | P_p | Wp | 150 |
| Número máx. de paneles de un grupo (Np) | | | 14 |
| Paneles máx. Totales | $N_{pt} = G * N_p$ | | 28 |

2. Número de paneles conectados en serie, paralelo y arranque del sistema: Por cada grupo se tendrán 2 ramales conectados en paralelo con 7 paneles conectados en serie cada ramal, es decir, 14 paneles por grupo.

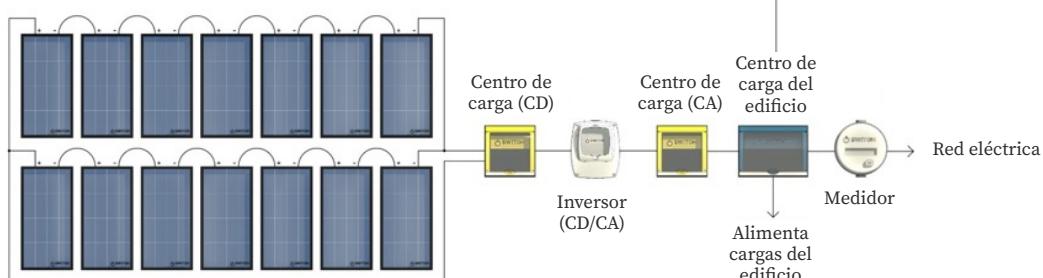
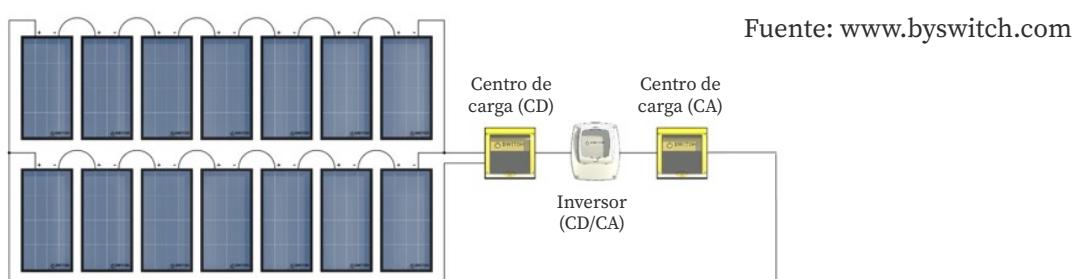
La tensión de los paneles conectados en serie cumple con lo requerido por el inversor.

3. Determinar si el amperaje de los circuitos en paralelo está dentro del rango de operación del inversor.

Debido a que la corriente máxima del inversor es 12V y el arreglo fotovoltaico es de 9V, el voltaje del grupo se encuentra en rango de operación.

| Parámetros | Fórmula | Unidad | Valor calculado | Valor real |
|-------------------------------------|----------------------------|--------|-----------------|------------|
| Número de paneles máx. en serie | $Nps = Vcca\ inv / Vca\ p$ | Piezas | 14 | 14 |
| Número máx. de ramas en paralelo | $Npp = Ic\ inv / Icc\ p$ | Piezas | 2.7 | 2 |
| Total de paneles del grupo | $Np = Nps * Npp$ | Piezas | | Nps 7 |
| | | | | Npp 2 |
| Potencia total del grupo (Pg) | $Pg = Pp * Npp * Nps$ | kW | | 2,100.00 |
| ¿Pg, supera la máxima del inversor? | 2,100 | < | 2,100.00 | |

| Parámetros | Fórmula | Unidad | Valor |
|---|--------------------------|--------|-------|
| Tensión por ramal (string) | $Vramal = Nps * Vp$ | V | 262.5 |
| ¿la tensión (V) del ramal supera la tensión de conexión del inversor (Vcmin)? | 175 | < | 262.5 |
| Corriente del ramal (string) | $Irama = Ip$ | A | 4 |
| Corriente de cortocircuito por ramal (string) | $Icc\ rama = Iccp$ | A | 4.5 |
| ¿Se supera la corriente máxima del Inversor (Ic inv)? | $Iccg = Npp * Icc\ rama$ | A | 9 |
| | 12 | > | 9 |



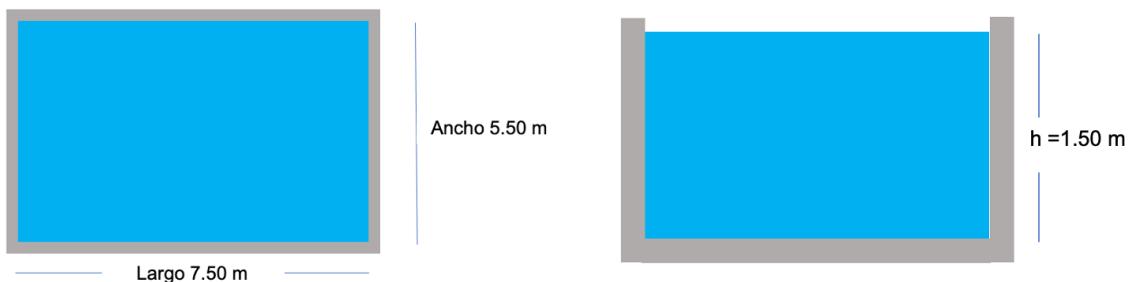
Ejemplo 2.6.4.

Se busca calentar el agua de una alberca a 27 °C a través de una bomba de calor, y satisfacer la demanda de energía de la bomba de calor a través de la generación de energía con paneles fotovoltaicos conectados a la red eléctrica.

1. Determina la capacidad calorífica requerida para calentar la alberca.
2. Selecciona la bomba de calor que satisface la necesidad.
3. Selecciona la caldera de gas Lp que satisface la necesidad.
4. Calcula el consumo eléctrico (kWh) de la bomba de calor, el costo de la electricidad anual si funciona 4 veces por mes y el precio del kWh es de \$5.00.
5. Determina el periodo de recuperación de un sistema fotovoltaico que satisface el 100 % de la demanda eléctrica de la bomba de calor, considerando que el monto de inversión para este sistema es de \$170,000.00, el costo de mantenimiento es cero y el precio del kWh es estable.
6. Calcula el costo anual del consumo de gas Lp si la caldera funciona 4 veces por mes y el precio del litro de gas Lp es de \$6.19.
7. Evalúa el periodo de retorno de inversión del sistema fotovoltaico, considerando el ahorro en el consumo de gas del punto anterior.

Datos:

- La alberca tiene 7.5 m de largo por 5.50 m de ancho y 1.50 m de profundidad.
- La temperatura ambiente es de 15°C.



1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

Solución:

$$\text{Volumen (gal)} = \frac{7.50 \text{ m} * 5.50 \text{ m} * 1.50 \text{ m}}{3.7854}$$

Volumen = 16,345.7 galones

$$\text{Capacidad calorífica (BTU)} = \text{Volumen} * 8.01 \frac{\text{libras}}{\text{galones}} * \Delta\text{temperatura}^{\circ}\text{F}$$

$$\text{Capacidad calorífica (BTU)} = 16,345.7 \text{ galones} * 8.01 \frac{\text{libras}}{\text{galones}} * 21.60^{\circ}\text{F}$$

Capacidad calorífica = 2,828,067.05 BTU

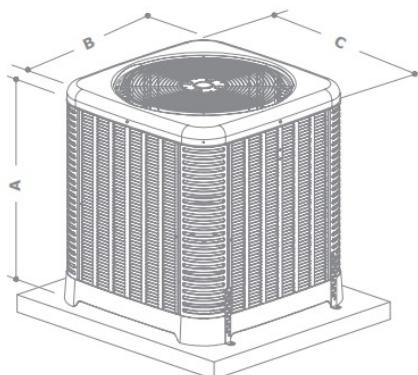
Selección de la bomba de calor

Para obtener la capacidad del equipo que se utilizará para calentar el agua de la alberca, se divide la capacidad calorífica entre el tiempo que se requiere para llegar a la temperatura ideal.

$$\text{Capacidad del equipo (bomba de calor)} = \frac{2,828.067.05 \text{ BTU}}{24 \text{ horas}}$$

Capacidad de bomba de calor = 117,836.13 BTU/hr

En virtud de que la capacidad de la bomba de calor calculada es de 117,836.13 BTU/hr, la bomba de calor seleccionada es de la marca Rheem, modelo M6450TI-E-HC, como se muestra a continuación.



| MODELO | M2450TI-E | M3450TI-E | M4450TI-E | M5450TI-E | M6450TI-E M6450TI-E-PD | M6450TI-E-HC | M8450TI-E M8450TI-E-HC |
|------------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|
| BTU OUT | 48000 | 62000 | 80000 | 103000 | 119000 | 119000 | 140000 |
| BTU OT | 46000 | 60000 | 77000 | 97000 | 113000 | 113000 | 130000 |
| COP 80,80,80 | 6.2 | 5.7 | 6 | 6 | 5.9 | 5.9 | 5.6 |
| COP 80,63,80 | 6 | 5.5 | 5.8 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.3 |
| COMPRESOR | SCROLL | | | | | | |
| REFRIGERANTE | R410A | | | | | | |
| VOLTAJE | 208-230 V-1 Ph- 60 Hz | | | | | | |
| AMP. MÍNIMA DE CIRCUITO | 22 | 29 | 32 | 29.3 | 33.7 | 33.7 | 41.7 |
| TAM. MÁX. INTERRUPTOR (Amps) | 30 | 35 | 40 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| POTENCIA ELÉCTRICA (kW) | 2.3 | 3.2 | 3.9 | 5 | 5.9 | 5.9 | 7.3 |
| INT CALOR | TITANIO | | | | | | |
| FLUJO AGUA (gpm) | 20-40 | 20-40 | 20-40 | 15-60 | 15-60 | 15-60 | 15-60 |
| PESO DE ENVÍO (kg) | 96 | 122 | 136 | 120 | 155 | 155 | 192 |
| DIMENSIONES | | | | | | | |
| A | 25-5/32" (635 mm) | 27-5/32" (689 mm) | 27-5/32" (689 mm) | 39-3/16" (995 mm) | 45-3/16" (114 mm) | 45-3/16" (114 mm) | 45-3/16" (114 mm) |
| B | 30-1/8" (765 mm) | 34-1/8" (866 mm) | 34-1/8" (866 mm) | 35-3/4" (908 mm) | 35-3/4" (908 mm) | 35-3/4" (908 mm) | 35-3/4" (908 mm) |
| C | 30-1/8" (765 mm) | 34-1/8" (866 mm) | 34-1/8" (866 mm) | 35-3/4" (908 mm) | 35-3/4" (908 mm) | 35-3/4" (908 mm) | 35-3/4" (908 mm) |

Ficha técnica en: <https://rheem.wpengine.com/wp-content/uploads/2021/12/FICHA-BOMBA-DE-CALOR-1.pdf>

Análisis de rentabilidad (sistema fotovoltaico), consumo energético y costo de operación eléctrica de la bomba de calor.

Datos:

- o Potencia eléctrica 5.9 kW
- o Operación 24 horas
- o 4 veces al mes en operación
- o Precio \$5.00/kWh

$$\text{Consumo eléctrico anual} = 5.9 \text{ kW} * 24 \text{ h} * 4 \frac{\text{veces}}{\text{mes}} * 12 \text{ meses}$$

$$\text{Consumo eléctrico anual} = 6,796.80 \text{ kWh}$$

$$\text{Costo} = 6,796.80 \text{ kWh} * 5 \frac{\$}{\text{kwh}} = \$ 33,984.00 \text{ al año}$$

$$ROI_{\text{sistema fotovoltaico}} = \frac{\$ 170,000.00}{\$ \frac{33,984.00}{\text{año}}} = 5 \text{ años}$$

Selección de la caldera

$$\text{Capacidad del equipo (caldera de gas)} = \frac{2,828.067.05 \text{ BTU}}{6 \text{ horas}}$$

Capacidad de caldera de gas = 471,344.51 BTU/hr

$$\text{Capacidad calorífica (KCal)} = (\text{Capacidad calorífica BTU/hr}) / 3.9656$$

$$\text{Capacidad calorífica (KCal)} = (471,344.51 \text{ BTU/hr}) / 3.9656$$

Capacidad de caldera de gas = 118,858.30 Kcal/hr

La capacidad entonces es de 118,858.30 Kcal/hr, mientras que la ficha técnica de nuestro equipo seleccionado es de 123,354 Kcal/hr, por lo que, puede cubrir la demanda calorífica.

En virtud de que la capacidad de la caldera calculada es de 471,344.51 BTU/hr, la caldera seleccionada es de la marca Mass-ter-Cal modelo AFJ II 550-C EI-IO, como se muestra a continuación.



| Modelo | Gasto mínimo requerido | | | Frente | Fondo | Diámetro inductor de firo | Altura Total | Entrada y salida de agua | Conexión de gas | Peso |
|--------------------|------------------------|---------|--------|--------|-------|---------------------------|--------------|--------------------------|-----------------|------|
| | Kilocalorías / hr. | Entrada | Salida | | | | | | | |
| | | | | cm | cm | cm | cm | mm | mm | kg |
| AFJ II 450-C EI/IO | 113,400 | 100,926 | 265 | 116 | 91 | 27.9 | 185 | 51 | 19 | 220 |
| AFJ II 550-C EI/IO | 138,600 | 123,354 | 265 | 125 | 91 | 27.9 | 185 | 51 | 19 | 230 |
| AFJ II 650-C EI/IO | 163,800 | 145,782 | 265 | 138 | 91 | 30.4 | 187 | 51 | 19 | 260 |

Esta caldera pertenece a la marca Mass-ter-cal y podemos ver el catálogo completo en el siguiente link:

<https://www.sistemasdefiltracionbajio.com/data/uploads/albercas-y-jacuzzis/calentadores/ficha-calentador-masstercal.pdf>

Consumo y costo anual de gas LP

Para determinar el consumo en litros de gas LP, debemos convertir las Kcal/hr a Kg/h, por lo que realizamos la siguiente conversión:

$$\text{Kilogramos de gas LP por hora (Kg/hr)} = \frac{\text{Kilocalorías de entrada (kcal/hr)}}{11,900}$$

Realizamos la conversión de unidades:

$$\text{Kilogramos de gas LP por hora (Kg/hr)} = \frac{138,600 (\text{kcal/hr})}{11,900}$$

$$\text{Kilogramos de gas LP por hora (Kg/hr)} = 11.65 \text{ kg/hr}$$

Lo multiplicamos por la cantidad de horas que estará funcionando la caldera:

$$\text{Consumo de gas LP (Kg)} = \text{Kilogramos de gas Lp por hora (kg/hr)} * 6 \text{ horas}$$

$$\text{Consumo de gas LP (Kg) por uso} = 11.65 \text{ kg/hr} * 6 \text{ horas}$$

$$\text{Consumo de gas LP (Kg) por uso} = 69.88 \text{ kg}$$

$$\text{Consumo en litros de gas LP por uso} = \frac{\text{Consumo de gas LP (Kg) por uso}}{0.54 \text{ kg/litro}}$$

$$\text{Consumo en litros de gas LP por uso} = \frac{69.88 \text{ kg}}{0.54 \text{ kg/litro}}$$

Consumo en litros de gas LP por uso = 129.41 litros

$$\text{Consumo en litros de gas LP por año} = 129.41 \text{ litros} * 4 \frac{\text{veces}}{\text{mes}} * 12 \text{ meses}$$

Consumo en litros de gas LP por año = 6,211.76 litros al año

$$\text{Costo anual de gas LP} = 6,211.76 \frac{\text{litros}}{\text{año}} * 6.19 \frac{\$}{\text{litro}}$$

Costo anual de gas LP = \$ 38,450.82 al año

$$ROI_{\text{sistema fotovoltaico}} = \frac{\$ 170,000.00}{\$ \frac{38,450.82}{\text{año}}} = 4.42 \text{ años}$$

2.6 Ejercicios propuestos

1. Calcula el pago mensual para una casa en el centro del país que consume 100 kWh mensuales con 150 kWh de promedio mensual en el año.
2. Calcula el pago mensual para una casa en el centro del país que consume 150 kWh mensuales con 300 kWh de promedio mensual en el año.
3. Calcula el pago mensual para una casa en el centro del país que consume 450 kWh mensuales con 350 kWh de promedio mensual en el año.
4. Investiga las tasas para la tarifa 1A y repite los ejercicios 1 a 3 para para una casa en Tamaulipas.
5. Busca el recibo de CFE de tu casa, determina en qué tarifa te encuentras, y realiza el cálculo del pago con la información de tu consumo. Compara con el cobro de CFE.

6. Para los ejercicios 1 a 3, dimensiona un sistema fotovoltaico para minimizar el pago a CFE. Utiliza los paneles y microinversores del ejemplo y considera un cable de 12 AWG con una resistencia de 5.2 Ohm/km. Calcula también el tiempo de retorno.
7. Para una casa que tiene consumos bimestrales de 750 (Ene-Feb), 500 (Mar-Abr), 450 (May-Jun), 350 (Jul-Ago), 650 (Sep-Oct), y 500 (Nov-Dic) kWh, dimensiona un sistema fotovoltaico para salir de tarifa DAC y quedar con un consumo de 2,000 kWh/año. Utiliza los paneles solares del ejemplo, un inversor central con rango de voltaje en MPPT de 200-300 V, y considera un cable de 10 AWG. Calcula el pago resultante mensual, suponiendo que el consumo es homogéneo en los dos meses del bimestre. Por último, calcula también el tiempo de retorno.

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

3. Energía Termosolar

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

3.1 Fundamentos de la energía solar

El Sol es la estrella central del sistema solar y su principal fuente de energía. Es una esfera compuesta principalmente de helio e hidrógeno donde, debido a la intensa fuerza de gravedad, los átomos se acercan lo suficiente como para iniciar una reacción en cadena de **fusión nuclear**. El resultado de esta reacción es una generación neta de energía en forma de fotones. Estos fotones componen el fenómeno de la **radiación electromagnética**; se comportan también como onda con una longitud de onda y dentro de una angosta banda corresponden a la luz visible. La radiación emitida por la fusión en el núcleo solar avanza un camino tortuoso de un millón de años para poder llegar a la superficie donde, ya sin obstáculos, llega en 8.3 minutos a la Tierra.

La energía solar es la base de toda la vida en la Tierra y casi toda la energía que utiliza la humanidad tecnológica es en forma indirecta, energía solar. Los combustibles fósiles provienen principalmente de plantas que vivieron hace 40 millones de años en el carbonífero y crecieron mediante la fotosíntesis; la energía hidroeléctrica aprovecha el agua que se encuentra a mayores alturas y que llegó ahí mediante la evaporación por la radiación solar y una consecuente precipitación. La energía eólica y el viento ocurren debido a las diferencias de temperatura entre norte y sur ocasionadas por la diferente radiación que incide en cada región. Por otro lado, la humanidad ha aprovechado de forma intuitiva esta forma de energía por millones de años, para secar ropa, deshidratar comida, cultivar alimentos, etc.

La cantidad de energía solar que aprovechamos es mínima, ya que la energía de sol que llega a la Tierra en una hora es mayor a toda la energía consumida por la humanidad en un año. Además, la energía solar es ubicua y gratuita, por lo que su aprovechamiento puede reducir en gran medida los conflictos geopolíticos asociados a los recursos fósiles. México es un país privilegiado, ya que cualquier parte del país tiene el doble de radiación solar anual que el punto más soleado de Alemania, además, el desierto de Sonora es la tercera región del planeta con más radiación solar, sólo detrás del desierto de Atacama en Chile y el desierto del Oeste en Australia.

La potencia que irradia el sol e incide sobre una superficie se mide en W/m^2 . En un punto en el espacio exterior a la distancia que se encuentra la órbita terrestre, inciden $1,361 \text{ W/m}^2$, una cantidad conocida como la **constante solar** (GSC) y medida con precisión por los satélites de la NASA. Esta irradiancia debe atravesar la atmósfera para llegar a la superficie terrestre, donde hay pérdidas dependiendo de la altitud, contaminación, nubosidad, estación del año, etc. La cantidad real que llega a la superficie terrestre es en promedio de $1,000 \text{ W/m}^2$, valor que se conoce como **condiciones estándar** (STC, por sus siglas en inglés). La irradiancia se puede medir en tierra mediante dispositivos como el solarímetro, pirhelímetro, piranómetro, y también de manera remota mediante satélites.

La **irradiancia total** (IT) que incide sobre una superficie es igual a la suma de la **irradiancia directa** (ID), que entra sin ningún obstáculo a una superficie con una trayectoria definida; la **irradiancia difusa** (IS), que es absorbida por las nubes, que la vuelven a emitir con una intensidad menor y sin una trayectoria definida, y el albedo o **irradiancia reflejada** (IR), que incide en cualquier superficie y luego es reflejada. Lo mismo es válido para la radiación (RT, RS, RR) (figura 3.1).

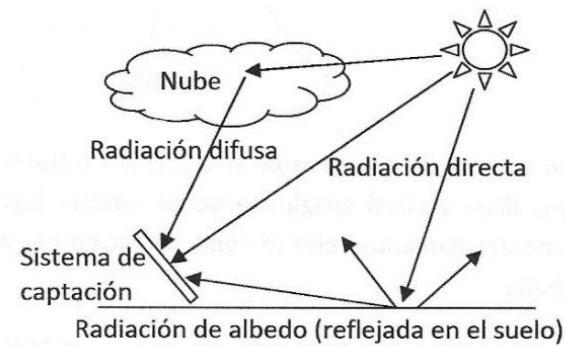


Figura 3.1. Componentes de la radiación solar (Edalia Barcelona, s.f.).

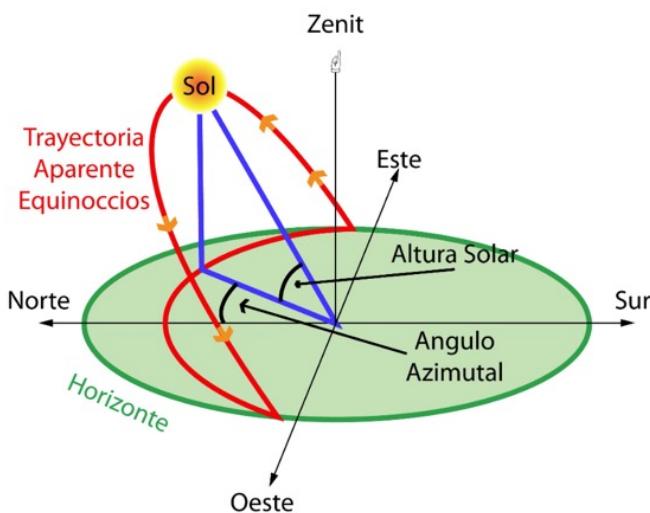


Figura 3.2. Acimut y altura solar (Maril, 2011).

La irradiancia recibida no es constante en tiempo ni en espacio. La Tierra tiene un movimiento de **rotación** que da lugar al día y la noche y ocasiona un movimiento del sol aparentemente circular sobre la **bóveda celeste**. El sol sale por el este y se pone por el oeste, pasando por el sur en el hemisferio norte y por el norte en el hemisferio sur. Al llegar al sur en el **mediodía solar**, el sol se encuentra en el **cénit solar** (a veces escrito como zenith), es decir, en el punto más cercano a la normal del plano del horizonte. La posición del sol en la bóveda celeste se puede determinar mediante dos ángulos análogos a unas coordenadas esféricas. El **acimut** (α) (a veces escrito como azimut) mide el ángulo horizontal a partir del sur y en sentido contrario a las manecillas del reloj, es decir, determina el Norte, Sur, etc. La **altura solar** (β) es el ángulo vertical que se mide desde el horizonte hasta el céñit, que es el punto ubicado en la normal del plano del horizonte (figura 3.2).

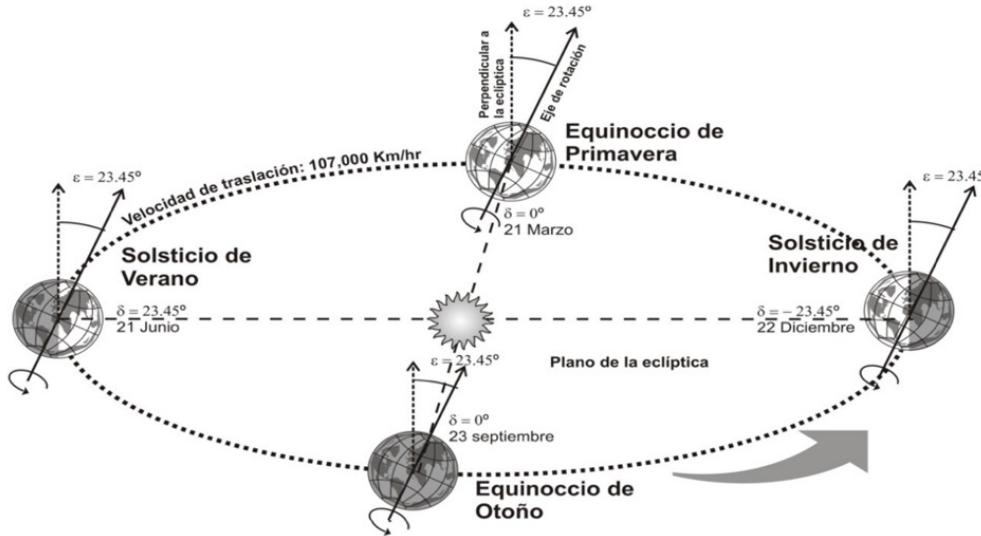


Figura 3.3. Comportamiento de la declinación solar (Tejeda Martínez y Gómez-Aspeitia, 2015).

La Tierra completa un movimiento de **traslación** alrededor del sol, siguiendo la órbita terrestre. La órbita de los planetas es elíptica, por lo que la distancia con respecto al sol es variable. Sin embargo, en el caso de la Tierra la excentricidad es mínima y entonces la constante solar tiene variaciones mínimas en el año. Debido a la curvatura de la Tierra, la altura solar es menor conforme aumenta la **latitud** (φ). Por otro lado, el Ecuador terrestre no es paralelo a la eclíptica, que es el plano de la órbita terrestre. El ángulo que forman el Ecuador y la eclíptica es de 23.45° y da lugar a la **declinación solar**. Debido a este ángulo, la altura solar en el céntit solar varía a lo largo del año, llegando a una declinación solar (δ) máxima de 23.45° en el solsticio de verano y coincidiendo con el día más largo del año, pasando por 0° en los equinoccios de primavera y otoño donde el día y la noche tienen la misma duración, llegando a -23.45° en el solsticio de invierno, en el día más corto del año (figura 3.3). La altura solar en el céntit solar (β_c) es el ángulo complementario de la latitud menos la declinación solar.

$$\beta_c = 90^\circ - \varphi - \delta$$

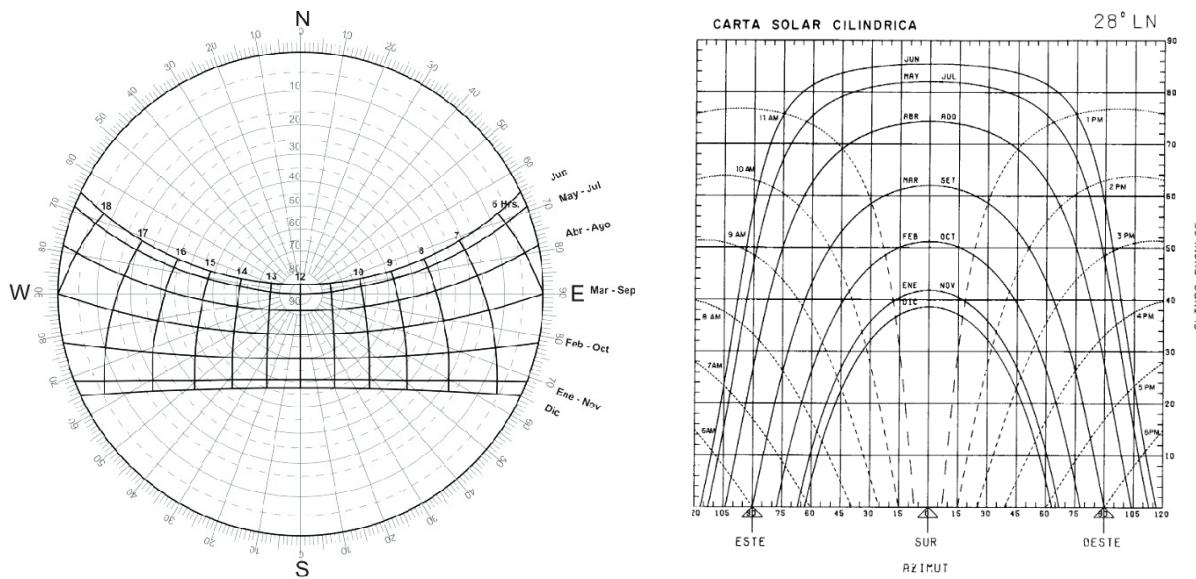


Figura 3.4. Izquierda: gráfica solar polar (Tejeda Martínez y Gómez-Aspeitia, 2015), derecha: gráfica solar cilíndrica (Arquitectura Pura, s.f.).

Una **gráfica solar** representa la trayectoria que sigue el sol durante un día determinado, o durante varios días representativos del año (figura 3.4). Una **gráfica solar cilíndrica** (figura 3.4, izquierda) representa un plano cartesiano donde el eje horizontal es el acimut y el vertical es la altura solar, mientras que una **gráfica solar polar** (figura 3.4, derecha) representa el acimut en el argumento o eje angular, y la altura en el eje radial, donde en el origen se encuentra una altura de 90° y a intervalos regulares disminuye la altura solar hasta llegar a 0° . Existen múltiples programas para generar gráficas solares para cualquier ubicación en la Tierra⁶.

Es importante recordar que la potencia es un valor instantáneo, mientras que la energía es a lo largo de un periodo de tiempo. Dicho de otra forma, la potencia es la derivada en el tiempo de la energía, o la energía es la integral en el tiempo o el área bajo la curva de la potencia. La **irradiancia** o irradiación (I) es un tipo de potencia y sus unidades son W/m^2 o kW/m^2 , mientras que la **radiación** (R) es un tipo de energía y sus unidades son kWh/m^2 . Calcular la energía

⁶ <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html>, <https://drajmarsh.bitbucket.io/sunpath2d.html>, <https://drajmarsh.bitbucket.io/sunpath3d.html>

que podemos aprovechar a lo largo de un año es complicado debido a la constante variación de la irradiancia. Para poder simplificar el cálculo se pueden hacer dos cosas: la primera es dar un valor promedio de irradiancia en un periodo de tiempo diario, mensual, o anual, tal que la radiación, o el área bajo la curva sea igual a que se tendría con una irradiancia variable. De esta manera la radiación en el periodo se obtiene multiplicando la irradiancia por la longitud del periodo. Es importante cuidar la concordancia de las unidades.

$$R = I\Delta t$$

La segunda opción es utilizar las **horas pico de sol** (HPS), u horas solares pico (figura 3.5). Las HPS suponen una irradiancia igual a las STC (1 kW/m^2), por lo que se obtiene una duración en horas en la cual la radiación resultante sea igual a la que se tendría con una irradiancia variable. En este caso la radiación es igual a las horas pico de sol, ya que la irradiancia en STC es unitaria cuando se utilizan kW/m^2 .

$$R = HPS$$

La Ciudad de México recibe un promedio de 6.35 kWh/m^2 cada día⁷, que equivale a 6.35 HPS.

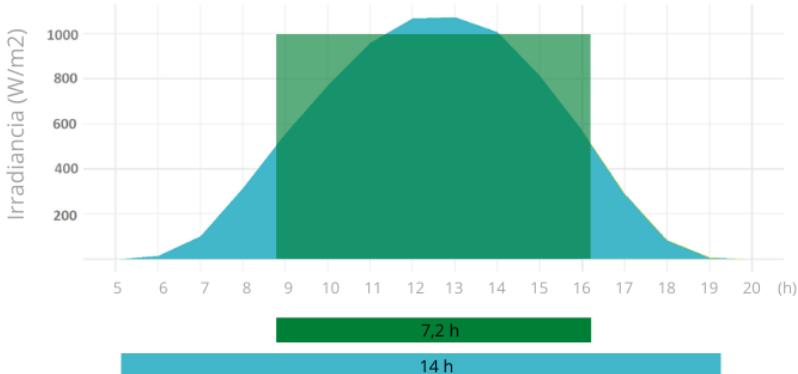


Figura 3.5. Horas pico de sol (Helioesfera, s.f.).

⁷ Base de Datos Nacional de Radiación Solar de Estados Unidos (NSRDB).

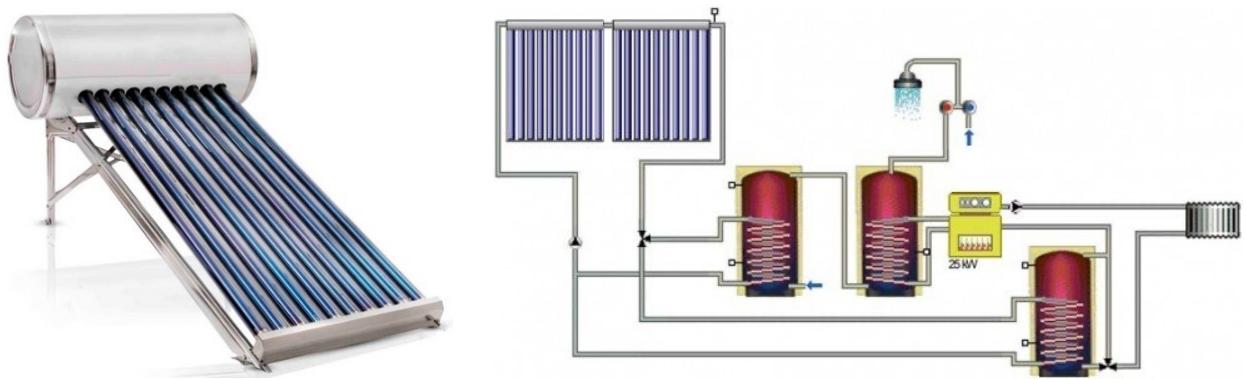


Figura 3.6. Izquierda: kit termosolar (Bricomark, s.f.), derecha: instalación con sistemas separados (Ecofener, s.f.).

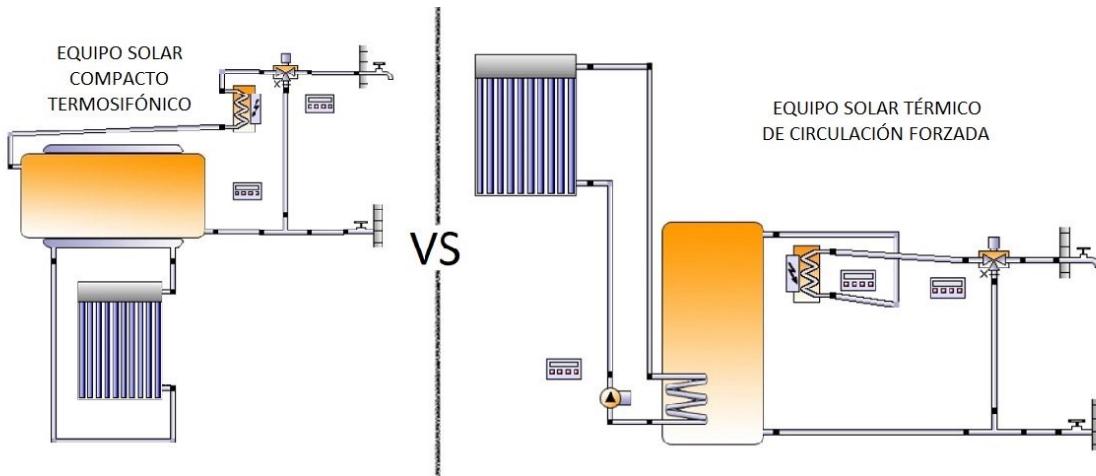


Figura 3.7. Circulación por termosifón (derecha) y circulación forzada (izquierda) (Ecofener, 2020b). El esquema por termosifón mostrado también es un sistema directo, mientras que el esquema de la derecha es un sistema indirecto, o con intercambiador de calor.

3.2 Clasificación de los sistemas termosolares

Las instalaciones termosolares pueden ser muy diversas de acuerdo con el tipo de aplicación que tienen. Sin embargo, la inmensa mayoría de las instalaciones se utilizan para proveer de **Agua Caliente Sanitaria** (ACS) para hogares

y negocios y corresponden a un subconjunto muy acotado de las posibles tipologías. La primera clasificación corresponde a la disposición del conjunto de subsistemas. Un **kit termosolar**, instalación todo en uno, o **calentador solar**, son el tipo de instalaciones más comunes en hogares y pequeños comercios (figura 3.6, izquierda). En estas hay un solo producto que incluye casi todos los componentes de la instalación. En cambio, para mayores demandas de calor, se utilizan sistemas separados, donde cada componente de la instalación es un elemento individual (figura 3.6, derecha).

Otra posible clasificación es por la temperatura de trabajo. En las instalaciones de **baja temperatura** como las residenciales la temperatura es menor a 100 °C y no hay ebullición, en las industriales de **media temperatura** puede llegar a haber vapor (100-200 °C), y, por último, las aplicaciones de **alta temperatura** superan los 300 °C y son reservadas casi exclusivamente para la energía solar termoeléctrica.

Adicionalmente, los sistemas se clasifican por su sistema de circulación. En un sistema de **termosifón** la circulación de agua entre el colector que la calienta y el tanque que la almacena se da de manera natural, debido a la diferencia de densidades causadas por la diferencia de temperaturas (figura 3.7., izquierda). Para que esto funcione debe de existir una diferencia de alturas para aprovechar la estratificación térmica, donde el agua fría desciende y la caliente asciende. Prácticamente todos los sistemas de termosifón son kits termosolares. Por otro lado, en los sistemas de **circulación forzada** existe una bomba de recirculación que genera el movimiento, aunque no haya una diferencia de nivel (figura 3.7, derecha).

Otra posible categorización es por el sistema de intercambio de calor. En un **sistema directo** el fluido (generalmente agua) que recibe el calor en el colector solar es el mismo que tiene el uso final, para ACS, por ejemplo (figura 3.7, izquierda).

Los sistemas directos casi siempre son de baja temperatura y no están diseñados para extremos de temperatura ambiental donde puede haber congelación. La mayoría de los kits termosolares tienen sistemas directos, aunque

algunos kits de alta presión son indirectos. En un **sistema indirecto**, hay un **fluido caloportador** (como agua con glicerina) que recibe la radiación y luego se lo entrega al fluido de uso final en un intercambiador de calor (figura 3.7, derecha). La gran mayoría de los sistemas de media y alta temperatura son indirectos, asimismo, los sistemas para albercas olímpicas y semiolímpicas suelen ser de este tipo para evitar problemas de corrosión.

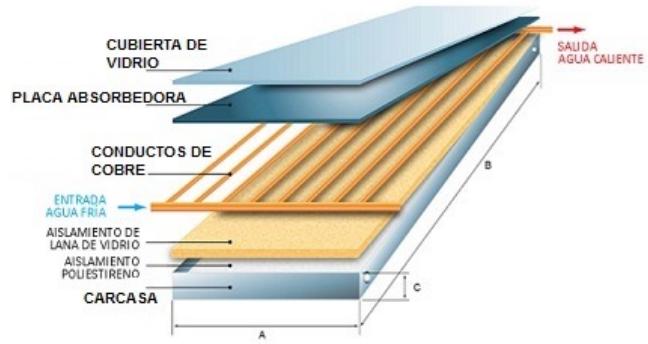


Figura 3.8. Izquierda: colectores de capa plana (Ecofener, 2020a), derecha: componentes de un colector (Rodríguez Galbarro, s.f.).

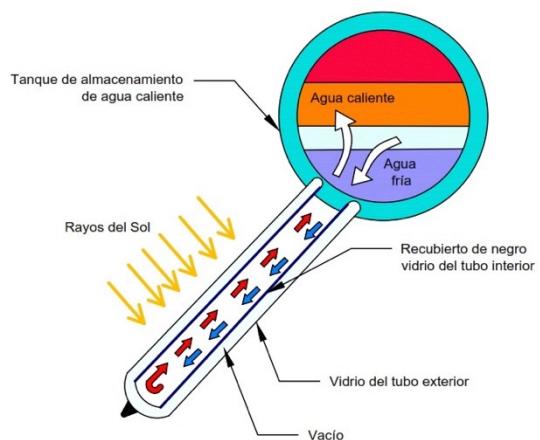


Figura 3.9. Izquierda: colectores de tubo (Álvarez, 2021), derecha: principio de funcionamiento (Sopelia, 2017).

3.3 Componentes de un sistema termo solar

Colector solar

El elemento fundamental de un sistema termosolar es el captador solar. Su función es recibir la radiación solar incidente en una cierta superficie y convertir el calor radiante en calor sensible que será absorbido por el fluido caloportador. Existen cuatro tipos principales de colectores solares.

Los **colectores planos** (figura 3.8, izquierda) se componen de una caja contenadora con un frente de vidrio y un fondo de material aislante, una placa absorbente de metal (generalmente cobre) recubierto de un acabado de gran absorbancia, dos tubos colectores que corren en paralelo en extremos opuestos del colector, y una red de tubos intercambiadores que corren de un tubo colector a otro (figura 3.8, derecha). El agua entra por un tubo colector y sale por el otro, pasando por los tubos intercambiadores que tienen un diámetro muy pequeño para generar grandes pérdidas de presión que llevan a un flujo laminar de muy baja velocidad, maximizando la absorción de calor. Los colectores planos difícilmente alcanzan temperaturas mayores a 60 °C.

Los **colectores de tubos evacuados** (figura 3.9, izquierda) consisten en dos tubos de vidrio borosilicatado (para resistir choques de temperatura), uno dentro del otro y con vacío entre ellos, para permitir el ingreso de la radiación, pero evitar el escape del calor sensible (figura 3.9, derecha). El tubo interno está abierto en un extremo, donde entra el agua fría por la parte inferior de la sección del tubo y sale el agua caliente por la sección superior en un sistema de termosifón. La salida del tubo se debe colocar a una altura mayor al extremo tapado para un correcto funcionamiento. Estos sistemas alcanzan mayores temperaturas de trabajo (~70°C), pero son poco resistentes a la presión hidráulica.

Una variante de los tubos evacuados son los **tubos con heat pipe** (figura 3.10, izquierda). En este caso, en el lado de salida del tubo se encuentra una tapa de cobre de la cual sale un tubo hueco del mismo material que recorre todo el interior del tubo evacuado. En el tubo evacuado no hay agua, solo aire,

mientras que el interior del tubo de cobre tiene un líquido no tóxico de alta capacidad térmica. El aire se calienta con la radiación, lo que a su vez calienta la varilla de cobre que transmite el calor al extremo del tubo mediante el líquido en su interior. Estos sistemas pueden alcanzar temperaturas cercanas a la ebullición en días muy soleados y también resisten altas presiones.



Figura 3.10. Izquierda: Principio de funcionamiento de los tubos heat pipe (Refrinoticias, 2014), derecha: colectores solares de plástico para albercas (Abha Albercas, s.f.).

Por último, los sistemas con **colectores de plástico** (figura 3.10, derecha) alcanzan bajas temperaturas ($\sim 30^{\circ}\text{C}$), pero tienen la ventaja de ser resistentes a la corrosión del cloro de las albercas. También pueden resistir la carga de una persona caminando sobre ellos, lo que permite una mayor accesibilidad a la azotea del edificio donde se coloquen.

Tanque de acumulación

El **tanque de acumulación** (figura 3.11) debe tener un aislante, generalmente de poliuretano o poliestireno extruido, que permita almacenar el agua caliente durante varias horas y tener una pared metálica con la resistencia adecuada para la presión de trabajo. El tanque ideal es un cilindro vertical, como el de un boiler de acumulación, para permitir tener una **estratificación térmica** donde la salida del tanque hacia el uso se encuentre en su parte superior y la

entrada desde el colector solar se encuentre en la parte inferior. Sin embargo, en casi todos los kits termosolares el tanque acumulador es horizontal para tener un sistema más compacto. El volumen del tanque de acumulación debe ser suficiente para la dotación diaria de agua caliente que se requiera. Para sistemas de albercas, esta funge como el tanque de acumulación.

Intercambiador de calor

El **intercambiador de calor** no está presente en sistemas directos, mientras que, en los directos, sobre todo a mayor demanda de agua caliente, es un componente fundamental. El intercambiador puede ser de **serpentín** (figura 3.11) y encontrarse dentro del tanque de almacenamiento. Por el serpentín circula el fluido caloportador que circula en el colector solar, este serpentín se suele conocer como **circuito primario**, mientras que el fluido que se va a utilizar directamente se encuentra en el **circuito secundario**, compuesto por el tanque de acumulación y el sistema de distribución.



Figura 3.11. Tanque acumulador con detalle de intercambiador de calor interno de serpentín (Guangzhou Sst Heating Energy Co., s.f.)

En sistemas más grandes se tiene un intercambiador externo que suele ser de **placa** (figura 3.12). El diseño y selección del intercambiador contempla las temperaturas de entrada y salida de los circuitos primario y secundario en función del gasto en cada uno.

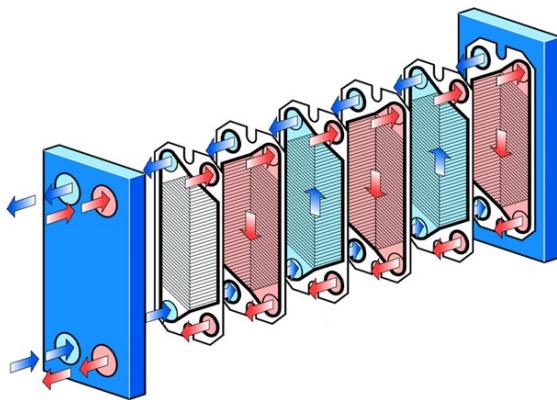
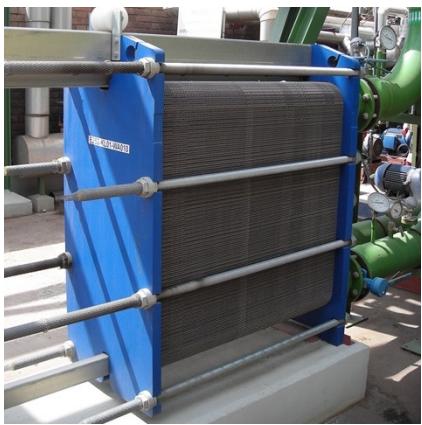


Figura 3.12. Izquierda: intercambiador de calor de placas (Negre, s.f.), derecha: principio de funcionamiento (Tecnigrado, 2021).

Sistema de control

En un sistema de circulación forzada es necesario tener un monitoreo de las diferencias de temperatura para decidir activar o no la circulación en el circuito primario. El sistema más sencillo mide la temperatura en dos puntos mediante termostatos: en un sistema directo se mide a la entrada y salida de los colectores, mientras que en uno indirecto se mide la temperatura del fluido caloportador a la entrada del intercambiador y la temperatura en el fondo del tanque acumulador. Cuando la diferencia de temperatura supera 5-10 °C, se enciende la circulación y cuando llega a 3-5°C se apaga. Esto es realizado por un **controlador solar** (figura 3.13), que se puede programar por horas, por diferencia de temperatura, u operar de manera manual. Es importante también verificar la temperatura mínima en el colector para evitar problemas por congelamiento.



Figura 3.13. Controlador solar para alberca con termostatos (ACF Industria, s.f.)

Para el caso de ACS en grandes proyectos, como edificios departamentales, hotelería, deportivos, etc., debe haber una circulación constante de bajo gasto en el sistema de distribución. Esto se realiza para evitar posibles problemas por **legionelosis**, una bacteria que se multiplica en agua estancada entre 50 y 60 °C.

Sistema de protección

El incremento de temperatura del fluido ocasiona una expansión de este y un consiguiente aumento de la presión. El **sistema de alivio** de presión puede ser abierto, si hay una parte del circuito hidráulico que se encuentre expuesto a la atmósfera y funcione como un piezómetro, cuyo nivel varía y mitiga los cambios de volumen. La principal solución de este tipo puede ser un **jarro de aire**, que es un pedazo de tubería vertical cuyo extremo superior tenga una curvatura (para evitar ingreso de suciedad) y una apertura al final; el punto más alto del jarro de aire debe estar más arriba que la carga que se obtendría por presión estática (más alto que el tinaco, por ejemplo). Para kits termosolares de alta presión también se puede utilizar una **válvula de seguridad** para calentador de gas, la cual expulsará vapor en caso de tener un sobrecalentamiento del sistema. En un kit de baja presión siempre debe usarse un jarro de aire porque la válvula de seguridad aumentará la presión de trabajo hasta superar el valor de diseño del tanque y de los tubos evacuados.



Figura 3.14. Vaso de expansión (tanque rojo) (Guía de la calefacción, 2020)

Por otro lado, en un sistema cerrado, las expansiones se amortiguan en un **vaso de expansión** (figura 3.14), que tiene dos secciones separadas por una

membrana flexible; en un lado se encuentra el fluido y en el otro se tiene aire, como en el tanque de un hidroneumático. Estos sistemas se utilizan para instalaciones de todo un edificio o industriales donde las presiones de trabajo son mayores y es importante cuidar la calidad del agua.

En lugares donde la temperatura nocturna baja a los 0 °C se debe contemplar utilizar un fluido caloportador con bajo punto de congelación, como el agua con glicerina. En caso contrario se debe tener un **sistema de protección por congelamiento**, que suele vaciar el circuito primario y almacenar el fluido caloportador en un tanque protegido de la intemperie.

Sistema de distribución

El sistema de distribución tiene las características y se diseña como un sistema hidrosanitario convencional, contemplando que el agua caliente tiene una menor densidad, viscosidad, y menores pérdidas por presión. Para las tuberías expuestas a la intemperie es importante la selección del material. El cobre debe evitarse por su alta conductividad del calor, mientras que si se utiliza PVC hidráulico debe procurarse aislar la tubería. Materiales como el PP-R por termofusión son la solución ideal debido a que su espesor conlleva a unas pérdidas de temperatura aceptables.

El sistema de distribución también contempla todas las válvulas de paso, check, de tres vías, etc., que puedan ser necesarias en la ingeniería de detalle.

3.4 Dimensionamiento de un sistema residencial para ACS

La selección de un calentador solar residencial es un proceso sencillo que no suele requerir una memoria de cálculo extensa. En primer lugar, debe determinarse la presión de trabajo de la instalación hidráulica para seleccionar el tipo adecuado de calentador solar. Una instalación de baja presión, como en el caso de una instalación alimentada por un tinaco, tiene una columna de agua de 2 a 5 m (1 m de columna de agua = 0.1 kg/cm² de presión estática),

mientras que un valor superior es de alta presión, como en el caso de una instalación con hidroneumático. Los tubos evacuados son de baja presión, mientras que los colectores de cama plana, los tubos heat pipe o los tubos evacuados con intercambiador de serpentín son adecuados para alta presión.

El siguiente paso consiste en determinar la **dotación de ACS** por habitante. Un habitante en una vivienda requiere 40 L de ACS a 45 °C por día para ducharse. El volumen del tanque de almacenamiento deberá ser igual o ligeramente menor a la dotación total de todos los habitantes de la vivienda. La superficie del colector o número de tubos, en el caso de los calentadores de tubos evacuados, deberá haber sido dimensionado previamente por el fabricante para captar una cantidad adecuada de radiación solar. Para una vivienda unifamiliar, la cantidad de habitantes que multiplicada por 40 da la dotación diaria, se conoce como cantidad de servicios. Por ejemplo, una casa con 4 habitantes tendrá 4 servicios. En caso de lavar los trastes o la ropa con agua caliente se debe agregar un servicio adicional. El uso constante de agua caliente en un lavabo cuenta como medio servicio.

Para la dotación (D_T) en una temperatura $T > 45^\circ\text{C}$ se usa la siguiente fórmula:

$$D_T = \frac{45 - T_0}{T - T_0} D_{45^\circ\text{C}}$$

Donde T_0 es la temperatura inicial del agua fría.

La **demandas de energía térmica** (Q) está en función de la capacidad calorífica c_p (4,181 J / kg K a 45°C), de la densidad del agua (0.99 kg/l a 45°C):

$$Q = (45 - T_0) D_{45^\circ\text{C}} \rho_{45^\circ\text{C}} c_p$$

La dotación para diferentes usos se presenta en la siguiente tabla, extraída de la norma española UNE94002:2005:

| Criterio de demanda | Consumo por persona (l / día) |
|--|----------------------------------|
| Vivienda | 40 |
| Hospitales y clínicas | 80 |
| Ambulatorio y centro de salud | 60 |
| Hotel 5 estrellas | 100 |
| Hotel 4 estrellas | 80 |
| Hotel 3 estrellas | 60 |
| Hotel/Hostal 2 estrellas | 50 |
| Camping | 30 |
| Hostal/Pensión 1 estrella | 40 |
| Residencia (ancianos, estudiantes, etc.) | 60 |
| Centro penitenciario | 30 |
| Albergue | 35 |
| Vestuarios/Duchas colectivas | 30 |
| Escuela sin duchas | 6 |
| Escuela con duchas | 30 |
| Cuartellos | 40 |
| Fábricas y talleres | 30 |
| Oficinas | 3 |
| Gimnasios | 30 |
| Restaurantes | 12 |
| Cafeterías | 2 |

Ejemplo 3.4.1.

Calcula la dotación de ACS a 45°C y a 60°C y la demanda de energía para 50 viviendas con 4 personas cada una, si la temperatura del agua de la red es de 15°C.

En total se tienen 200 personas, que consumen 40 l/día, lo que da una dotación total de 8,000 l/día a 45°C. A 60°C. Se hace el siguiente cálculo:

$$D_{60^\circ\text{C}} = \frac{45 - 15}{60 - 15} 8,000 = 5,333 (\text{l/día})$$

La demanda de energía térmica se calcula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} Q &= D_{45^\circ\text{C}} \rho_{45^\circ\text{C}} c_p = (45 - 15) 8,000 \cdot 4,181 \cdot 0.99 = \\ &= 993,405,600 [\text{J}] = 993.4 [\text{MJ}] \end{aligned}$$

La orientación ideal para un colector solar es con un acimut de 0° (Sur) y una inclinación igual a la latitud del lugar. Para un calentador solar se debe procurar que las pérdidas por sombras, es decir, el porcentaje de radiación solar a lo largo de un día y del año que es bloqueado por algún obstáculo no supere 15 %, y que idealmente se encuentre en no más de 5 %. Las pérdidas por sombras son mucho mayores en verano y a medio día, por lo que deben evitarse obstáculos de gran altura en el sur. Para instalar un kit termosolar se suele hacer una inspección visual del obstáculo, ya que no es viable económicamente hacer el procedimiento completo.

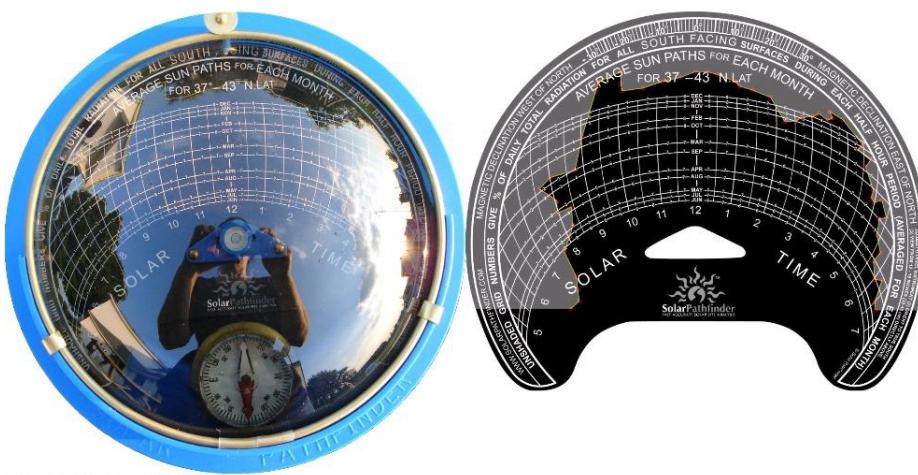


Figura 3.15. Uso del Solar Pathfinder® para determinar las pérdidas por sombreadamiento (Solar Pathfinder, s.f.).

Para un cálculo más detallado se debe utilizar una gráfica solar y determinar las horas y épocas del año en que hay sombras. El procedimiento detallado se explica en el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios de España (RITE) y también es aplicable para sistemas fotovoltaicos. En campo,

las sombras se obtienen con el uso de equipo como el *Solar Pathfinder*^{®8} (fig. 3.15) y en escritorio se pueden modelar con la aplicación web *Dynamic Overshadowing*⁹. En caso de tener una orientación e inclinación diferente a la ideal se puede calcular el porcentaje siguiendo un procedimiento similar al descrito en el capítulo de energía fotovoltaica.

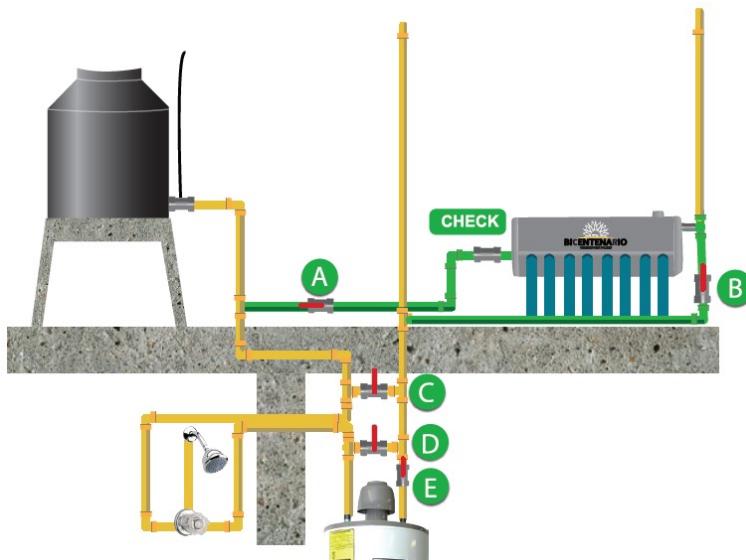


Figura 3.16. Esquema de conexión para un calentador de baja presión (Calentadores Bicentenario, s.f.). A, y B son las válvulas de paso antes y después del calentador. C y D son las válvulas que permiten realizar el bypass, E es la válvula de paso antes del boiler, y las tuberías verticales que sobrepasan la altura del tinaco son los jarros de aire.

Es importante que antes de la entrada del calentador solar de baja presión se encuentre primero una **válvula de paso** y luego un jarro de aire (figura 3.16). A la salida se coloca una **válvula check** y luego otra llave de paso. Un **bypass** consiste en un tramo de tubería y un juego de llaves que permite que el flujo de agua no pase por el calentador solar o por el boiler de gas. Esto es especialmente útil para ahorrar más energía en verano o para dar fácil mantenimiento al calentador solar. En el caso de una instalación de alta presión se sustituye el jarro de aire por la válvula de seguridad.

⁸ <http://www.solarpathfinder.com>

⁹ <https://drajmarsh.bitbucket.io/shading-box.html>

Es posible tener una instalación residencial que dependa únicamente del calentador solar, e incluso en días nublados se tendrá agua caliente, aunque a una menor temperatura. Sin embargo, en un día con un cielo muy cubierto o en una racha de días nublados, es posible que los habitantes tengan que bañarse con agua fría. Para evitar esto se puede utilizar un **boiler de respaldo**. En este caso el agua pasará del tinaco al calentador solar, después al boiler y finalmente a las regaderas y servicios. Si entra agua caliente al boiler o calentador de gas, el termostato la detectará y no prenderá el quemador, generando un ahorro. Si por el contrario el agua no tiene la temperatura adecuada, sólo utilizará la energía necesaria para calentarla al punto debido, lo que también incide en un menor uso de gas.

Existen **calentadores de paso de rápida recuperación** que son muy sencillos y no tienen termostato, que siempre se prenderán, aunque el agua entre caliente, por lo que no se deben usar con un calentador solar. Los **calentadores de tanque** (figura 3.17, izquierda) también son poco eficientes en conjunto con calentadores solares, ya que se tienen dos tanques de acumulación, y el del boiler que es muy poco eficiente y en pocas horas pierde la energía acumulada durante el día por el captador, teniendo que prenderse continuamente para mantener el agua en la temperatura adecuada. El tipo de calentador ideal es el **calentador de paso** (figura 3.17, derecha), que tiene un depósito pequeño y un gran quemador, y es capaz de respaldar al calentador solar cuando no haya suficiente radiación.

Si únicamente se agrega un calentador solar a un sistema que ya tiene un boiler de tanque, se pueden alcanzar ahorros de 60 % en el consumo de gas. Si además se cambia el boiler de tanque por uno de paso, el ahorro podría llegar a 80 %. Sin embargo, estos valores continuamente promocionados por los instaladores de sistemas termosolares se refieren al ahorro en consumo de gas asociado al ACS. El gas asociado a la preparación de alimentos en estufa puede llegar a ser un porcentaje grande del consumo total dependiendo de los hábitos familiares, disminuyendo así el ahorro total en consumo de gas. Además, es difícil monitorear el consumo de gas y sólo se puede hacer en tiempo real para toda la vivienda en caso de tener gas natural, por lo que no suele hacerse un tiempo de retorno detallado como en el caso de un sistema

fotovoltaico. De cualquier manera, el precio del gas es altamente volátil y los calentadores solares son muy económicos, por lo que fácilmente se puede recuperar la inversión en uno o dos años.



Figura 3.17. Izquierda: calentador de tanque (Plomería y Cerámica de Querétaro), de 1 a 1.5 m de altura, derecha: calentador de paso (Altek, s.f.), de alrededor de 50 cm de alto.

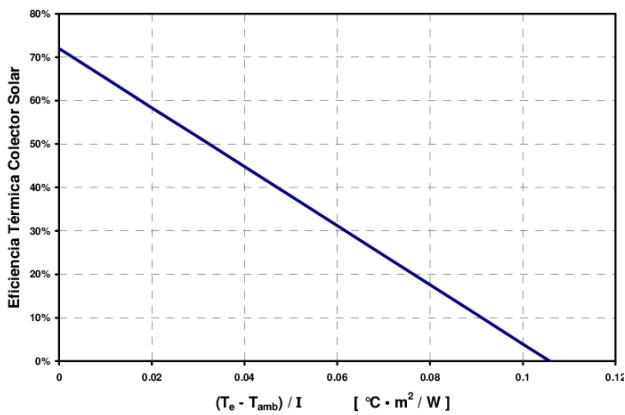


Figura 3.18. Izquierda: instalación termosolar de gran escala (VISIONsolar, s.f.), derecha: curva de rendimiento típica para un colector solar (Martín-Domínguez y Alarcón-Herrera, 2004).

Para instalaciones más grandes (figura 3.18 izquierda) donde se usa un sistema con componentes individuales se debe realizar el diseño térmico e hidráulico de la instalación. Un colector solar tiene dos curvas características, la curva de eficiencia térmica (figura 3.18, derecha), donde en el eje vertical se tiene la eficiencia y en el horizontal la diferencia de temperatura entre la irradiancia solar. La otra curva es la de pérdida de carga, donde se tiene la caída de carga

hidráulica en función del gasto. El dimensionamiento de la superficie de captación se realiza con el método **f-Chart**, donde a partir de las demandas totales mensuales de ACS y la eficiencia térmica del colector se hace el ajuste a una ecuación adimensional del sistema termosolar. Para ver el procedimiento de cálculo detallado se dirige al lector a la referencia (Salgado, 2010). El cálculo hidráulico se basa en determinar la curva del sistema y la curva de operación de la bomba de recirculación para encontrar el punto de operación. En el circuito de distribución se calcula el gasto de la red utilizando un factor de carga multiplicado por todos los muebles hidrosanitarios que se tengan. El cálculo hidráulico se puede realizar de la manera tradicional para instalaciones hidráulicas mediante el uso de nomogramas o mediante software de simulación que involucre la evaluación de las ecuaciones hidráulicas.

3.5 Aplicaciones no residenciales de la energía termo solar

El otro uso común del agua caliente en edificios es para la calefacción hidráulica, donde convencionalmente se calienta agua en una caldera o boiler y se distribuye por un sistema hidráulico a radiadores o sistemas hidrónicos de piso (figura 3.19). La caldera puede sustituirse por un sistema termosolar y comportarse de la misma manera. El diseño hidráulico contempla la curva del sistema y la curva de operación de la bomba de recirculación, el cálculo de la caída de temperatura por metro de tubería, y para los radiadores la potencia emitida y la temperatura de salida de acuerdo con la temperatura de entrada y el gasto del sistema.

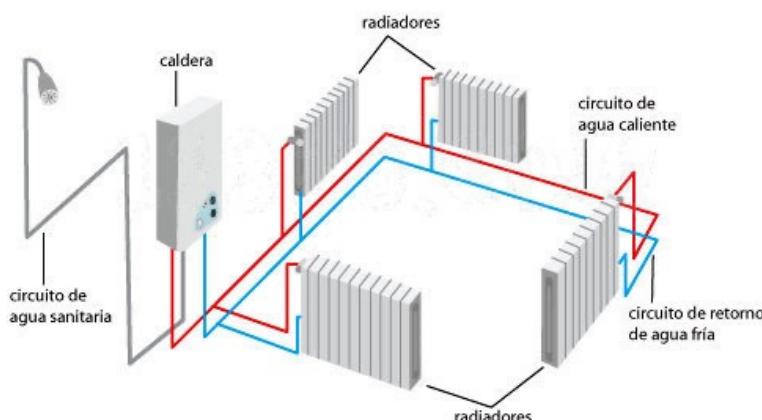


Figura 3.19. Izquierda: circuito de calefacción hidráulica, la caldera se puede sustituir por un sistema termosolar (Markel, s.f.)

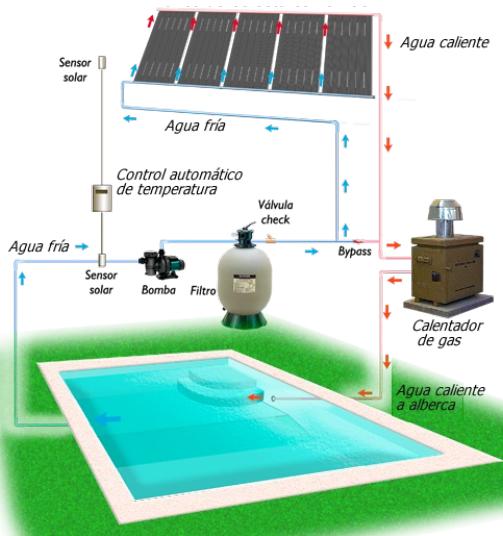


Figura 3.20. Izquierda: Alberca con calentadores solares (Davis Davis & Associates, s.f.), derecha: esquema de funcionamiento (Movergy, s.f.).

Así como se puede graficar la caída de presión empezando en la salida de la bomba y terminando en la entrada, donde la diferencia entre estos dos puntos debe ser la energía suministrada por la bomba, se debe hacer la gráfica de la caída de temperatura, donde las pérdidas por disipación de calor son análogas a las pérdidas por fricción, se tienen caídas inmediatas en la ubicación de los radiadores como si fuera una llave con gran constricción, y la diferencia de temperatura entre la salida del intercambiador de calor y la entrada es igual a la energía entregada por todo el sistema fotovoltaico. Por lo general, las temperaturas de salida y entradas deben ser iguales para todos los radiadores y la potencia emitida será ajustada variando el gasto. Como el gasto puede ser variable en la red, se sigue un enfoque de factor de carga similar al diseño de las otras redes hidráulicas en un edificio.

Un sistema termosolar también se puede utilizar para sustituir la caldera de una alberca (figura 3.20, izquierda); los sistemas siempre serán de circulación forzada utilizando la bomba de recirculación de la alberca (figura 3.20, derecha). El respaldo puede ser una bomba de calor o una caldera de menor tamaño. Para albercas olímpicas la gran demanda energética suele obligar a que los captadores solares cubran sólo una fracción y que el resto sea cubierto por la caldera o bomba de calor. En un sistema directo, utilizado

en albercas residenciales, el agua sale de la alberca por el retorno, pasa por la bomba, el filtro de arena, una válvula check, por el sistema de colectores, la caldera y finalmente regresa a la alberca; es muy importante contar con un bypass para pruebas y mantenimiento.

La mayoría de los instaladores de albercas residenciales utilizan un método similar al de las calderas, donde se utilizan tablas o programas sencillos provistos por los programas que relacionan la superficie de la alberca, el volumen, si está en sol o sombra, si usa cubierta, y la ubicación para determinar la carga de calentamiento y la cantidad de paneles (usualmente de plástico en sistemas directos) que son necesarios. Otra opción de cálculo para albercas de uso continuo como en deportivos es la estimación de las demandas mensuales mediante el método de la tabla f, implementando fórmulas empíricas de evaporación y pérdida de calor en la superficie de la alberca. En este caso es forzoso tener un sistema de respaldo para mitigar los déficits de energía térmica en escalas diarias, ya que el cálculo sólo estima las demandas mensuales. Por último, para hacer un análisis con mayor resolución temporal se debe hacer un modelo termodinámico de transferencia y balance de calor en la alberca.

Las instalaciones termosolares industriales se pueden utilizar en una gran cantidad de empresas que requieran calor de proceso en forma de agua o vapor (figura 3.21). Por ejemplo, la industria cervecera requiere agua caliente para iniciación el proceso de germinación de la cebada y de fermentación de la malta. Por otro lado, la industria cementera está buscando maneras innovadoras de obtener el calor requerido en los hornos de tambor donde se fabrica el clínker para el cemento Portland. En este caso se requiere calentar el aire dentro del horno, por lo que las soluciones son más complejas que cuando se requiere agua o vapor. En general, el diseño sigue el mismo proceso que para una instalación residencial de gran escala, pero con mayores requisitos de precisión y resolución en los cálculos, con elementos más complejos en la instalación hidráulica y con más monitoreo.

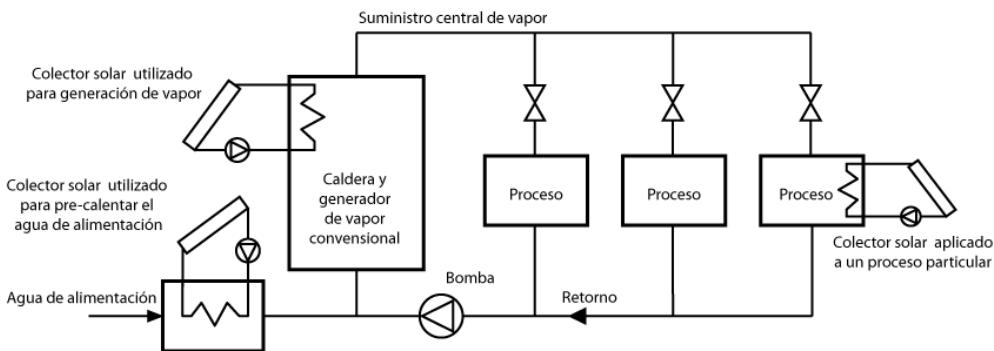


Figura 3.21. Esquema de una instalación industrial de vapor solar (Textos científicos, 2009).

3.6 Introducción a la energía solar termoeléctrica

El efecto fotovoltaico, utilizado por los paneles fotovoltaicos y descrito en el siguiente capítulo, permite convertir la radiación solar directamente a energía fotovoltaica. Esta tecnología es la más utilizada para generar electricidad a partir del sol a pequeña escala en casa y a gran escala en parques solares. Sin embargo, los paneles fotovoltaicos sólo tienen una eficiencia de conversión de alrededor de 20 %, mientras que un colector termosolar puede tener entre 70 % y 90 %. Es posible generar electricidad de manera indirecta a partir de la energía termosolar, convirtiendo la radiación en calor, y a su vez el calor en vapor, el cual hará girar una turbina como en las centrales termoeléctricas convencionales; a esta tecnología se le llama energía solar termoeléctrica, o energía solar concentrada (CSP, por sus siglas en inglés) (figura 3.22). Sin embargo, estos pasos intermedios disminuyen considerablemente la eficiencia de conversión a 7-25 %. Para poder utilizar el calor para generar electricidad se tienen que manejar altas temperaturas.

La energía solar es una fuente variable, con un ciclo diurno determinista y variaciones durante el día, debidas a la nubosidad, que son de carácter probabilístico. La energía eléctrica no se puede almacenar sin convertirla, por lo que la falta de generación fotovoltaica nocturna se mitiga con una programación adecuada del encendimiento de fuentes hidroeléctricas, geotérmicas, y

en último lugar de carboeléctricas y turbogás, mientras que la otra se mitiga con pronósticos meteorológicos a corto plazo y el uso de baterías o centrales hidroeléctricas de rebombeo para balancear la generación y demanda. Por otro lado, la energía en forma de calor generada por la energía solar termoeléctrica se puede almacenar en tanques aislados para utilizarse en la noche, durante una racha seguida de días nublados, o incluso colectarla en verano para utilizarla en invierno. Este tipo de flexibilidad estacional vence incluso a la energía hidroeléctrica, cuyo suministro varía considerablemente de una estación a otra.

Sigue habiendo muy pocas centrales solares termoeléctricas en el mundo, debido a que gran parte de la tecnología no tiene aún una madurez comercial y los costos de generación son incluso más altos que para energía fotovoltaica con almacenamiento de baterías. Otro problema de esta tecnología es que genera impactos fuertes para las aves, siendo letal para aquellas que vuelan hacia los rayos concentrados.

En 2021 en el mundo había 6.8 GW de capacidad de CSP, mientras que se tenía 940 GW de energía solar fotovoltaica. La central más grande del mundo se llama Noor (luz en árabe), y se ubica en Ouarzazate, Marruecos. Tiene una potencia de 510 MW y cuenta con tecnología de cilindros parabólicos y torre solar. El país con mayor capacidad instalada es España.

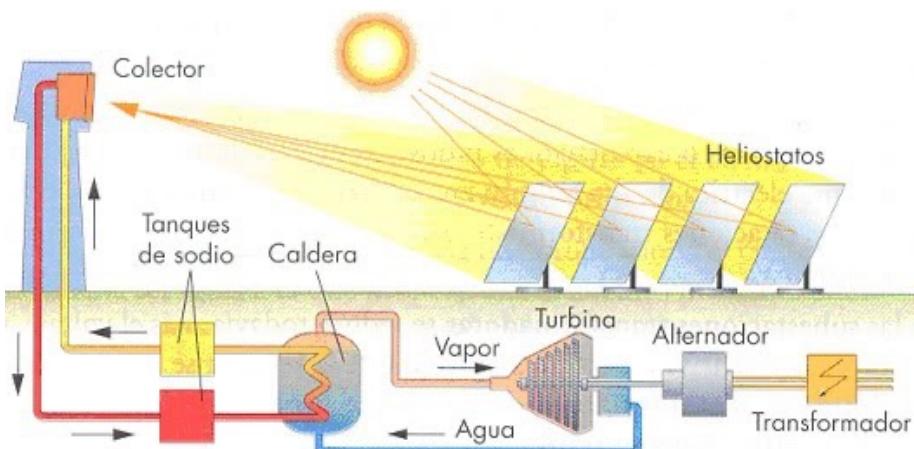


Figura 3.22. Esquema de funcionamiento de una central solar termoeléctrica (Electrotecnia al día, s.f.).



Figura 3.23. Izquierda: central de cilindros parabólicos (Wikimedia, 2005),
derecha: central de disco parabólico (Barbee, 2015)

Existen 4 tipos principales de configuraciones de colectores para la generación solar termoeléctrica que se presentan en orden ascendente de temperatura. Los concentradores de **cilindros parabólicos** (figura 3.23, izquierda) consisten en un espejo muy largo que cuentan con un tubo con el fluido caloportador en el foco del cilindro parabólico. Una central tiene varias hileras de estos colectores. Se alcanza un nivel de temperatura intermedio de 150-350°C. En un intercambiador de calor el fluido transmite el calor al agua que se evapora y pasa por una turbina para generar electricidad.

Un sistema de **disco parabólico** (figura 3.23, derecha) o de plato Stirling consiste en un espejo con forma de paraboloides de revolución, similar a una antena de revolución. Toda la radiación se concentra en el foco del paraboloides, donde se alcanzan temperaturas entre 250-700°C y la energía eléctrica se genera directamente en un motor Stirling ubicado en el foco. Los sistemas de torre solar (figura 3.24, izquierda) consisten en una gran cantidad de espejos rectangulares planos llamados heliostatos que reflejan el rayo hacia un solo punto en lo más alto de la torre, donde se alcanzan temperaturas entre 500-1,000°C. Las centrales eléctricas más grandes de CSP son de este tipo. Por último, si se hace una combinación de heliostatos y de un disco parabólico se pueden alcanzar temperaturas extremadamente altas (~3,000°C) en el foco del disco. Estos sistemas no se utilizan para generar electricidad, sino para probar nuevos materiales resistentes a temperaturas extremas para aplicaciones aeroespaciales, de investigación, y de energía nuclear.



Figura 3.24. Izquierda: central de torre solar (Wikimedia, 2007), derecha: tanque de almacenamiento de sales fundidas (Wikimedia, 2010).

Todos los colectores para CSP deben colocarse en sitios donde la componente de la radiación directa sea máxima y tener motores para obtener un seguimiento solar, ya que es importante que la radiación siga el patrón de reflexión para llegar al foco. Los fluidos caloportadores para aplicaciones de alta temperatura suelen ser sales fundidas o dióxido de carbono supercrítico. Para aplicaciones de almacenamiento de calor de horas a días se utilizan tanques aislados de grandes dimensiones (figura 3.24, derecha), mientras que para almacenamiento estacional se han hecho pruebas para almacenar agua caliente en cavernas o en acuíferos, donde incluso se puede almacenar agua a bajas temperaturas para usarse en verano. Esta tecnología se podría considerar como una forma de almacenamiento geotérmico. Pese a las ventajas que tiene en la planeación estacional de la demanda energética, la gran mayoría de las soluciones son pruebas de concepto experimentales.

3.7 Ejercicios propuestos

Ejemplo 3.6.1.

Determinar la capacidad y cantidad de calentadores solares que requiere un edificio que presenta una demanda de 1,200 litros de mezcla de agua fría-cáliente para sus regaderas con los siguientes datos:

- Temperatura inicial del agua 24°C
- Temperatura deseada de la salida del agua 65°C
- Radiación solar de la zona es 272 W/m²
- Se considera una eficiencia de 90 % del calentador solar
- 16 usuarios a los que se dotan 40 litros de agua caliente a cada uno.

Solución:

Demanda energética diaria

$$E = MCP (Tf - Ti)$$

$$E = M 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} {}^\circ\text{C} (65 - 24)$$

Dónde:

E: Demanda energética (kJ/día)

M: Masa de agua a calentar en un día (kg/día)

Cp: Capacidad calorífica del agua (4.18 kJ/kg °C)

Ti: Temperatura de consumo de agua

Tf: Temperatura de consumo de agua (°C)

Para obtener la masa del agua a calentar, se realiza la siguiente fórmula.

$$M = n_p P_{H_2O} e_p$$

$$M = 16 \text{ personas} * \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) * 40 \frac{\text{lt}}{\text{persona}}$$

$$M = 640 \text{ kg}$$

Dónde:

M: Masa de agua a calentar en un día (kg/día)

np: número de personas (personas/día)

Vp: Volumen de agua per cápita (lt/persona)

P_{H₂O}: Densidad del agua (1000 kg/m³)

Con ello, la demanda energética sería:

$$E = 640 \text{ kg} * 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ } ^\circ\text{C} (65 - 24) \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E = 109,683.2 \text{ kJ}$$

Considerando que ese volumen de agua lo utilizan a lo largo de todo el día, convertimos nuestra demanda energética en la irradiación solar que se necesita aprovechar.

$$E_{\text{Irradiación solar}} = \frac{E}{3.60 * 24}$$

Sustituimos los valores:

$$E_{\text{Irradiación solar}} = \frac{109,683.2 \text{ kJ}}{3.60 * 24}$$

$$E_{\text{Irradiación solar}} = 1,269.48 \text{ W}$$

Una vez obtenida la irradiación solar necesaria, realizamos la siguiente operación, donde buscamos el área de captación de paneles solares para generar dicha radiación; además de eso, tenemos que considerar la eficiencia de nuestro calentador propuesto, así como la radiación solar promedio que indica la NOM-020-ENER-2011 para la CDMX, la cual es de 272 W/m².

$$A_{\text{cap}} = \frac{E_{\text{Irradiación solar}}}{H_p * n_g}$$

Dónde:

Acap: Área de captación (m²)

Hp: Radiación solar (W/m²)

ng: Eficiencia global diaria del sistema (%)

$$A_{cap} = \frac{1,269.48 \text{ W}}{\frac{272 \text{ W}}{\text{m}^2} * 0.9}$$

Entonces el área de captación para poder calentar el agua diaria para toda la casa es:

$$A_{cap} = 5.18 \text{ m}^2$$

Para este proyecto estamos considerando utilizar el calentador solar **Cal-o-rex modelo SL240** con capacidad para almacenar 240 litros y cuenta con un área de 2.4 m²

Tomando el área del colector solar seleccionado, consideramos la cantidad de colectores que vamos a utilizar.

$$N_c = \frac{A_{cap} * F.S}{A_c}$$

Dónde:

Nc: número de colectores

F.S: Factor de seguridad o proyección de demanda

Ac: área de un colector (m²)

$$N_c = \frac{5.18 \text{ m}^2 * 1.50}{2.4 \text{ m}^2}$$

Dando resultado:

$$N_c = 3.23 \text{ calentadores solares}$$

Redondeando el valor obtenido, colocamos 3 calentadores solares dentro del proyecto.

Dando resultado:

$$N_C = 3.15 \approx 3 \text{ Calentadores de 240 litros}$$

La calidez de la naturaleza, se disfruta más con Calorex

Aprovecha la energía natural
libre de emisiones.



Calorex Eco-Blue. Máxima captación solar, del **80 - 100%** en ahorro de gas.*



Más confort y rendimiento. Alcanza temperaturas superiores a **70 °C**.



Green Foam, aislante térmico que conserva la temperatura del agua caliente por mucho más tiempo.**



La más alta resistencia a golpes y granizo. Conductos de cobre en su interior para una alta eficiencia y durabilidad.



Dura Glas. Porcelanizado exclusivo de alta durabilidad que protege el tanque, evitando sarro y óxido.



Fácil instalación. Incluye el kit más completo.



Disponible para abastecer hasta 5 servicios.

| MODELO | CALOREX SOLAR SL 150 | CALOREX SOLAR SL 240 |
|---|---|----------------------|
| TERMOTANQUE | | |
| Recomendación por No. de servicios** | 3 | 5 |
| Capacidad del tanque de almacenamiento (L) | 150 | 240 |
| Altura total (cm) | 128 | 147,6 |
| Diámetro (cm) | 46,5 | 53,2 |
| Peso de producto completo (kg) | 42 | 67,8 |
| Presión máxima de trabajo MPa (kg/cm ²) | 0,59 (6,0) | |
| Aislante térmico | Poliuretano de alta densidad 28 mm | |
| Válvula de drenado | Llave de nariz de nylon | |
| Válvula de alivio (kg/cm ²) | 8 | |
| Recubrimiento interior del tanque | Porcelanizado Dura Glas | |
| Prueba de presión hidrostática | 9 kg/cm ² | |
| Ánodos de protección catódica | Ánodo de aluminio | |
| Recubrimiento exterior | Pintura electrostática | |
| Niple para conexión de entrada y salida de agua | ¾" | |
| Accesorios incluidos | Base metálica para soporte de termotanque (incluye el juego de mangueras) y kit de conexiones | |
| Garantía*** | 10 años | |
| COLECTOR SOLAR | | |
| Área total (m ²) | 2 | 2,6 |
| Área de absorción (m ²) | 1,84 | 2,4 |
| Altura total (cm) | 194,5 | 211,7 |
| Ancho x Profundo (cm) | 104,6 x 81 | 122,7 x 81 |
| Peso de producto completo (kg) | 27 | 33 |
| Material del absorbedor | Aluminio - Cobre | |
| Acabado exterior | Aluminio anodizado color negro | |
| Aislamiento | Poliuretano ¼" | |
| Vidrio solar | Vidrio templado texturizado anti-reflejante de bajo contenido en hierro | |
| Superficie de absorción | Eco-Blue | |
| Marco del colector | Aluminio anodizado color negro | |
| Presión máxima de prueba | 9 kg/cm ² (883 kPa) | |
| Conexiones de entrada y salida de agua | Hembra de ¾" 14 NPT | |

Fuente: <https://www.calorex.com.mx/>

1. Obtén la gráfica solar cilíndrica y polar para todo el año para tu localidad de origen. Para los siguientes días del año calcula el acimut y la altura solar: 1° de enero a las 12:00, 15 de mar a las 17:00, 10 de octubre a las 9:00, 29 de mayo a las 13:00, y 3 de septiembre a las 14:00.
2. Investiga la declinación solar en la ubicación las fechas del año del ejercicio anterior y calcula la altura del cémit solar.
3. Obtén la duración del día para localidad y fechas del ejercicio 1.
4. Investiga las horas pico del sol y la radiación solar diaria promedio para las 10 ciudades más grandes México. Obtén el valor promedio mensual y el valor promedio anual.
5. Calcula la dotación de ACS para una familia de 4 personas que vive en una casa, para un edificio de 100 departamentos con 3 personas por departamento, para un hospital de 50 camas, para un hotel de 200 camas matrimoniales, para una escuela sin regaderas con 1,000 alumnos, para un gimnasio con 30 usuarios, para un restaurante que sirve a 400 personas, y para una oficina con 300 empleados.
6. Vuelve a calcular la dotación del ejercicio anterior, pero con una temperatura de 70°C y una temperatura inicial del agua de 18°C.
7. Calcula la demanda de energía térmica para los ejercicios 5 y 6.
8. Obtén la gráfica solar cilíndrica y polar para todo el año para tu localidad de origen. Para los siguientes días del año calcula el acimut y la altura solar: 1° de enero a las 12:00, 15 de mar a las 17:00, 10 de octubre a las 9:00, 29 de mayo a las 13:00, y 3 de septiembre a las 14:00.
9. Investiga la declinación solar en la ubicación las fechas del año del ejercicio anterior y calcula la altura del cémit solar.
10. Obtén la duración del día para localidad y fechas del ejercicio 1.
11. Investiga las horas pico del sol y la radiación solar diaria promedio para las 10 ciudades más grandes México. Obtén el valor promedio mensual y el valor promedio anual.
12. Calcula la dotación de ACS para una familia de 4 personas que vive en una casa, para un edificio de 100 departamentos con 3 personas por departamento, para un hospital de 50 camas, para un hotel de 200 camas matrimoniales, para una escuela sin regaderas con 1,000 alumnos, para un gimnasio con 30 usuarios, para un restaurante que sirve a 400 personas, y para una oficina con 300 empleados.

13. Vuelve a calcular la dotación del ejercicio anterior, pero con una temperatura de 70°C y una temperatura inicial del agua de 18°C.
14. Calcula la demanda de energía térmica para los ejercicios 5 y 6.

3.8 Fuentes consultadas

1. Abha Albercas (s.f.). Paneles Solares. <https://www.abhapiscina.com/panel-solar/>.
2. ACF Industria (s.f.). Coletor solar. <https://www.acfindustria.com/productos/coletor-solar>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
3. AENOR (2005). Norma española UNE94002:2005. Instalaciones solares térmicas para producción de agua caliente sanitaria: Cálculo de la demanda de energía térmica.
4. Altek (s.f.). Boiler de Paso Alta Recupareación 6 Lts CALOREX. <https://altekenergy.com/producto/boiler-de-paso-alta-recuperacion/>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
5. Álvarez, T. (2021). Instalación solar térmica: ¿cuáles son sus averías más comunes?. <https://climatizacion-y-confort.cdecomunicacion.es/noticias/sectoriales/44564/averias-comunes-instalaciones-solar-termica>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
6. Arquitectura Pura (s.f.). ¿Qué es una carta solar y cómo hacerla?. <https://www.arquitecturapura.com/arquitectura/carta-solar-16458/>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
7. Barbee, J. (2015). Could this be the world's most efficient solar electricity system?. <https://www.theguardian.com/environment/2015/may/13/could-this-be-the-worlds-most-efficient-solar-electricity-system>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
8. Boletín Oficial del Estado (2021). Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios
9. Bricomark (s.f.). Calentador Solar 10 Tubos 130 Litros para Baja Presión Valkiria. <https://bricomark.mx/wp-content/uploads/2021/12/SOLAR-10-TUBOS.jpg>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
10. Calentadores Bicentenario (S.f.). Manual de operación y garantía del calentador solar.

11. CONUEE (2010). Dictamen Técnico de Energía Solar Térmica en Vivienda.
12. David Davis & Associates (s.f.). Understanding swimming pool regulations when buying property. <https://www.ddavis.com.au/blog/2020/october/buying-property-with-a-pool/>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
13. Ecofener (2020a). La energía solar térmica como apoyo en la generación de agua caliente. <https://ecofener.com/blog/energia-solar-termica-agua-caliente-acs-calefaccion/>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
14. Ecofener (2020b). Sistema solar térmico termosifón vs sistema de circulación forzada. <https://ecofener.com/blog/sistema-solar-termico-termosifon-vs-sistema-de-circulacion-forzada/>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
15. Ecofener (s.f.). Equipo solar de circulación frozada de 300L para ACS y 500L para calefacción, con 80 tubos de vacío. 2M-Sierra Kit Calefacción. https://ecofener.com/5502-thickbox_default/equipo-solar-de-circulacion-forzada-de-300l-para-acs-y-500l-para-calefaccion-con-80-tubos-de-vacio.jpg. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
16. Edalia Barcelona (s.f.). DIFERÈNCIA ENTRE IRRADICIÓ I IRRADIÀNCIA - HORES SOLAR PIC. <https://edaliabarcelona.blogspot.com/?view=sidebar>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
17. Electrotecnia al día (s.f.). Energía solar. https://sites.google.com/site/electrotecniaaldia2014b/_rsrsrc/1472844348795/energia-solar/solaralta-temp.jpg. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
18. Fernández Salgado, J. (2010). Guía completa de la energía solar térmica y termoeléctrica. AMV Ediciones.
19. Guangzhou Sst Heating Energy Co. (s.f.). Tanque acumulador de agua solar SST CE 50 a 800L. <https://spanish.alibaba.com/product-detail/SST-CE-50-to-800L-solar-563817736.html>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
20. Guía de la calefacción (2020). Vaso de expansión, qué es y para qué sirve?. <https://guiadelacalefaccion.com.ar/noticias/vaso-de-expansion-que-es-y-para-que-sirven/>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)

21. Helioesfera (s.f.). Horas de sol pico ¿Qué es y para qué sirve?. <https://www.helioesfera.com/horas-de-sol-pico-que-es-y-para-que-sirve/>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
22. Maril, P. (2011). Curso instalador de sistemas para suministro de electricidad por energía solar 2011. <https://baixardoc.com/preview/01-clase-el-sol-azimut-y-altura-solar-5cbb818006a76>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
23. Markel, Z (s.f.). Climatización centralizada de un edificio público multiusos en el municipio de arama mediante geotermica. Trabajo de Fin de Máster. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
24. Martín-Domínguez, I., Alarcón-Herrera, M. (2004). Análisis paramétrico de colectores solares planos operando en serie. XXVIII Semana Nacional de Energía Solar. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
25. Movergy (s.f.). Colector solar Polisun para calentamiento de alberca. https://movergy.mx/images/art_prod/diagrama_de_instalacion_colector_polisun.png. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
26. Negre, J. (s.f.). Intercambiadores de placas y juntas Sondex de alto rendimiento. <https://jnegre.com/producto/intercambiadores-de-placas-y-juntas-sondex-de-alto-rendimiento/>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
27. Perales, B. (2008). Instalación de paneles solares térmicos. Editorial Creaciones Copyright.
28. Plomería y Cerámica de Querétaro (s.f.). Calentador de depósito CINSA 132 LT C-403 gas natural. <https://www.pcqenlinea.com.mx/producto/2938/calentador-de-deposito-cinsa-132-lt-c-403-gas-natural-50302-139-022>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
29. Refrinoticias (2014). Loc captadores solares con tubos de vacío. <https://refrinoticias.com/los-captadores-solares-con-tubos-de-vacio/>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
30. Rodríguez Galbarro, H. (s.f.). Instalaciones Termosolares para la Producción e Agua Caliente Sanitaria (A.C.S.). <https://ingemecanica.com/tutorialesemanal/tutorialn188.html>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
31. Solar Pathfinder. (s.f.). Solar Pathfinder Assistant Sample Report. <https://www.solarpathfinder.com/spa-sample>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)

32. Sopelia (2017). Colector de tubos de vacío. <https://www.energiasolar.lat/colector-solar-de-tubo-de-vacio/>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
33. Tecnigrado (2021). Intercambiadores de calor y su función en un sistema de calefacción. <https://www.tecnigrado.com/intercambiadores-calor/>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
34. Tejeda Martínez, A. y Gómez-Aspeitia, G. (2015). Prontuario solar de México. Universidad de Colima y Universidad Veracruzana.
35. Textos científicos (2009). Energía solar en procesos de calefacción industrial. <https://www.textoscientificos.com/energia/solar/calefaccion-industrial>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
36. Tobajas, C. (2012). Montaje y mantenimiento de instalaciones solares térmicas. Ediciones Ceysa.
37. VISIONsolar (s.f.). VISIONsolar. <https://www.visionswh.com/>. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
38. Wikimedia (2005). Solar plant kl. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/63/Solar_Plant_kl.jpg. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
39. Wikimedia (2007). PS10 solar power tower. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/eb/PS10_solar_power_tower.jpg. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)
40. Wikimedia (2010). Fernwärmespeicher Theiss. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fernw%C3%A4rmespeicher_Theiss.jpg. Revisado el 3 de febrero de 2023. (Imagen)

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

4. Energía eólica

La energía eólica es una de las fuentes de energía natural más antiguas de aprovechamiento, por lo que actualmente se tiene una infraestructura más robusta en la tecnología que se utiliza para aprovechar el recurso eólico en el mundo.

El viento puede ser capaz de sustentar 600,000 puestos de trabajo en las áreas de fabricación, instalación, mantenimiento y servicios hasta el año 2050. La infraestructura de los parques eólicos es cada vez más eficiente y con mayor capacidad para generar energía. Alrededor del 7 % de la electricidad a nivel mundial proviene de una fuente eólica [1].

Debido a nuestro estilo de vida, la energía es esencial para el desarrollo económico y social. Para el 2050, la demanda de energía aumentará considerablemente dado que la población sigue creciendo, por tanto, se tienen que estudiar todos los aspectos de producción energética y reducir, en la medida de lo posible, los efectos adversos al medioambiente [2].

Los beneficios de la energía eólica dependen en buena medida de los efectos adversos que otras fuentes de energía ya no produzcan, debido a que en su lugar se utiliza una energía limpia.

El insumo principal de la energía eólica es la fuerza del viento que mediante el uso de aerogeneradores transforman la energía cinética en energía mecánica (rotor) o en energía eléctrica (generador) [3].

4.1 Principio de funcionamiento de un aerogenerador

Un aerogenerador es un dispositivo para extraer energía cinética del viento y convertirla en energía eléctrica. Tienen mucha similitud con los molinos de viento que los precedieron. El rotor es análogo a la vela, suele estar montado sobre un eje horizontal [4]. El eje está conectado a una transmisión, denominada caja de cambios, misma que está colocada entre el eje del viento y el generador, muy útil para garantizar la velocidad óptima del generador (figura 4.1).

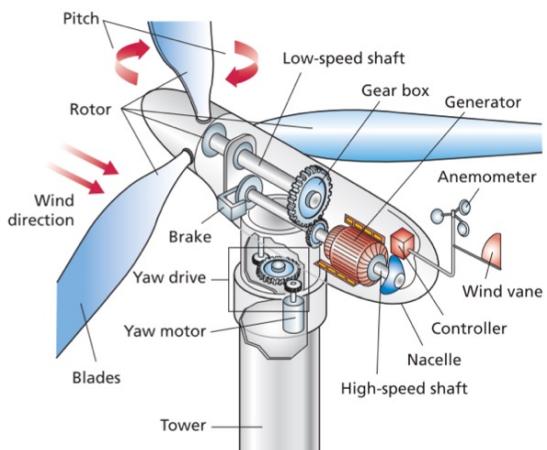


Figura 4.1. Aerogenerador compuesto de un rotor (aspas para capturar la fuerza del viento, convierte la energía mecánica en rotación). La multiplicadora que eleva la velocidad de giro en las aspas y el generador que convierte la rotación en electricidad (Crawley, 2021).

Una particularidad de los rotores es que deben ser más largos que cortos, debido a que la cantidad de energía vertical consumida es proporcional al área barrida por el rotor. Con el fin de capturar la mayor energía posible, la turbina eólica utiliza un rotor lo más largo posible [5].

Las torres donde van montadas las turbinas suelen tener una altura promedio de 84 metros, por regla general en un paisaje abierto y sin obstáculos la velocidad del viento aumentará un 25 % a medida que la elevación sobre el suelo aumenta de 15 a 60 metros. Cuando el viento es muy fuerte, un dispositivo de control cambia el ángulo del rotor disminuyendo la diferencia de presiones. Con lo anterior, se controlan las fuerzas que actúan sobre la turbina protegiendo posibles daños causados por el viento [6].

Las turbinas eólicas tienen una rotación aproximada de cuatro a seis veces la velocidad del viento que lo impulsa. Entre más pequeña sea la turbina eólica, debe girar más rápido el rotor, por ello suelen verse girar más rápido que las

turbinas grandes. Para obtener una alta velocidad, se requiere de aspas alargadas y delgadas.

La energía eléctrica promedio que puede generar una turbina cuando tiene un viento constante se puede determinar bajo la siguiente ecuación:

$$P_{máx} = \frac{C d A v^3}{2}$$

Dónde:

$P_{máx}$ = la cantidad máxima de potencia que puede obtener una turbina

C = representa el máximo porcentaje de energía eólica que se puede aprovechar

d = es la densidad del aire

A = es el área de influencia de las aspas de la turbina en rotación

v = es la velocidad del viento [7]

4.2 Clasificación de aerogeneradores

El principio operativo de un aerogenerador es convertir la energía cinética contenida en el viento en energía eléctrica, mediante la rotación del eje de una turbina. Las turbinas tienen diferentes características aerodinámicas dependiendo de su posición.

La vida promedio útil de una turbina es de 20 años, sin embargo, existen piezas como las aspas que tienen un periodo de vida menor, en promedio duran 5 años. Los daños más comunes son grietas por fatiga, grietas de crecimiento y pequeñas fracturas.

Las turbinas de eje vertical (Darrieus es un ejemplo común de este tipo de turbina) tienen palas delgadas y curvas con un eje de rotación dispuesto de manera vertical que es ideal para los sitios con velocidad y dirección del viento variable. El generador y la caja de cambios pueden estar cerca del suelo favoreciendo su mejor manejo y mantenimiento [2].

Las turbinas de eje vertical no requieren de torres para su disposición, se encuentran montadas en bases cercanas al suelo o las partes superiores de los edificios. Al encontrarse cerca del suelo uno de los retos que presentan las turbinas verticales es reducir la turbulencia del viento que provoca problemas de vibración, ruido o desgaste, lo que conlleva a un mayor mantenimiento y acortar la vida útil de la turbina.

Las turbinas eólicas de eje horizontal producen fuerzas aerodinámicas al girar, debido a la acción del viento. La energía capturada es transferida mediante una caja de cambios a un generador de energía eléctrica. La rotación de la turbina es horizontal al suelo y cuenta con dos o tres palas que están orientadas a favor o en contra del viento; como soporte cuenta con una torre vertical.

En cualquier modelo de turbina, ya sea horizontal o vertical, una de las principales complejidades es el desarrollo de modelos aerodinámicos acoplados a la dinámica estructural y a los modelos de viento, para obtener simulaciones más precisas de las cargas y respuestas aeroelásticas de las palas rotatorias. Lo anterior, incluso, supone un mejor rendimiento de los aerogeneradores [4].

4.3 Evaluación del recurso eólico

La energía eólica difiere de la energía convencional de combustibles fósiles debido a su disponibilidad a través del tiempo. La energía eólica no siempre está disponible, por lo que no es un tipo de energía confiable, además de que no se puede almacenar. Sin embargo, cuando las centrales convencionales fallan o entran a mantenimiento, la energía eólica puede suplir a las fuentes convencionales para satisfacer la demanda [7].

Uno de los principales propósitos en la evaluación del recurso eólico es cuantificar los recursos económicos del proyecto para satisfacer a un inversor, con el fin de garantizar que los instrumentos que se emplearán son instrumentos calibrados de alta calidad, que la información del medio se ha recolectado y ha sido analizada correctamente, que estos puntos pueden ser

corroborados mediante una auditoría y que las pérdidas e incertidumbres asociadas al recurso eólico a largo plazo se pueden identificar y cuantificar plenamente [6,7].

Para evaluar el recurso eólico deben considerarse tres conceptos principales, de los que por ejemplo dependerá la selección de la clase de turbina eólica; el primero es la Velocidad extrema del viento o EWS por sus siglas en inglés; el segundo, el modelo RIX como mejora para terrenos accidentados; y por último, el efecto estela de las turbinas y las pérdidas asociadas a la producción de energía [1].

Velocidad extrema del viento (EWS)

Las cargas dinámicas que soportan las torres, las aspas y otros componentes de la turbina, causadas por condiciones extremas del viento, son aspectos importantes que deben considerar los fabricantes. La estimación de la velocidad extrema del viento es la velocidad máxima que es probable que ocurra en un periodo de 50 años.

La distribución de Gumbell es empleada comúnmente para modelar valores extremos de una serie de tiempo de datos sobre la velocidad del viento [7].

Modelo RIX o índice para calificar un terreno accidentado

La forma accidentada de un terreno se mide en términos del cambio de elevación o pendiente del terreno. De forma cuantitativa el índice RIX se define como la fracción del terreno que es más empinado que la pendiente crítica θ_c .

Para calcularlo se requieren los siguientes parámetros:

- El radio alrededor de un sitio central (normalmente se emplea un radio de 3.5 km).

- La pendiente crítica ☐ con un valor normalmente de 0.3 (30 % de inclinación de las pendientes del terreno).
- Número de radios (comúnmente se usan 72 radios).

En una carta con curvas de nivel los 72 radios son dibujados a partir del centro seleccionado y desde este punto se identifican los segmentos de radio con pendientes por arriba de la pendiente crítica. Si se usan 72, el índice RIX se calcula como sigue:

$$RIX = \frac{\sum_{i=1}^{72} S_i}{72 r}$$

S_i = longitud de cada segmento con una pendiente por encima
de la pendiente crítica

La diferencia entre el índice RIX en el sitio de ubicación de la turbina y el valor de RIX en la estación meteorológica es conocida como delta RIX

$$\Delta RIX = RIX_{turbina} - RIX_{estación met}$$

El uso de un modelo lineal como WAsP en términos del índice RIX es recomendado cuando el valor de RIX, entre los sitios medidos y los sitios predichos, es cercano a 0 o al menos 5 %. Para valores más altos de RIX algunos autores reportan una relación logarítmica-lineal entre la velocidad del viento y delta RIX, basado en datos empíricos.

$$\ln\left(\frac{V_p}{V_m}\right) = 1.508 \Delta RIX$$

$$\ln\left(\frac{AEP_p}{AEP_m}\right) = 5.175 \Delta RIX$$

Dónde:

V_p = velocidad del viento predicha

V_m = velocidad del viento medida

AEP_m = producción media anual de energía medida

AEP_p = producción media anual de energía predicha

Estas ecuaciones proveen un método de extrapolación espacial para casos con diferencia en el grado de complejidad del terreno.

La universalidad de las ecuaciones y constantes es incierta y la validación específica en sitio es recomendada, así como la validación de la dependencia de las constantes en los sectores direccionales [7].

Estela de las turbinas

La disposición de las turbinas en un parque eólico puede afectar la producción de energía de las otras turbinas debido a la “estela” que cada una genera, es decir una zona o rastro generado por cada turbina en la que la velocidad del viento disminuye y en donde aumenta la turbulencia. Estos dos factores disminuyen la producción de energía y, en específico, el aumento de turbulencia provoca una carga estructural mayor en las turbinas.

El efecto del fenómeno de estela de las turbinas puede generar una reducción de energía generada en el rango del 2 al 20 %, según las distancias entre las turbinas y la turbulencia del ambiente.

Una distancia de 20D, con D como el diámetro del rotor, elimina prácticamente el déficit de la velocidad del viento y la turbulencia, sin embargo para el correcto uso del espacio y la propiedad, se ha introducido la distancia 9D para la dirección primaria del viento y 3D para la distancia perpendicular a la dirección primaria del viento, con el fin de determinar la ubicación de las turbinas reduciendo el efecto de estela [4].

Existen dos principales métodos para calcular el déficit en la velocidad del viento: el modelo lineal por N.O Jensen y el modelo de viscosidad por Ainslie. Adicionalmente a los conceptos y métodos revisados, la vegetación también permite identificar las regiones que presentan velocidades de viento altas, cuando en la zona no se cuentan con estos registros. Esta técnica se basa en la determinación de la deformación del dosel o copa de un árbol expuesto a ráfagas de viento altas. Para este acercamiento existen índices como el de Griggs y Putman que relacionan la deformación de los árboles como consecuencia del viento, con el promedio de velocidad anual del este [4,6].

La evaluación del recurso eólico es importante porque constituye una fuente de energía con amplios beneficios dentro de los que se incluyen cero emisiones durante la etapa de producción de energía, a diferencia de plantas basadas en la transformación de carbón, diesel o gas natural en energía, las cuales emiten contaminación en forma de gases de efecto invernadero (GEI) o contaminación térmica, al liberar calor a la atmósfera.

El recurso eólico permite el aprovechamiento del uso de suelo preexistente en las áreas que se encuentren como adecuadas para el establecimiento de parques de este tipo, ya que no se requiere un uso de suelo exclusivo, es decir, si un área tiene uso de suelo agrícola y se pretende aprovechar también para establecer un parque eólico, alrededor de un 90 % de la tierra puede mantener su uso de suelo, siendo una ventaja en áreas donde la cobertura de la vegetación es natural o primaria [7].

Finalmente, para completar la evaluación de los recursos eólicos deben considerarse la incertidumbre y las pérdidas asociadas a la modelación de la evaluación.

Por una parte, con el análisis de las pérdidas podemos estimar la disminución en la energía producida que puede ser ocasionada por diversas razones como la transmisión eléctrica del generador a la red de transmisión, y por la otra, el análisis de la incertidumbre permitirá identificar y cuantificar la incertidumbre asociada a la producción de energía y por lo tanto a las ganancias obtenidas por la operación de un parque eólico [2].

Algunas de las categorías con las que se pueden estimar las pérdidas asociadas se enlistan a continuación:

- Pérdidas por el efecto estela de las turbinas.
- Disponibilidad de la planta en caso de cierres por mantenimiento de las turbinas o a causa de un fallo en la red de transmisión eléctrica.
- Pérdidas eléctricas a causa del generador, de la transmisión de energía o el consumo interno de las turbinas.
- Desempeño de las turbinas.
- Condiciones meteorológicas extremas, como heladas que generen condiciones fuera del rango de funcionamiento establecido por el fabricante para las turbinas.
- Condiciones medioambientales como la temporada de migración de aves o actividades de temporada de otras especies como murciélagos.
- Para determinar la incertidumbre del análisis y por lo tanto de la producción de energía se enlistan las principales fuentes que la generan:
- Poca exactitud de los sensores, de la calibración relacionada con la instalación del equipo.
- Incertidumbre introducida a causa de las diferencias en las condiciones de viento entre ubicaciones con mediciones relacionadas con una ubicación específico en la que se encuentra la turbina (la distribución espacial del modelo).
- Por causa de los modelos de predicción a largo plazo de la velocidad del viento, generados a partir de los estimados de la velocidad del viento a corto plazo.
- Incertidumbre asociada al estimado de las pérdidas de la planta [7].

4.4 Parques eólicos terrestres y marinos

La energía eólica terrestre se crea a partir de parques eólicos donde existe un predominio del viento homogéneo. En cambio, la energía eólica marina aprovecha la fuerza del viento en la línea de costa o algunos metros dentro de la plataforma continental.

Evaluar el potencial de la energía eólica en un sitio candidato para un proyecto requiere comprender la forma en la que una turbina respondería a las fluctuaciones de la fuente de energía, es decir el viento.

Uno de los principales factores que se evalúan en cualquiera de estos dos tipos de parques eólicos son las variaciones de la velocidad del viento a causa del efecto de la capa límite. Debido a la resistencia a la fricción que ofrece la superficie de la Tierra como consecuencia del relieve, la velocidad del viento puede variar según la altura sobre el suelo. La resistencia del suelo contra el flujo del viento se representa por la altura de la rugosidad que puede ser 0 para la superficie del mar o hasta 2 para el centro de las ciudades [3].

La dirección y velocidad del viento son fenómenos estocásticos, por lo que varían a través del tiempo y estas variaciones pueden afectar el rendimiento de las turbinas. Para atender la forma en que estas variaciones afectan el cálculo de la energía y el desempeño de la turbina, se emplean distribuciones estadísticas como la de Weibull, un caso especial de la distribución de grado III de Pierson, que ha sido comúnmente usada con buena aceptación para el análisis de energía del viento al representar las variaciones del viento con un nivel aceptable de precisión.

Además de estos factores, se debe determinar la respuesta de velocidad y potencia de la turbina y estimar la energía que podría ser generada en un periodo de tiempo determinado, integrando al modelo las probabilidades de las velocidades esperadas en el sitio en el que se pretenda desarrollar el proyecto.

El desempeño de una turbina variará de acuerdo con el régimen de vientos del sitio, sea este en tierra adentro o en la costa, por lo que la evaluación preliminar del sitio para la planeación de un proyecto es de suma importancia [8].

4.5 Impacto ambiental

El impacto ambiental generado por la construcción de un parque eólico dependerá de las particularidades de la obra como las características y disposición

de las turbinas o la extensión ocupada por el parque, pero también de las características del sitio del proyecto como la abundancia de las especies que habiten el área, el uso de suelo y la atención a los diversos requerimientos ambientales que determine la normatividad vigente.

Sin embargo, existen diferentes impactos específicos que han sido identificados a partir de los parques eólicos existentes y que permiten determinar los principales factores ambientales que se ven afectados [1].

Las actividades de preparación del sitio como tala, apertura de claros y construcción de caminos son las principales actividades que causan impactos negativos en el medio ambiente al perturbar los ecosistemas, por ejemplo, en sitios contiguos a bosques, generando la fragmentación del hábitat. Este fenómeno se define como la ruptura de extensiones contiguas de hábitat de una especie, generando “parches” que aumentan conforme la fragmentación se dispersa a través del hábitat, ocasionando aislamiento entre los parches de vegetación y condiciones cada vez menos adecuadas para las especies que los habitan.

Otra de las actividades que genera impactos ambientales negativos ocurre durante la operación del proyecto con la puesta en marcha de las turbinas que ocasionan la muerte de aves y murciélagos por colisión con las aspas [4].

Debido a que la vulnerabilidad de las especies ante la fragmentación del hábitat es variable, es indispensable prestar especial atención a la presencia de especies protegidas o en peligro de extinción que puedan encontrarse en el sitio y dentro de un radio de hasta 800 m en el área en que se planee colocar las turbinas, ya que estudios en este tipo de instalaciones han reportado que las perturbaciones causadas por parques eólicos se presentan en un rango de 100 hasta 800 m (Peterson and Nohr 1989, Winkelman 1989, 1990, 1992a; Vauk 1990; Pedersen an Poulsen 1991; Larsen an Madsen 2000). Para este fin deben desarrollarse estudios de muestreos durante la planeación del proyecto, antes de la construcción y después de la operación del parque, para identificar en cada etapa la composición y número de las poblaciones de especies y así poder cuantificar el impacto ambiental, por lo que cada proyecto tendrá características diferentes que deberán ser evaluadas con una perspectiva particular [5].

El acercamiento y la determinación del impacto ambiental debe incluir a todos los niveles que intervienen en el proyecto, desde los desarrolladores de las políticas ambientales hasta los responsables de la operación e investigadores, con el fin de dirigir estudios científicos que permitan conocer los impactos ocasionados y determinar las medidas que se tomarán para prevenirlos, mitigarlos o corregirlos.

Cuestionario de evaluación

1. ¿Cómo se produce energía eléctrica a partir de la energía eólica?
2. ¿Cuál es la vida promedio de una turbina?
3. ¿Qué tipo de turbina es ideal para los sitios con dirección y velocidad de viento variable? Menciona un ejemplo.
4. Menciona una desventaja de la energía eólica
5. ¿A qué se le denomina “estela” dentro de un parque eólico?

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

5. Energía hidroeléctrica

Este tipo de energía renovable es la que menor impacto causa al medio ambiente, además, tiene un gran potencial en la generación de electricidad y mayor certidumbre, por lo que es más confiable para cumplir con los picos de demanda. Tienen una vida útil que puede superar los 50 años y el costo de operación y mantenimiento es menor en comparación con otras fuentes de energía.

Las zonas de almacenamiento pueden satisfacer demandas de riego o controlar inundaciones [1]. La energía hidroeléctrica surge a partir del cambio de energía cinética y fue utilizada, en un principio, para moler granos, posteriormente para la generación de energía eléctrica. Entre 1700 y 1800 comenzaron a desarrollarse cálculos que permitirían el desarrollo de turbinas para un movimiento eficiente en el flujo del agua. En 1849 se crea la turbina con una eficiencia del 90 % para la producción de energía eléctrica [2]. En 1913, se produce la turbina Kaplan, con un diseño que cubre las necesidades de los sitios con caudales grandes y poco flujo de agua. La diferencia con la turbina anterior (turbina Francis) es el ajuste de las aspas dependiendo el caudal. En la actualidad, la energía hidroeléctrica ocupa un lugar relevante a nivel mundial con la instalación de varias centrales en distintos países (Figura 5.1).

El crecimiento de la tecnología y puesta en operación de centrales hidroeléctricas ha predominado en la región de Asia Oriental y el Pacífico. Sin embargo, el Continente Americano también tiene diversos países con instalaciones de plantas hidroeléctricas, incluso algunas de ellas sobresalen a nivel mundial, como es el caso de Brasil (Figura 5.1).

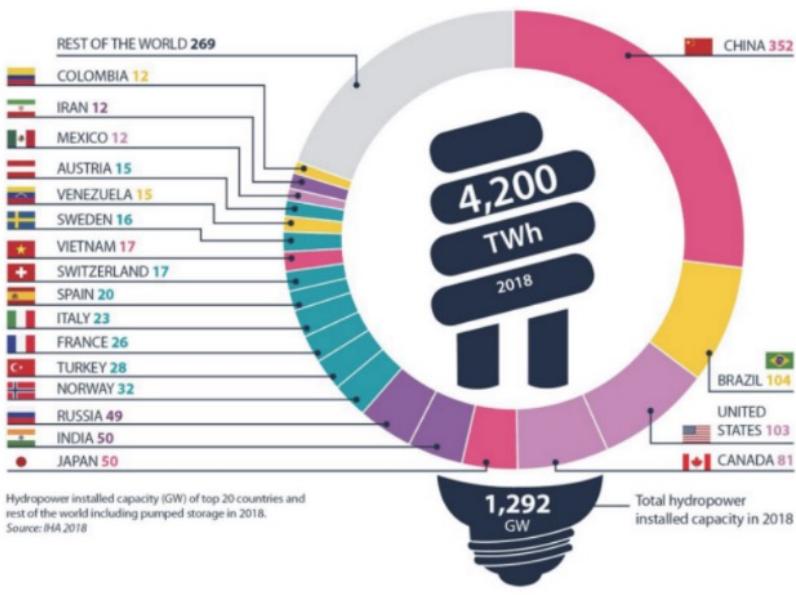


Figura 5.1 Generación hidroeléctrica a nivel mundial. https://hydropower-assets.s3.eu-west-2.amazonaws.com/publications-docs/2019_hydropower_status_report_0.pdf

Debido a que existe una gran configuración para poder desarrollar una central hidroeléctrica, el diseño técnico y la operación de centrales hidroeléctricas varían de acuerdo con los requisitos principalmente del paisaje y a las prácticas locales. La capacidad de generación de energía va desde unos pocos kilovatios hasta varios miles de megavatios; la disposición de las centrales es diversa, desde sitios montañosos con poca accesibilidad, que generan un problema de transporte de energía, hasta los grandes ríos que comparten límites fronterizos entre países [7].

Clasificación

Las centrales hidroeléctricas se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de construcción, el tipo de turbina o la fuente de abastecimiento. Sin embargo, todas requieren de una estructura que permita que el agua fluya y que por fuerzas gravitacionales sea atraída a una turbina que se encuentra a una menor elevación [3]. El cambio de alturas origina una energía cinética que la turbina convierte primero en energía mecánica y después, por medio de un generador, en electricidad (Figura 5.2).

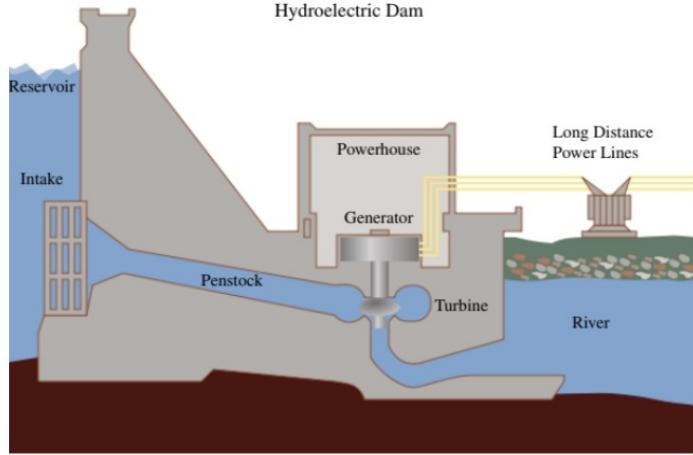


Figura 5.2 Esquema simplificado de una planta hidroeléctrica (Crawley, 2021).

El siguiente esquema resume la clasificación de las centrales hidroeléctricas, diferenciando el tipo de construcción, el modo de operación y el tipo de turbina (Figura 5.3).

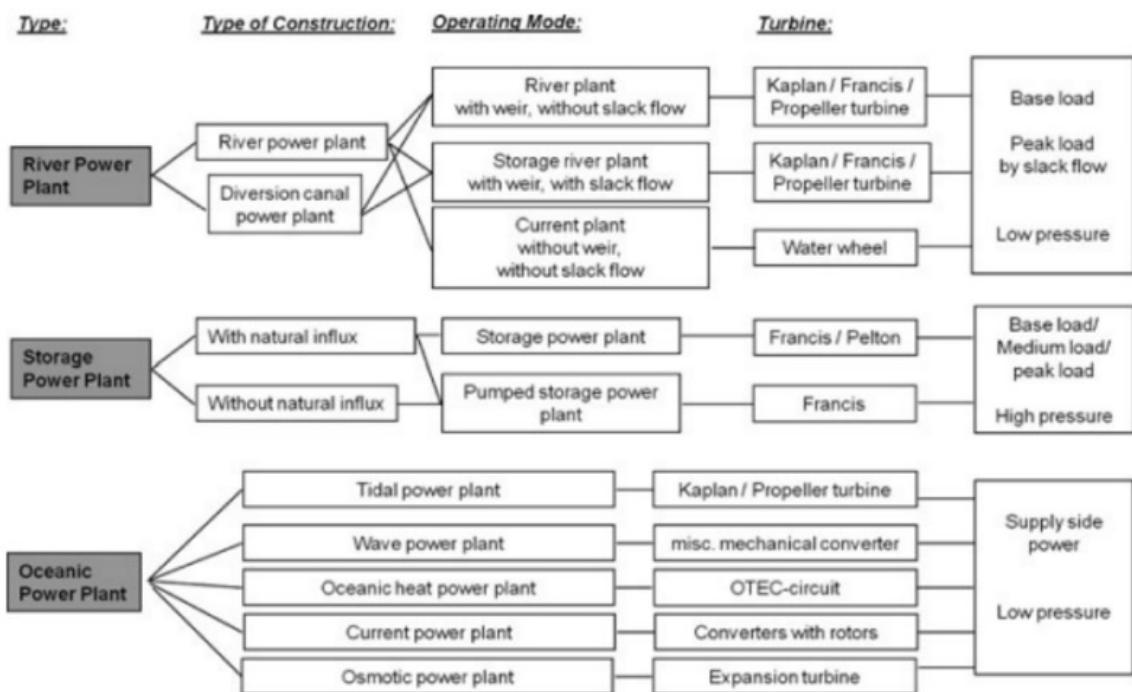


Fig. 5.3 Descripción general de las centrales hidroeléctricas (Crawley, 2021).

En las centrales hidroeléctricas fluviales se aprovecha el caudal y desnivel natural de un río para generar electricidad. El flujo de la corriente puede

aprovecharse desde el mismo caudal o bien, puede haber un canal de desvío. Este tipo de centrales hidroeléctricas tienen una generación de energía baja si no se aprovecha la totalidad del río [5].

Existen otras plantas hidroeléctricas donde se cuenta con una zona de almacenamiento de agua, que a cierta profundidad puede ser aprovechable para la navegación, o como almacenamiento en embalses, presas o represas. Las zonas de almacenamiento pueden ser útiles en horas pico donde es necesario aumentar la carga base y por lo general suelen denominarse centrales de almacenamiento con bombeo (Figura 5.4).

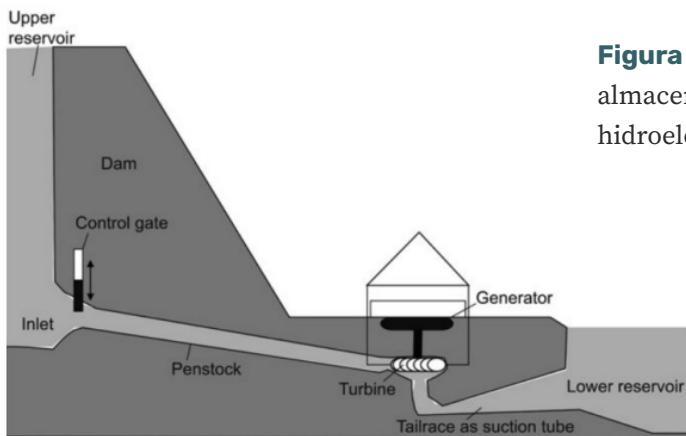


Figura 5.4 Esquema del almacenamiento de una planta hidroeléctrica (Wagner, 2020)

Las centrales hidroeléctricas con zonas de almacenamiento normalmente aprovechan el relieve para poder disponer un embalse en la cota más alta (zonas montañosas) y otro embalse más en la porción más baja del relieve, inundando así la zona donde se haya construido la central [2]. Finalmente, las centrales hidroeléctricas que se clasifican de acuerdo con el tipo de turbina. Los diseños de las turbinas pueden ser de dos tipos, en eje vertical donde la turbina está montada verticalmente y de forma horizontal. Las turbinas pueden ser de tipo Kaplan, turbinas de hélice y turbinas Francis. La elección del diseño de la turbina y en general, el diseño de la central hidroeléctrica depende de la diferencia de elevaciones entre el embalse superior e inferior [6]. Las turbinas tipo Francis se utilizan en las caídas de agua de 15 a 500 m y pueden gestionar una gran cantidad de flujo de agua, las turbinas Pelton funcionan con caídas de agua de hasta 2 000 m y trabajan con un caudal menor que las

turbinas Francis. Ambas turbinas son útiles para las centrales hidroeléctricas con embalses. Las turbinas Kaplan, tienen buen funcionamiento en caídas de menor altura (aproximadamente 25 m.) por lo que no es común encontrarlas en centrales hidroeléctricas con áreas de almacenamiento.

Impacto ambiental

Las centrales hidroeléctricas con zonas de embalses, que son las más comunes, modifican el transporte de sedimentos en la porción media y baja de la cuenca (por lo general, las centrales hidroeléctricas se encuentran en las zonas altas de la cuenca, debido a la diferencia de alturas que se requiere. Lo anterior genera, poco desplazamiento de nutrientes a la porción media y baja de la cuenca, y concentraciones máximas en las zonas de embalse, que con frecuencia llegan a tener desarrollo de flora nociva y el azolvamiento de los embalses, que se refleja en un periodo de vida más corto [7].

El desarrollo de reservorios artificiales de agua mediante la construcción de represas provoca cambios climáticos y de vida silvestre; cambios en los procesos migratorios de algunas especies de peces. La vegetación nociva dentro de los embalses puede provocar emisión de gases de efecto invernadero [1]. Las centrales hidroeléctricas que generan un menor impacto en el área circundante son las centrales que no poseen áreas de almacenamiento como embalses, presas o represas porque evitan las inundaciones en el área, y con ello, la reubicación de la población que vive en las márgenes de las centrales. Sin embargo, tienen una fuerte dependencia con el flujo de los ríos, que en ocasiones no coincide con la demanda de energía. Este tipo de centrales hidroeléctricas son comunes en los ríos que comparten varios países, por cuestiones de seguridad en ambos territorios se evitan las zonas de embalses [3].

Cuestionario de evaluación

1. ¿A partir de qué momento la energía hidroeléctrica genera electricidad?
2. ¿Qué tipo de estructura requieren todas las centrales hidroeléctricas?
3. ¿Cuáles son los tipos de turbina que existen en las centrales hidroeléctricas?
4. ¿Cómo funciona una central maremotriz?
5. Menciona un impacto ambiental de la energía hidroeléctrica

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

6. Energía de biomasa

Se define a la biomasa como cualquier residuo que provenga de materia orgánica de animales o de la agricultura y de algunos residuos urbanos que almacenen energía utilizable, asimismo, esta energía puede provenir del sol y se puede convertir mediante procesos biológicos o termoquímicos.

Actualmente se considera a la biomasa como una alternativa energética a los combustibles fósiles como el petróleo, carbón y gas, ya que se considera una energía inagotable y limpia.

Las principales fuentes de biomasa energética podemos clasificarlas como se muestra en la figura 6.1.

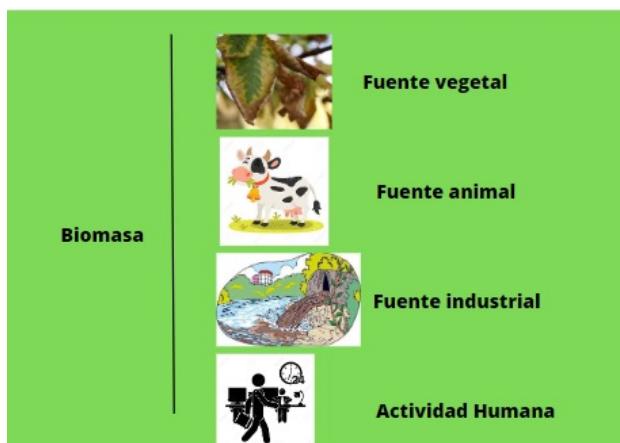


Figura 6.1. Diagrama de fuentes de biomasa (Fuente: Modificado de ENERGIAS RENOVABLES 2009).

- Actividad humana: ocurre por la acumulación de basura, residuos sólidos y aguas residuales.

- Fuentes animales: residuos de animales como huesos, sangre, cuernos, etc.
- Fuente vegetal: cualquier parte de una planta: residuos agrícolas, residuos forestales, cáscaras de frutas, etc.
- Fuentes industriales: consecuencia de la actividad de las fábricas e industrias, como en la extracción de aceites, destilación de alcoholes, etc.

Cabe recalcar que, a comparación de otras fuentes de energías renovables, la energía de biomasa tiene la capacidad y poder de almacenarse durante períodos largos.

Para la conversión de biomasa en energía, existen varios métodos, cada uno con sus propias características:

- ➔ **Proceso Termoquímico:** Este método implica el uso del calor para desencadenar reacciones químicas en la biomasa. Uno de los enfoques es la combustión, que consiste en aplicar calor intenso en presencia de oxígeno abundante, generando calor utilizable a nivel doméstico. Otro proceso termoquímico es el pirólisis, donde la biomasa se expone a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, lo que puede producir carbón vegetal y combustibles líquidos, como hidrocarburos. Además, está la gasificación, que somete la biomasa a altas temperaturas con una mínima cantidad de oxígeno puro, generando un gas de baja calidad que se utiliza para producir vapor o electricidad.
- ➔ **Proceso Biológico:** En este enfoque, ciertos microorganismos descomponen la biomasa en moléculas más simples durante sus procesos metabólicos, liberando altos niveles de energía. Este proceso es especialmente eficiente cuando la biomasa contiene niveles adecuados de humedad. La fermentación alcohólica y la fermentación anaerobia son dos técnicas comunes en el proceso biológico.

Cada método tiene sus ventajas y desafíos, la elección dependerá de la disponibilidad de biomasa, los objetivos energéticos y las condiciones específicas de cada aplicación.

6.1 Materias primas

La materia prima para la producción de biomasa con fines energéticos proviene mayormente de residuos y restos de procesos en diversas industrias, como agricultura, agroalimentaria, madera, papel, tejidos y química. Estos materiales ya no son económicamente útiles para otros fines y se consideran biomasa residual.

Desde una perspectiva ambiental, se busca prolongar el uso de la biomasa en aplicaciones antes de su conversión en energía, ya que captura y almacena CO₂ de la atmósfera. Sin embargo, la elección de utilizar residuos de biomasa para energía debe considerar factores económicos y ambientales.

La biomasa debe tener ciertas características para ser adecuada en aplicaciones energéticas:

- Facilidad de obtención y procesamiento: debe ser de fácil acceso y procesamiento para reducir los costos.
- Alta densidad energética: debe contener altos niveles de energía para la producción de biocombustibles.
- Eficiente uso del sustrato: los organismos y la biomasa deben aprovechar eficientemente su entorno, evitando el uso ineficiente del espacio.
- Independencia de factores externos: la producción no debe depender en gran medida de condiciones climáticas u otros elementos externos.
- Distribución eficiente y económica: el transporte a la planta de procesamiento debe ser rápido y económico.
- Competencia mínima con cultivos y usos: la planta no debe competir con cultivos ni especies nativas.
- Conversión rápida: la obtención de biomasa no debe requerir múltiples etapas complejas.
- Máximo aprovechamiento del recurso: se busca aprovechar al máximo la planta.
- Conversión de CO₂: la planta debe convertir el CO₂ generado en biomasa para compensar emisiones.

6.2 Biomasa sólida

La biomasa sólida se origina principalmente en los bosques y se distingue por dos fuentes: los subproductos de las labores silvícolas o las recolecciones de árboles, cepas o ramas y la madera de bajo valor, cuya valorización térmica se realiza en forma de madera-energía.

Los subproductos de la fabricación de transformación constituyen una segunda fuente, debido a que estos residuos se obtienen con una tasa de humedad importante, ya que se recogen en su lugar de producción y generalmente se emplean para satisfacer el calor y la electricidad.

Algunos materiales que dan origen a la biomasa sólida son:

Leña: Es un proceso tradicional que implica el uso de madera, generalmente en forma de troncos, ramas o astillas, como fuente de energía. Este método ha sido utilizado durante siglos para calefacción y cocción, especialmente en áreas rurales.

El proceso de generación de biomasa sólida a través de la leña se desarrolla de la siguiente manera:

1. **Obtención de la leña:** Se recolecta la madera de árboles de forma sostenible tras la tala de árboles o la poda de ramas.
2. **Preparación:** La leña se corta y se divide en tamaños adecuados para su uso, lo que facilita su manejo y almacenamiento. También se puede dejar secar al aire para reducir la humedad.
3. **Combustión:** La leña se quema en estufas, chimeneas o calderas diseñadas específicamente para la calefacción o la generación de calor. Durante la combustión, la madera libera calor y energía térmica que se utiliza para calentar espacios, entre otros fines.
4. **Control de emisiones:** En sistemas modernos, se pueden incorporar dispositivos para controlar las emisiones de gases nocivos, como el dióxido de carbono (CO_2) y los contaminantes atmosféricos.

La generación de biomasa sólida a través de la leña es una fuente de energía renovable, ya que los árboles pueden ser replantados y cultivados de manera sostenible. Sin embargo, es importante gestionar adecuadamente la tala de árboles y la recolección de leña para evitar la deforestación y garantizar la sostenibilidad a largo plazo.

En muchas regiones, especialmente en áreas rurales, la leña sigue siendo una fuente esencial de energía y calefacción.

6.2.1 Astillas forestales

Las astillas forestales son un método que involucra la transformación de fragmentos de madera, conocidos como astillas, que se obtienen a partir de residuos de la explotación forestal o de la producción de madera. Estas astillas se utilizan como una fuente de biomasa para la producción de energía entre otros fines. El proceso se puede describir de la siguiente manera:

- 1. Obtención de astillas forestales:** Las astillas se obtienen principalmente a partir de residuos generados en actividades forestales, como la tala de árboles, la limpieza de troncos o la poda de ramas. También pueden derivarse de subproductos de la industria maderera.
- 2. Trituración y reducción de tamaño:** Las astillas suelen ser trituradas y reducidas a un tamaño uniforme para facilitar su manejo y procesamiento, mediante equipos especializados.
- 3. Almacenamiento y secado:** Las astillas trituradas se almacenan en condiciones adecuadas para reducir la humedad y garantizar su calidad como biomasa. El secado puede ser necesario para eliminar la humedad residual.
- 4. Utilización como combustible:** Las astillas forestales se utilizan como combustible en instalaciones de generación de energía, como calderas o plantas de cogeneración. También se pueden utilizar en sistemas de calefacción y procesos industriales que requieren calor.
- 5. Control de emisiones:** En sistemas modernos, se pueden incorporar tecnologías para controlar las emisiones de gases y partículas, lo que contribuye a reducir el impacto ambiental.

6.2.2 Gránulos o pellets

La biomasa sólida de pellets o gránulos es un proceso eficiente y sostenible que implica la compactación de materiales orgánicos, como madera, residuos agrícolas o forestales, en pequeñas unidades cilíndricas o esféricas conocidas como pellets o gránulos. Este proceso tiene como objetivo crear un combustible de biomasa de alta densidad y fácil manejo que puede utilizarse en sistemas de calefacción, generación de energía, entre otras aplicaciones. Para producir pellets o gránulos de biomasa, se siguen varios pasos:

1. **Recolección de materia prima:** Se obtiene la materia prima, que puede ser madera, virutas, aserrín, paja, cáscaras de nueces u otros residuos orgánicos.
2. **Preparación:** La materia prima se somete a un proceso de trituración y secado para reducir la humedad y aumentar la eficiencia energética.
3. **Compactación:** La materia prima se comprime a presión y temperatura altas para formar pellets o gránulos, utilizando máquinas especializadas para este propósito.
4. **Enfriamiento:** Los pellets o gránulos recién formados se enfrian para endurecerlos y mantener su forma.
5. **Tamizado y clasificación:** Se eliminan los pellets o gránulos de tamaño inadecuado y se clasifican según sus propiedades físicas.
6. **Almacenamiento:** Los pellets o gránulos se almacenan en condiciones adecuadas para evitar la humedad y la degradación.
7. **Uso:** Estos pellets o gránulos de biomasa se utilizan como combustible en estufas, calderas, generadores de energía, y otros sistemas de calefacción o producción de energía, contribuyendo a reducir la dependencia de combustibles fósiles y a disminuir las emisiones de carbono.

6.2.3 Carbón de madera

La generación de biomasa sólida a través del carbón de madera implica la conversión de madera en carbón vegetal, que es un tipo de biomasa sólida con

un alto contenido de carbono. El proceso de generación de biomasa sólida a través del carbón de madera se puede describir de la siguiente manera:

1. **1. Obtención de la materia prima:** La materia prima utilizada es la madera, que puede provenir de diferentes fuentes, como árboles, ramas, residuos de madera o subproductos de la industria maderera.
2. **Carbonización:** La carbonización es el proceso central en la generación de carbón de madera. En este proceso, la madera se somete a altas temperaturas en ausencia de oxígeno (o en condiciones de oxígeno limitado) en un horno o un reactor especializado. Esto conduce a la descomposición de la madera en sus componentes básicos, principalmente carbono, con la liberación de gases y la eliminación de la humedad y los compuestos volátiles.
3. **Enfriamiento y recolección:** Una vez que la madera se ha carbonizado, se enfriá y se recolecta el carbón de madera resultante en forma de briquetas, gránulos o polvo, dependiendo de la aplicación prevista.
4. **Almacenamiento y uso:** El carbón de madera se almacena y se utiliza como combustible en diversas aplicaciones, como calefacción, generación de energía, producción de acero, procesos industriales y más.

El carbón de madera es una fuente de biomasa sólida con un alto poder calorífico, aunque su producción implica la liberación de gases durante la carbonización, puede considerarse una opción más sostenible en comparación con el carbón mineral, ya que la madera es una fuente renovable.

6.3 Biocombustibles

Los biocombustibles se definen como combustibles derivados de la biomasa, ya sea de manera directa o indirecta, por lo que se clasifican como fuentes de energía renovable. Se ha establecido una clasificación en generaciones de biocombustibles según la materia prima utilizada y los procesos de producción empleados, hasta el momento se ha avanzado hasta la cuarta generación. La **primera generación** se caracteriza por el uso de cultivos agrícolas destinados principalmente a la alimentación como fuente de los biocombustibles.

La **segunda generación** de biocombustibles en lugar de utilizar alimentos, se emplearon sus residuos, por lo tanto, las industrias agroalimentarias son la principal fuente de abastecimiento para la elaboración de esta generación.

Debido a los problemas ambientales y sociales que surgieron como consecuencia de las dos primeras generaciones de biocombustibles, se reconoció la gran necesidad de desarrollar una tercera generación que priorizara la sostenibilidad y la benevolencia con el entorno. La **tercera generación** se concibió como una respuesta a los desafíos ambientales, por ejemplo la competencia por la producción de alimentos y la de materias primas para biocombustibles, la deforestación y la amenaza a la biodiversidad.

Su producción se basa en enfoques de fabricación análogos a los de la segunda generación, aunque con la particularidad de emplear cultivos bioenergéticos específicamente modificados o adaptados, para optimizar la transformación de la biomasa en biocombustibles.

Finalmente, se implementó la **cuarta generación** que consiste en buscar la modificación de la materia prima con el fin de tener mejores resultados en la captación y almacenamiento de CO₂.

6.3.1 Biocombustibles líquidos

Los biocombustibles líquidos son combustibles derivados de la biomasa, compuestos principalmente por aceites y alcoholes; estos resultan ser bastante versátiles en su uso, pues se pueden aplicar en diversas formas de energía, como la térmica, eléctrica o mecánica. Además, pueden ser empleados para alimentar calderas y motores de combustión interna. Actualmente, los biocombustibles líquidos más desarrollados son el biodiésel y el bioetanol.

6.3.2 Biodiésel

El biodiésel se constituye como un combustible de gran relevancia en el panorama energético actual. Su producción se realiza a partir de una variedad de materias primas, incluyendo aceites vegetales como los de colza, girasol y soja, así como grasas animales, aceites de fritura usados y, en una vertiente más innovadora, aceites provenientes de microalgas.

Este tipo de combustible, que se distingue por su alta densidad de energía, está compuesto por ésteres metílicos de ácidos grados de cadena larga derivados de aceites vegetales o grasas animales, como ya se mencionó anteriormente. La producción de biodiesel a partir de aceites naturales generalmente involucra un proceso de transesterificación. En este proceso, se modifican las propiedades del aceite para que se asemejen a las del diésel convencional, permitiendo así su uso eficiente como combustible.

A continuación, se adjunta un diagrama del proceso de producción de biodiésel figura 6.2.

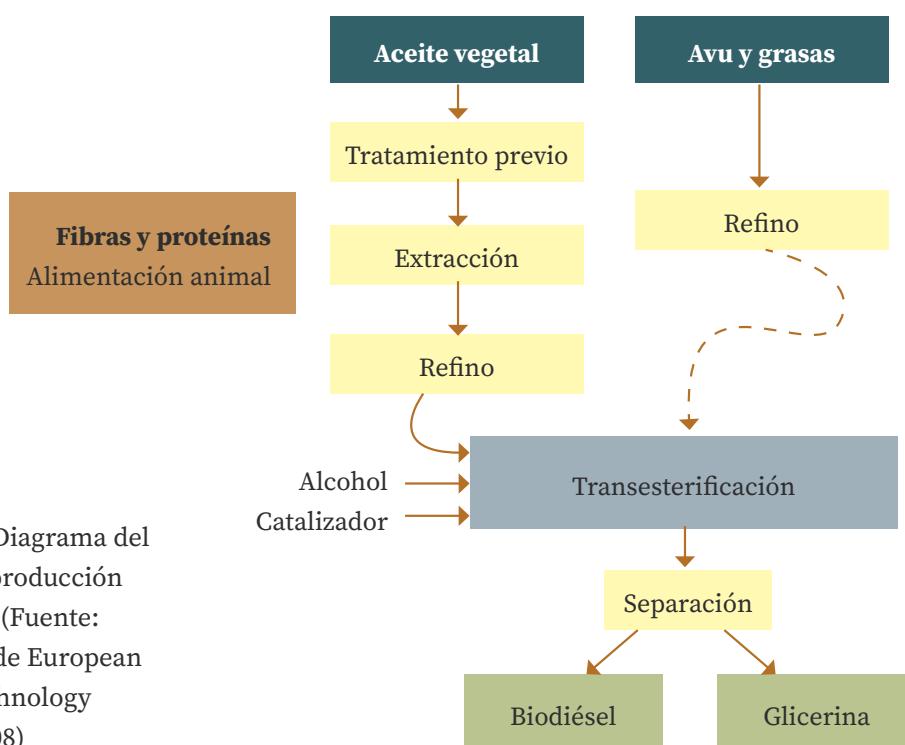


Figura 6.2 Diagrama del proceso de producción de biodiésel (Fuente: Modificado de European Biofuels Technology Platform 2008)

Para su fabricación, en primera instancia, se deben **preparar** las semillas antes de la extracción. Para ello se deben someter a una limpieza con el fin de remover elementos no deseados. Posteriormente, se siguen estos pasos:

1. Secado (mejor conservación de las semillas que ayuda a procesos posteriores).
2. Descascarillado (para semillas de gran tamaño).
3. Molienda o molturación (mayor facilidad de extracción de aceites).
4. Acondicionamiento (con el fin de que la semilla tenga una mayor eficiencia).

Una vez preparadas las semillas, se procede a realizar la extracción. Este proceso se puede realizar principalmente de 3 formas, las cuales se ilustran en la **figura 6.3**.



Figura 6.3 Formas de extracción del aceite
(Fuente: Basado de Biomasa, Biocombustible y Sostenibilidad Bloque II. Biocombustibles por Dra. Ingeniera de Montes 2007).

Para mejorar la calidad de los aceites vegetales, previos a su conversión en biodiesel, se aplican tres etapas clave que constituyen el proceso de **Refinado**. En primer lugar, se realiza una separación de los residuos sólidos mediante centrifugación. Posteriormente, se procede a la eliminación de impurezas como pigmentos, ceras y fosfatos a través del desgomado con agua o ácido. Por último, se reduce la acidez de los aceites mediante una neutralización física a altas temperaturas y bajas presiones, o bien mediante métodos químicos, como la saponificación con hidróxido de sodio.

Se continua con la **Transesterificación** como proceso final. Existen dos tipos, los cuales se muestran en la **figura 6.4**.

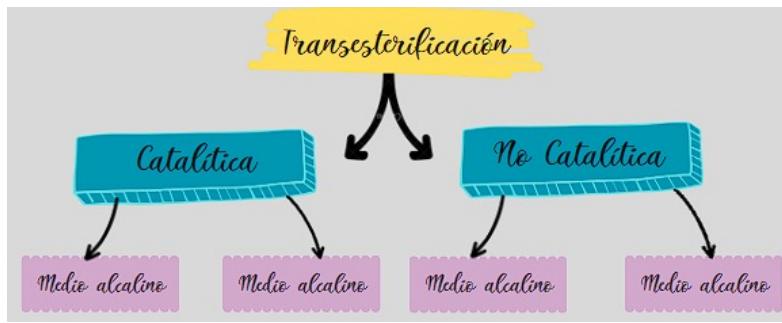


Figura 6.4 Tipos de transesterificación (Fuente: Basado de Biomasa, Biocombustible y Sostenibilidad Bloque II. Biocombustibles por Dra. Ingeniera de Montes 2007)

6.3.3 Bioetanol

El bioetanol es una variedad de alcohol etílico que se produce a partir de diferentes fuentes de materia prima que contienen azúcares, los cuales son convertidos de manera sencilla a través del proceso de fermentación.

En el caso de que la materia prima provenga de otros cultivos que almacenan su energía en forma de carbohidratos más complejos, como lo es el almidón, o de cultivos con una alta concentración de celulosa o hemicelulosa, será necesario realizar una hidrólisis antes de llevar a cabo la fermentación. Por lo tanto, el proceso de producción de bioetanol se divide en tres etapas en función del tipo de materia prima utilizada como punto de partida. Lo anterior, se puede ver en el diagrama de la **figura 6.5**.

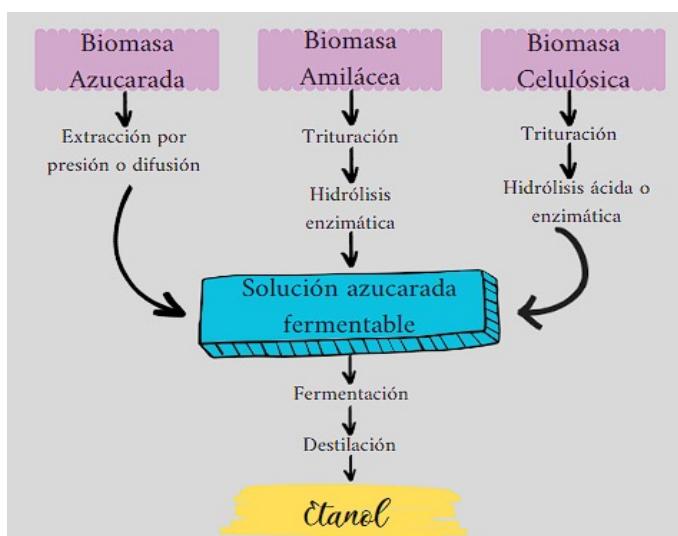


Figura 6.5 Procesos en la obtención de bioetanol dependiendo del tipo de materia prima (Fuente: Basado de Biomasa, Biocombustible y Sostenibilidad Bloque II. Biocombustibles por Dra. Ingeniera de Montes 2007).

6.4 Biocombustibles gaseosos

El biocombustible gaseoso, dentro del panorama de los biocombustibles, es una variedad que se encuentra en estado gaseoso y se obtiene mediante un proceso conocido como digestión anaerobia de materia orgánica. El resultado principal de este proceso es el metano (CH_4), un gas combustible que se puede utilizar para una variedad de aplicaciones energéticas, como calefacción, cocina, iluminación y generación de electricidad.

La gasificación es un proceso termoquímico en el que la biomasa se convierte en un gas de síntesis llamado syngás, el cual se puede utilizar como combustible para generar energía eléctrica o vapor, así como materia prima en la industria química y otros procesos industriales.

En la clasificación de generaciones de biocombustibles, el gaseoso generalmente se encuentra dentro de la categoría de biocombustibles de segunda generación. Esto se debe a que su producción no depende de cultivos destinados a la alimentación humana, sino que se basa en materiales orgánicos que no compiten con los alimentos. Los biocombustibles de primera generación se obtienen principalmente a partir de cultivos alimenticios, como maíz o caña de azúcar, lo que los diferencia de los biocombustibles gaseosos y otros de segunda generación que utilizan residuos y subproductos agrícolas e industriales.

Esta clasificación en la segunda generación destaca la importancia de aprovechar recursos orgánicos disponibles en forma de desechos y residuos, lo que contribuye a reducir la presión sobre la producción de alimentos y, al mismo tiempo, promueve una fuente de energía renovable y sostenible.

6.4.1 Materia prima

Se pueden emplear diversas materias primas como la excreta animal, la cachaza de la caña de azúcar, los residuos de mataderos, destilerías y fábricas de levadura, la pulpa y la cáscara del café, así como la materia seca vegetal.

Esta metodología proporciona soluciones parciales para atender la demanda de energía en zonas rurales, al tiempo que contribuye a mitigar la deforestación derivada de la tala de árboles para la obtención de leña. Además, permite el reciclaje de los desechos provenientes de la actividad agropecuaria y representa una fuente de energía renovable y de bajo impacto ambiental. Es importante que el tamaño de las partículas de la materia prima sea uniforme y lo suficientemente pequeño para permitir que las reacciones químicas ocurran de manera eficiente en un espacio reducido.

Un tamaño de partícula más pequeño mejora la calidad del syngás y permite reducir el tamaño del reactor o aumentar el tiempo de residencia para descomponer las fracciones más pesadas y condensables, como los alquitranes. Sin embargo, se recomienda que el tamaño de partícula no sea menor de 2-3 mm de diámetro para evitar obstrucciones en los conductos.

La humedad óptima en la materia prima por gasificar se encuentra en el rango del 10-15 %. Valores más bajos pueden hacer que la biomasa absorba humedad al entrar en contacto con el aire, mientras que valores más altos pueden aumentar la formación de hidrógeno, pero reducir la eficiencia térmica del proceso.

6.4.2 Gasificación

La gasificación de biomasa implica varias etapas, cuya secuencia y relevancia dependen del tipo de combustible y del agente gasificante utilizado. Estas etapas se agrupan en tres categorías principales:

Pirólisis o descomposición térmica: En esta fase inicial, la biomasa se somete a un proceso de secado y precalentamiento al ingresar al gasificador. Posteriormente, en ausencia de oxígeno, el combustible se descompone en una mezcla de sólidos, líquidos y gases. Los sólidos resultantes se llaman “char”, y los líquidos, que contienen alquitranes y vapores condensables, se denominan “tar”.

Oxidación o combustión: Cuando el agente gasificante es un oxidante como el oxígeno o el aire, se producen una serie de reacciones de oxidación, en su mayoría exotérmicas, que generan el calor necesario para mantener el proceso en marcha.

Reducción o gasificación: En esta fase, el sólido residual se convierte en gas a través de reacciones principalmente endotérmicas. Las etapas de oxidación y reducción se pueden considerar conjuntamente en una sola etapa de gasificación, donde ocurren diversas reacciones entre el char y la mezcla gaseosa presente.

Estas etapas son fundamentales en el proceso de gasificación de biomasa y tienen un papel crucial en la conversión de la biomasa en biogás o syngás, que después se puede utilizar como fuente de energía. Lo anterior se muestra en la **figura 6.6**.

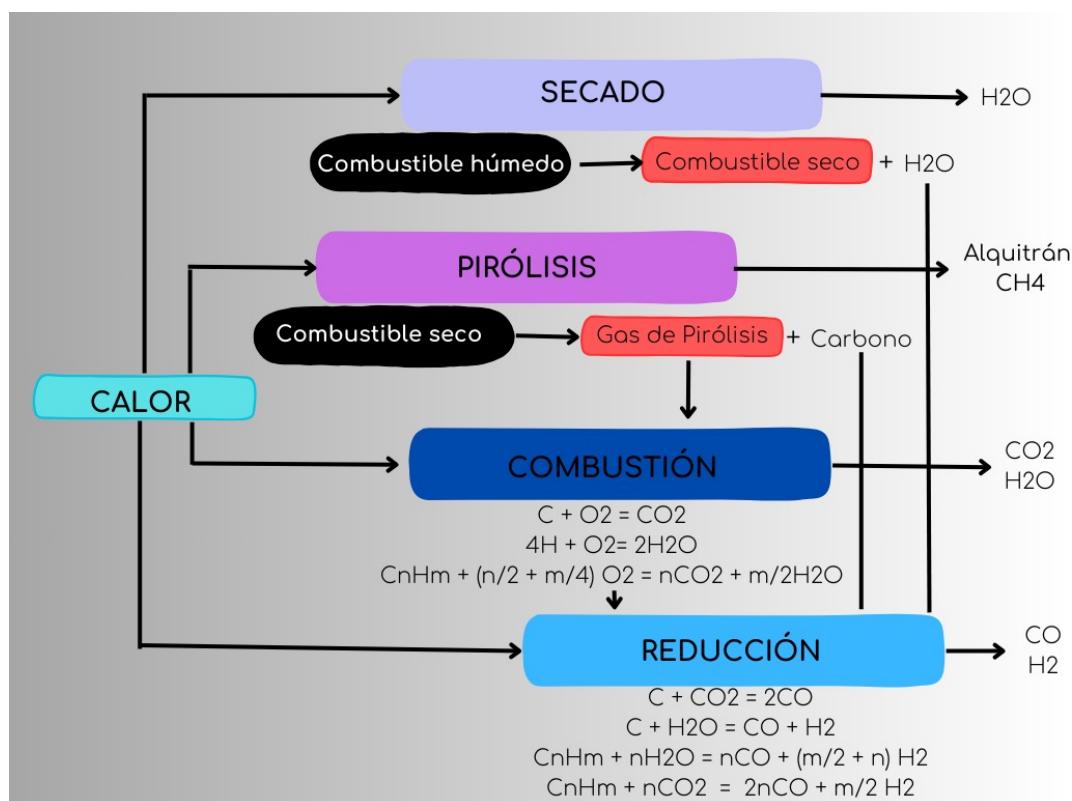


Figura 6.6 Etapas de gasificación (Fuente: <http://www.btgworld.com> 2007).

6.4.3 Biogás

El biogás es un combustible producido mediante la descomposición anaerobia de materia orgánica, se caracteriza por contener predominantemente metano (CH_4 , aproximadamente un 60 %-70 %), seguido de dióxido de carbono (CO_2 , alrededor del 30 %-40 %), y trazas de otros gases como oxígeno (O_2), hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), y sulfuro de hidrógeno (H_2S) en proporciones muy bajas (menos del 1 %). Este gas posee una alta capacidad calorífica, aproximadamente 5500 kcal/m³, que lo hace adecuado para la generación de energía, a través de plantas eléctricas que emplean turbinas u otros generadores diseñados para este propósito. Las instalaciones utilizadas para producir biogás se denominan plantas de biogás o reactores anaerobios. La formación del biogás implica una fermentación que cuenta con la acción catalizadora de microorganismos específicos, esencialmente bacterias y conduce a la reducción de la carga orgánica. Este proceso fue observado por primera vez en el siglo XVIII en la producción de gas en lagos y pantanos con agua estancada, asimismo, en el siglo XIX se identificó como un proceso microbiológico.

Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico que ocurre en ausencia de oxígeno y que tiene como resultado la descomposición de la materia orgánica en productos gaseosos, principalmente metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Además de estos gases, también se generan pequeñas cantidades de hidrógeno (H_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S). También, se forma un subproducto conocido como digestato, que contiene minerales como nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y otros compuestos de difícil degradación. Este proceso se lleva a cabo en un dispositivo llamado biodigestor o digestor de desechos orgánicos, que es un contenedor cerrado y hermético diseñado para encerrar el material orgánico mezclado con agua. La digestión anaerobia se divide en varias fases consecutivas, en las que diferentes grupos de microorganismos descomponen progresivamente el sustrato. Estos microorganismos incluyen bacterias fermentativas e hidrolíticas, bacterias

acetogénicas productoras de hidrógeno, bacterias homoacetogénicas y bacterias metanogénicas hidrogenotróficas (consumidoras de hidrógeno) y metanogénicas acetoclásicas.

La velocidad de crecimiento de estas poblaciones microbianas varía, y cada etapa es crucial para el éxito del proceso en su conjunto. Los problemas en una fase pueden afectar negativamente las fases subsiguientes. A pesar de ser más lento que la degradación anaerobia, la digestión anaerobia es un método valioso para la gestión de residuos orgánicos y la producción de biogás, que puede ser utilizado para generar energía en plantas eléctricas, a través de turbinas y otros generadores adecuados.

Fermentación Anaerobia

La fermentación anaerobia es un proceso biológico que involucra diversas cepas bacterianas y se divide en tres fases consecutivas: hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis. Cada una de estas fases tiene sus propias etapas específicas, que son la hidrolítica, acidogénica, acetogénica y metanogénica.

La fase **hidrolítica** implica la degradación de moléculas orgánicas complejas, como lípidos, proteínas y carbohidratos, en moléculas más simples, como ácidos grasos de cadena larga, aminoácidos y azúcares, mediante la acción de enzimas hidrolíticas extracelulares.

En la fase **acidogénica**, los compuestos obtenidos en la etapa anterior se transforman en ácidos grasos de cadena corta, como ácido acético, propiónico, butírico y valérico, a través de bacterias como Enterobacterias, Streptococo, Butyrivibrio, entre otras.

La etapa **acetogénica** involucra la degradación de las moléculas intermedias en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, realizada por bacterias acetogénicas como *Syntrophobacter wolinii* y *Syntrophomonas wolfei*, así como bacterias homoacetogénicas de varios géneros.

Finalmente, en la fase **metanogénica**, el ácido acético y el hidrógeno se convierten en metano y dióxido de carbono mediante la acción de bacterias metanogénicas acetoclásicas (*Methanosarcina* y *Methanothrix*) y bacterias metanogénicas hidrogenófilas (*Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanobrevibacter*, *Methanogenium*). La producción de metano es valiosa, ya que se puede utilizar como fuente de energía en diversas aplicaciones. Se adjunta un diagrama para exemplificar (figura 6.8).

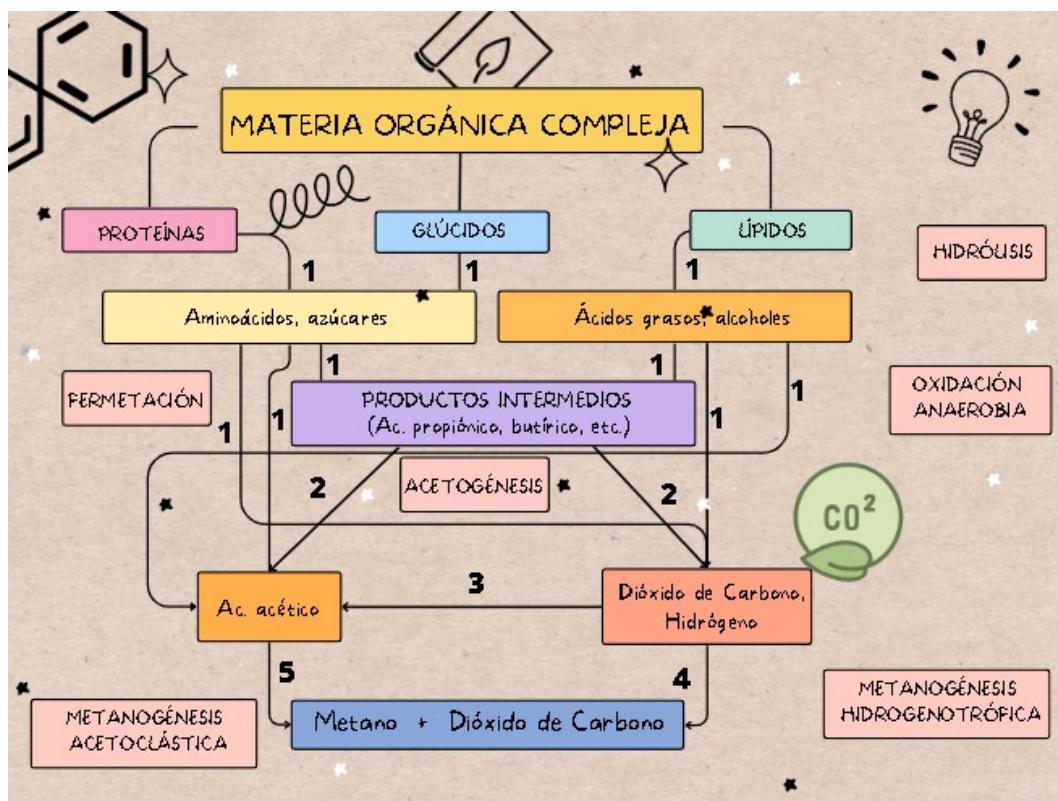


Figura 6.8 Fases de la fermentación anaeróbica y poblaciones de bacterias implicados: 1) fermentativas e hidrolíticas; 2) acidogénicas; 3) acetogénicas; 4) metanogénicas hidrogenotróficas; 5) metanogénicas acetoclásicas (Fuente: modificado IDAE 2007)

6.4.4 Biohidrógeno

El hidrógeno a partir de biomasa presenta ventajas significativas en el contexto del biohidrógeno. En primer lugar, el proceso de producción tiene un balance de CO₂ neutro, lo que significa que la materia orgánica utilizada es

capaz de absorber y retener tanto CO₂ durante su crecimiento como el que se libera durante la producción de hidrógeno. Esto contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Además, la biomasa es un recurso renovable y sostenible en la medida en que su consumo no exceda la capacidad de regeneración natural. En otras palabras, se puede utilizar de manera continua sin agotar los recursos naturales.

Existen varios procesos para obtener hidrógeno a partir de biomasa, como se ilustra en la **figura 6.9**. Es importante destacar que, en comparación con los procesos termoquímicos, los procesos biológicos suelen ser más lentos y con costos relativamente más altos. Sin embargo, ofrecen la ventaja de ser más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente, lo que los convierte en una opción valiosa en la producción de biohidrógeno.

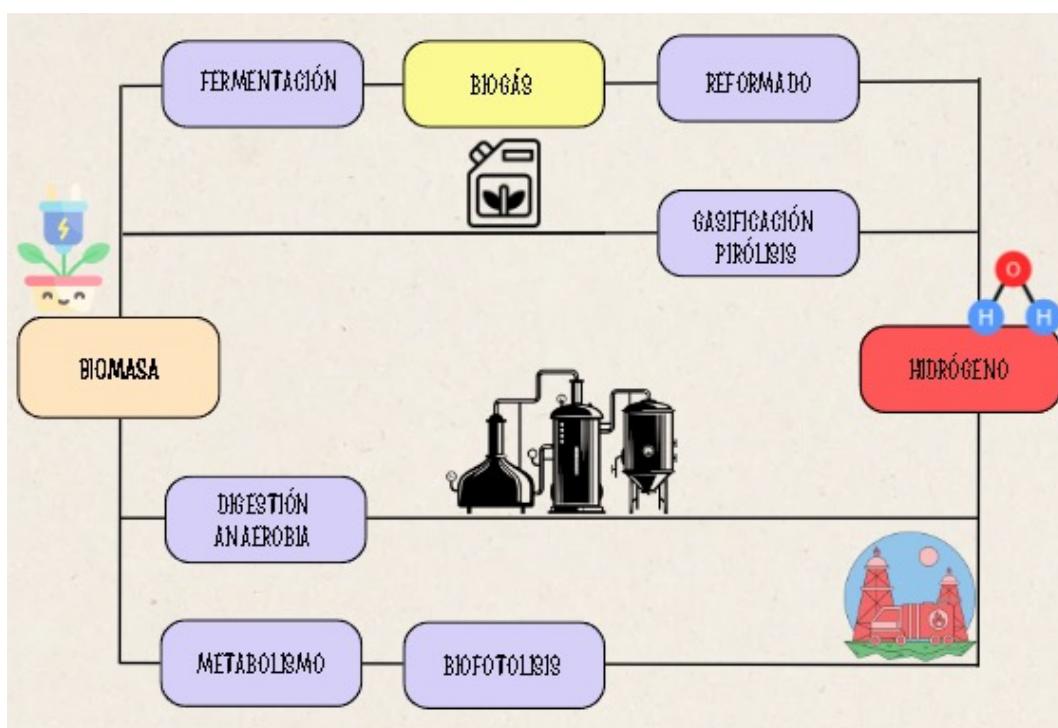


Figura 6.9 Procesos de producción de hidrógeno a partir de la biomasa (Fuente: Basado de Biomasa, Biocombustible y Sostenibilidad Bloque II. Biocombustibles por Dra. Ingeniera de Monte 2007.).

Gasificación y Pirólisis

La producción de hidrógeno a partir de biomasa mediante gasificación y pirólisis es un proceso similar al utilizado con carbón, aunque suele llevarse a cabo en una escala más reducida debido al contenido energético relativamente bajo de la biomasa, que en promedio contiene alrededor del 6 % de hidrógeno en peso.

La gasificación implica una oxidación parcial de la biomasa en presencia de oxígeno y vapor de agua, mientras que la pirólisis se realiza en ausencia de oxígeno. Ambos procesos generan un gas combustible compuesto principalmente por monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H_2), manteniendo una gran parte de la energía contenida en la biomasa original.

Sin embargo, un desafío técnico importante en la gasificación de biomasa es la formación de alquitranes, que pueden condensarse en equipos y causar problemas de obstrucción y suciedad, lo que lleva a paradas no deseadas. La cantidad de alquitranes generados depende de las características de la biomasa utilizada (como tipo, humedad y tamaño de partícula) y las condiciones de gasificación (temperatura, presión, tiempo de residencia del gas, velocidad de calentamiento de la biomasa, entre otros).

A pesar de estos desafíos, la gasificación y la pirólisis de biomasa siguen siendo métodos prometedores para la producción de hidrógeno, ya que aprovechan un recurso renovable y contribuyen a reducir las emisiones de carbono en la producción de este combustible.

Biofotólisis

La biofotólisis es un proceso biológico de producción de hidrógeno que involucra una variedad de microorganismos, desde procariotas hasta eucariotas, y desde organismos fotosintéticos hasta quimiorganotrofos. En organismos fotosintéticos, las enzimas clave para la producción de hidrógeno son la hidrogenasa y la nitrogenasa.

La producción de hidrógeno basada en la hidrogenasa puede ocurrir tanto en presencia de luz como en la oscuridad. En el primer caso, se asocia con la fijación de CO₂ atmosférico y la producción subsiguiente de hidrógeno en condiciones anaerobias y en la oscuridad. Sin embargo, esta metodología tiene la limitación de que la hidrogenasa puede ser inhibida por la presencia de oxígeno, que se genera como subproducto del metabolismo. En el segundo caso, ciertas algas (como las del género *Scenedesmus*) pueden producir hidrógeno en ausencia de luz, permitiendo una producción continua, ya que la enzima hidrogenasa no se inhibe al no generarse oxígeno.

En el caso de las cianobacterias, utilizan principalmente la enzima nitroge-nasa para producir hidrógeno a partir de la fijación del nitrógeno atmosfér-ico, aunque también enfrentan la inhibición por oxígeno, por lo que deben emplear estrategias para evitarla.

Otro grupo de bacterias fotosintéticas anaerobias, como las bacterias rojas y verdes no del azufre, puede llevar a cabo la biofotólisis utilizando compues-tos orgánicos como fuente de carbono. Algunas de las más estudiadas perte-necen al género *Rhodobacter* y son capaces de lograr altas producciones de hidrógeno.

6.5 Controversia sobre la neutralidad de carbono

La biomasa es la única fuente de energía que puede proporcionar un equili-brio positivo en cuanto a las emisiones de CO₂, siempre y cuando se produzca de manera sostenible y renovable. Esto significa que la biomasa debe ser reco-lectada de manera que su consumo sea más lento que la capacidad de la tierra para regenerarse. De esta manera, la materia orgánica puede capturar más dió-xido de carbono (CO₂) durante su crecimiento del que libera cuando se quema, sin aumentar la concentración total de CO₂ en la atmósfera (**figura 6.10**).



Figura 6.10 Neutralidad del carbono (Elaboración propia, basada en el libro ENERGIAS RENOVABLES 2009)

La energía de biomasa ha sido aprovechada desde hace mucho tiempo por el hombre como una fuente de energía limpia, lo que ha beneficiado a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2). Esto se alinea con el objetivo de alcanzar la neutralidad de carbono, que implica la compensación de emisiones para lograr un equilibrio ambiental.

La energía de biomasa dispone de un gran campo de investigación tecnológico, como ejemplo de ello se adjuntan posibles áreas de estudio:

- Rendimiento energético.
- Capacidad de implementar nuevos biocombustibles.
- Competitividad de mercados energéticos.

Una de las grandes ventajas de ocupar la biomasa es que, comparándola con otras energías renovables que existen actualmente, esta puede ser almacenada por un periodo largo para ocuparla cuando sea requerida, ya que es capaz de suministrar un buen porcentaje de flujo de electricidad continua y constante sin que tenga cambios ni variaciones en el tiempo. Además, la biomasa no produce contaminantes sulfurados, tampoco genera partículas sólidas o nitrogenados.

Es importante aclarar que la biomasa no es completamente neutral en cuanto a carbono en la atmósfera, y existen desventajas relacionadas con su impacto en el cambio climático. Aquí se presentan algunas de las desventajas asociadas con la neutralidad de carbono en la atmósfera cuando se utiliza biomasa:

1. **Emisiones de CO₂ durante la combustión:** Aunque la biomasa se considera una fuente de energía renovable, la combustión de biomasa para generar calor o electricidad libera dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera. Aunque los árboles y las plantas pueden volver a absorber este CO₂ a medida que crecen, el tiempo necesario para que esta absorción compense las emisiones puede ser significativo y varía según la velocidad de crecimiento de la biomasa utilizada. Durante este período, las emisiones de CO₂ pueden contribuir al cambio climático.
2. **Cambios en el uso de la tierra:** La producción de biomasa a gran escala puede dar lugar a cambios en el uso de la tierra, como la deforestación o la conversión de tierras agrícolas en plantaciones de biomasa. Estos cambios pueden tener un impacto negativo en los ecosistemas, la biodiversidad y los ciclos del carbono, lo que podría contrarrestar los beneficios climáticos esperados de la biomasa.
3. **Emisiones de gases de efecto invernadero no CO₂:** La combustión de biomasa puede liberar otros gases de efecto invernadero además del CO₂, como el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), que tienen un impacto climático significativo. Estos gases pueden ser emitidos durante la producción, el transporte y la combustión de biomasa.
4. **Eficiencia y tecnología:** La eficiencia en la conversión de biomasa en energía puede variar según la tecnología utilizada. En algunos casos, la eficiencia de conversión puede ser baja, lo que significa que se requiere una mayor cantidad de biomasa para generar una cantidad deseada de energía, lo que puede aumentar las emisiones netas de CO₂.

Si bien la biomasa puede ser una fuente de energía renovable valiosa y sostenible, es esencial abordar las desventajas de manera adecuada mediante prácticas de gestión sostenible, tecnologías de combustión avanzadas y políticas que fomenten la reducción de emisiones y la conservación de los ecosistemas. La neutralidad de carbono en la atmósfera a través de la biomasa requiere un enfoque cuidadoso y equilibrado.

7. Otras energías

7.1 Energía geotérmica

7.1.1 Introducción

De acuerdo con las leyes de la termodinámica, la energía geotérmica se basa en la diferencia de temperatura entre las rocas y el flujo del agua que existe en el subsuelo. El diferencial de temperatura entre dicha interacción aguaroja es lo que permite la generación de gradientes geotérmicos.

La energía térmica se origina a partir de otros tipos de energía, de acuerdo con la primera ley de la termodinámica. Bajo condiciones normales la transmisión de calor se produce de un cuerpo de mayor temperatura a otro cuerpo de temperatura más baja.

Los procesos termodinámicos que ocurren sin la ganancia o pérdida de calor, desde un sistema a otro, son denominados procesos adiabáticos. En condiciones normales, el calor se puede transformar en otras formas de energía. Los gradientes geotérmicos pueden transferirse mediante tres formas posibles, conducción, convección y radiación. La conducción tiene su origen en la litosfera, la convección se lleva a cabo entre el núcleo externo y el manto, mientras que la radiación tiene una transferencia de calor menos significativa que ocurre en la parte continental.

Existen modelos matemáticos que nos permiten calcular los valores de los gradientes térmicos, sin embargo, hay anomalías de temperatura por la presencia de roca fundida (magma) y otra por la circulación de agua en la porosidad efectiva de las rocas y el fracturamiento del subsuelo, lo que origina temperaturas locales que deben ser exploradas con mayor detalle, tomando en cuenta principalmente la geología del área de estudio.

En un régimen conductivo puro, el conocimiento del flujo de calor en el manto y la producción de calor en la corteza permiten determinar un valor geotérmico probable, sin embargo, la heterogeneidad natural de la composición geológica de la corteza dará lugar a variaciones locales a pocos kilómetros de profundidad.

De acuerdo con los distintos gradientes, existen usos distintos para la energía geotérmica, cuando las temperaturas son mayores a 150°C (vapor y fluidos calientes) se utiliza de manera convencional para generar electricidad, mientras que cuando su temperatura es menor a 150°C (agua caliente) se utiliza en centrales binarias [1].

El flujo de calor de la Tierra asciende a 57 mW/m² en la corteza continental y a 99 mW/m² en la corteza oceánica (Barbier 2002 en Adele... 2019).

Las fuentes que generan el calor interno pueden deberse a:

- **El ascenso del magma, que va liberando calor al ascender.** El magma que se encuentra en el centro del planeta se mueve de zonas de alta presión a zonas con bajas presiones, denominadas placas tectónicas. Las placas tectónicas son dinámicas y están en continuo movimiento, al separarse, permiten crear zonas de bajas presiones por donde asciende el magma. Por el contrario, si las placas se unen, una de ellas se subducirá y la presión, a mayor profundidad fundirá el material convirtiéndolo nuevamente en magma.
- **Ascensos de flujos de agua caliente que provienen de fuentes subterráneas.** El magma que no sale a la superficie, puede ascender a través de

grietas y zonas más delgadas de la Tierra, quedando a kilómetros de la superficie terrestre.

Si el magma alcanza algún reservorio de agua meteorológica crea vapor, el cual también comenzará a buscar zonas de menos presión para salir a la superficie. Si existe suficiente presión surgirá un géiser, por el contrario si no hay presión simplemente se crearán fuentes termales.

Rocas almacén de calor por su baja conductividad térmica y diferenciales de temperatura que ascienden por distintos tipos de roca. En ambos casos podrían no tener una manifestación clara sobre la superficie terrestre.

La energía geotérmica se vuelve sistema geotérmico cuando existe una fuente de calor, una zona de depósito donde se almacena el calor y una barrera que impida la fuga de calor.

Dependiendo de la geología de cada sitio se tienen diversos sistemas térmicos, lo que genera un campo geotérmico distinto en cada uno.

De forma general los sistemas geotérmicos se pueden caracterizar como sistemas dominados por vapor, por agua caliente, por vapor y presión, por roca seca caliente y por presencia de magma [2].

Los campos geotérmicos dominados por vapor pueden ser de vapor seco o vapor húmedo, algunos de ellos son: Cerro Prieto (Méjico), Wairakei (Nueva Zelanda) Reykjavik (Islandia), Salton Sea (USA) y Otake (Japón).

Cuando el calor interno de la Tierra es recuperado y aprovechado para la generación de energía, forma parte de una de las diferentes energías renovables, cuyo potencial depende de la cantidad de calor contenido en el interior de la superficie terrestre.

En el año 2016, Méjico promovió el uso de las diferentes energías renovables existentes por medio de proyectos de energía limpia.

7.1.2 Origen

Son dos los posibles orígenes en el calor interno de la Tierra. En primer lugar, el desequilibrio térmico entre el núcleo y la superficie terrestre genera un flujo de calor del interior hacia el exterior. Otro posible origen hace referencia al calor radiogénico generado por decaimiento de isótopos radioactivos de larga vida. La tectónica de placas y las actividades que se generan en las márgenes de estas controlan los procesos térmicos del calor radiogénico. Los modelos teóricos de la conducción de calor que se produce en las placas, tanto oceánicas como continentales, permitieron conocer y delimitar la dinámica que se presenta en la capa denominada como manto, en el interior de la Tierra.

En los primeros kilómetros del subsuelo, donde el agua tiene una mayor probabilidad de existir, los sistemas geotérmicos se hacen presentes mediante la interacción agua-roca en donde se presenta una transferencia de calor. Este intercambio de calor se vuelve más eficiente en tanto exista circulación de agua, ya sea en estado líquido o gaseoso. Dependiendo del sistema geológico asociado, la transferencia de calor tendrá diferentes rangos de temporalidad. Los campos hidrotermales pueden estar activos alrededor de 100 años, lo mismo sucede con el calor radiogénico de los elementos radiactivos. Un reservorio de magma a altas temperaturas puede estar activo de 10 a 100 veces más. Sin embargo, las distintas fuentes de calor están condicionadas a factores físicos, procesos químicos y geológicos que generan distintas escalas de tiempo [1]. En la transferencia de calor en la corteza continental, el núcleo de la Tierra libera calor en el manto a través de la cristalización del núcleo interno, enfriamiento secular del núcleo, separación química del núcleo y por calor radiogénico si existen concentraciones de uranio, torio y potasio.

La generación de calor dentro de las placas oceánicas es menor en comparación con la corteza continental, debido principalmente a la composición de elementos radiactivos. Además, la corteza continental se comporta como un cuerpo flotante bajo una conductividad térmica finita que propicia un sistema convectivo [1]. La corteza continental está asociada a un bajo calor del manto, contrario a lo que sucede en los bordes de las placas en los que se recibe más calor del manto. A este efecto se le denomina “efecto aislante”, en

donde el calor se mueve lateralmente hasta llegar a las márgenes de las placas oceánicas y continentales [6]. La transferencia de calor en la corteza continental ocurre por conducción de calor. Sin embargo, pueden existir episodios de magmatismo que generen advección de calor y con ello, períodos de convección hidrotermal. Los fenómenos anteriormente descritos son procesos de corta duración y en escala de tiempo geológico pueden durar alrededor de 100 años [2]. El conocimiento del calor del manto y la producción de calor en la corteza permiten determinar un valor geotérmico promedio probable, no obstante, las variaciones en la composición de las rocas que conforman la corteza pueden generar variaciones locales, teniendo diferenciales de decenas de grados centígrados a pocos kilómetros de profundidad [9]. Los valores más altos, entre 40°C y 80°C, se observan en áreas volcánicas, en zonas donde la corteza oceánica es delgada o está en continua formación, como las dorsales oceánicas donde el magma está muy cerca de la superficie. En las zonas de subducción y sitios con estabilidad geológica, el valor de temperatura es más bajo, entre los 20°C y 30°C [4]. En la parte superficial de la Tierra (con profundidades de algunos metros) ese presenta el calor provocado por los cambios estacionales de la temperatura y el aire sobre la superficie, sin embargo, las mayores temperaturas se concentran en el interior del planeta (figura. 7.1)

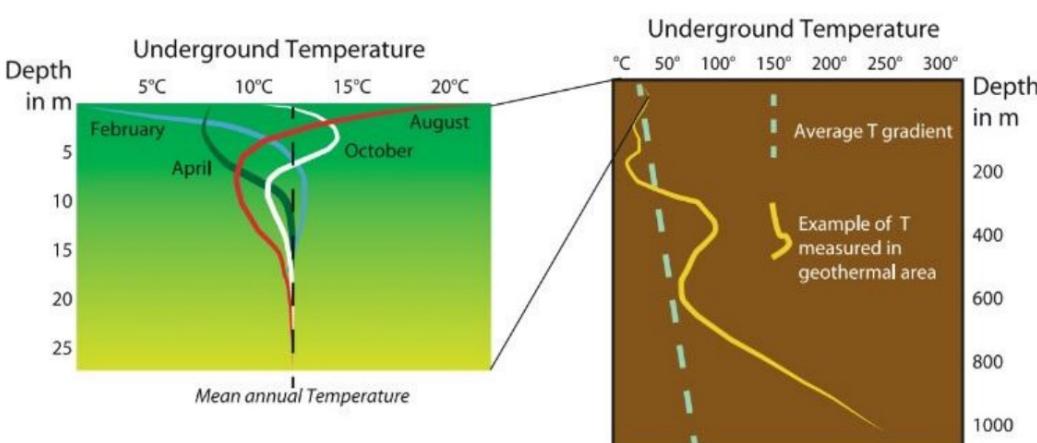


Figura 7.1. La variación de la temperatura depende de la profundidad y las fuentes de energía que propicien un cambio en la temperatura. En la superficie, los cambios estacionales modifican el gradiente térmico, mientras que, a mayor profundidad, son los eventos geológicos los que generan la desestabilidad en el gradiente térmico (Manzella A.; Allansdottir, A. & Pellizzzone, A., 2029).

Un reservorio geotérmico puede contener calor, tanto en la roca como en los fluidos que se encuentren dentro de los espacios porosos o fracturamientos. La extracción del recurso dependerá de la calidad de los datos disponibles, de la geología del sitio y del costo de perforación [5]. Para estimar los recursos geotérmicos de la Tierra se deben tomar en cuenta los datos geológicos y geofísicos. Entre las variables que se consideran para generar las estimaciones térmicas se encuentran la profundidad y espesor de las formaciones rocosas, la geoquímica del agua subterránea, así como la porosidad y permeabilidad de las rocas [7]. En particular, la presencia de fluidos es una característica importante en el desarrollo de los sistemas geotérmicos que pueden distorsionar el modelo del campo de temperatura, dependiendo en gran medida de la porosidad de la roca.

Las rocas con alta permeabilidad tendrán mayor contenido de agua [8]. En las cuencas sedimentarias, la permeabilidad varía hasta cuatro órdenes de magnitud aproximadamente, lo que permite o impide la circulación de los fluidos. Por lo anterior, el conocimiento detallado de modelo de temperatura en un área no será suficiente para caracterizar un yacimiento geotérmico. En ocasiones, el flujo de calor superficial y las temperaturas profundas no están correlacionados, lo que ocasiona errores significativos en las estimaciones de los modelos de temperatura [7]. En los modelados térmicos se deben tomar en cuenta mediciones en núcleos representativos, debido a que la orientación horizontal de los sedimentos arcillosos desarrolla anisotropía, favoreciendo transferencia de calor lateral, lo que dificulta el flujo de calor vertical. De forma general se puede establecer que una temperatura constante se localiza en la parte superior de la litósfera oceánica, mientras que una con flujo de calor bajo, se localiza principalmente en la parte subcontinental y llega con frecuencia a interferir en el calor superficial de la superficie continental [1].

7.1.3 Recursos Geotérmicos

Los recursos geotérmicos dependen de la temperatura, la profundidad, la composición química de la roca y la cantidad de agua que se encuentre dentro del sistema, por lo que varían de un sitio a otro [3]. Una característica

importante de la generación de energía geotérmica es que no requiere de una infraestructura externa de combustible. La producción de energía a partir de la energía geotérmica se basa en el cambio de calor interno de la Tierra a una superficie generadora de energía. Mediante un complejo de tuberías se pueden extraer los fluidos calientes hacia una instalación con una turbina que convierte la energía térmica en energía cinética.

La energía cinética posteriormente se convierte en energía eléctrica, mediante un generador eléctrico [6]. El proceso inicial para hacer girar el eje de la turbina es la entalpía del fluido. La presión y la temperatura del fluido son el recurso energético inicial. La extracción del reservorio y la transferencia hacia la turbina suponen cierta pérdida de energía. Las principales fuentes de pérdida del sistema se dan en la conducción del calor del fluido a la roca circundante; la fricción del fluido, cuando sube a través del pozo, supone otra pérdida y el cambio de gravedad genera una pérdida potencial [2]. En el caso de los sistemas que presentan mayor temperatura (superior a 300° C) el vapor actuará como el fluido que sube por el pozo de extracción, el vapor asciende desde zonas de muy alta presión, lo que origina una descompresión variando su entalpía. Estos sistemas se denominan sistemas de vapor supercrítico o seco y son los que proporcionan una mayor cantidad de energía por kilogramo de fluido extraído [5].

Los sistemas geotérmicos, en los que existe una menor separación de líquido y el vapor durante su descompresión, requieren una infraestructura más simple en la tubería, el pozo y la entrada con la turbina, debido a que existe muy poca agua para eliminar el vapor que entra a la turbina [9].

7.1.4 Energía geotérmica en México

En México el primer proyecto de explotación de energía geotérmica para generar electricidad se desarrolló en el año 1959 con la central geotermoelectrica del campo geotérmico Pathé, en Hidalgo, la cual ya no está en funcionamiento. El Órgano regulador de energía geotérmica en el país es la Comisión Reguladora de Energía (CRE) que depende de la Comisión Federal

de Electricidad (CFE). Actualmente, se encuentran operando cinco campos geotérmicos que generan 932 MW (CEMIGEO, 2020). México se encuentra dentro de los seis primeros lugares con infraestructura termoeléctrica instalada (03-03-3180 p.3). Algunos campos en exploración son: Cerro Prieto, Baja California; Los Azufres, Michoacán; Los Humeros, Puebla; Las Tres Vírgenes, Baja California Sur; y Domo San Pedro, Nayarit (Fig. 7.2)



Figura 7.2 Zonas con potencial geotérmico en México (Altamirano, 2020)

En materia de políticas públicas, en el año 2016 se creó la reforma energética y con ella las leyes y reglamentos que, entre otras cosas, promueven el uso de fuentes de energías renovables, además de dar a conocer, mediante estudios bien documentados, el potencial que tienen las energías limpias de nuestro país. De acuerdo con “The Global Competitiveness Report 2019”, México ocupa a nivel mundial la posición número 45 en energías limpias, y el cuarto lugar en América Latina. Las políticas a nivel mundial buscan garantizar la transición energética en todos los países robusteciendo sus políticas públicas, para así también garantizar el cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 7, “Energía asequible y no contaminante”. (03-03-3180 p.3). Dentro del ODS número 13, “acción por el clima” se señala la necesidad de tomar medidas urgentes para invertir en soluciones sostenibles, es decir, una “transición verde”.

Por lo anterior, en México el sector eléctrico debe incrementar los estudios para conocer el potencial de las energías limpias, de manera que exista un

aprovechamiento sostenible en cada una de ellas (03-03-3180 p.3). En 2018, el gobierno actual destacó la importancia en la creación de programas para fomentar la transición energética a energía solar fotovoltaica, eólica e hidráulica, sin embargo, la energía geotérmica no se incluyó en estos planes de acción (03-03-3180 p.3).

7.1.5 Sistemas termoeléctricos

La energía de los yacimientos geotérmicos se extrae por medio de la perforación de pozos profundos por los que ascienden los fluidos. La composición del fluido generalmente contiene agua con sales disueltas y vapor de agua. La separación de dicha mezcla es el primer paso en las centrales de generación, donde el vapor de agua mueve los álabes de las turbinas (dic_art91_2007)

7.1.6 Cuestionario de evaluación

1. ¿Cómo se genera la energía geotérmica?
2. ¿Qué requisitos debe cumplir un sistema geotérmico para generar electricidad?
3. ¿Qué contiene un reservorio geotérmico?
4. ¿Qué características tienen los sitios que son considerados recursos geotérmicos?
5. ¿Cuál fue el primer proyecto de energía geotérmica en México?

7.2 Energía Nuclear

7.2.1 Generalidades de Energía Nuclear

El filósofo griego Demócrito y el poeta romano Lucrecio son reconocidos como los pioneros en la afirmación de que el mundo físico se componía de un espacio vacío y partículas indivisibles conocidas como átomos. Sin embargo,

fue en 1808 cuando el químico inglés John Dalton desarrolló la primera teoría atómica satisfactoria, en la que aún se consideraba que el átomo era indivisible.

A medida que avanzaba el siglo XIX, el fenómeno de la radiactividad llevó a la creencia de que ciertos átomos eran más complejos en términos de su estructura y, por lo tanto, capaces de una subdivisión espontánea. Además, con el tiempo se demostró que la energía tenía un carácter granular o discontinuo.

En lo que respecta a los estados líquidos y gaseosos de la materia, es más probable encontrar moléculas en lugar de átomos. Se puede definir una molécula como una agrupación eléctricamente neutra de dos o más átomos de elementos químicos, ya sean iguales o diferentes, unidos entre sí en una proporción definida. Las moléculas pueden variar significativamente en términos de su forma y disposición interna, tal como se presume a través de modelos.

Las moléculas individuales son extremadamente difíciles de detectar, incluso con un potente microscopio electrónico que permite ampliar visual y fotográficamente hasta un millón de diámetros.

La energía nuclear es aquella que reside en el núcleo de un átomo. Los átomos representan las partículas más diminutas en las cuales un elemento químico puede dividirse sin perder sus características distintivas. Dentro del núcleo de cada átomo, se encuentran dos tipos de partículas, neutrones y protones, que permanecen unidas gracias a la energía nuclear, que actúa como un agente de cohesión (Figura 7.3).

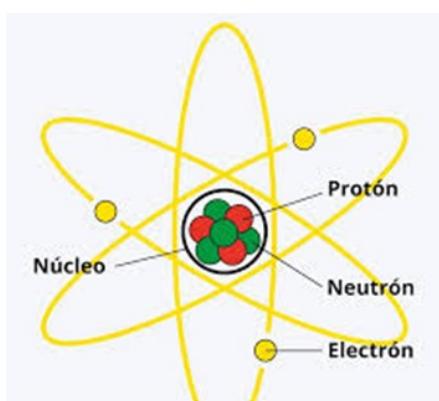


Figura 7.3 Imagen representativa de cómo se ve un átomo (Fuente: EL MUNDO DE LA ENERGÍA NUCLEAR 1980)

Esta forma de energía nuclear puede ser aprovechada para generar electricidad, pero antes de ello, debe ser liberada. Existen dos métodos para obtener esta energía: la fusión y la fisión nuclear. En el proceso de fusión nuclear, la energía se libera cuando los núcleos de los átomos se combinan o fusionan para formar un núcleo más grande, un fenómeno que es responsable de la producción de energía en el Sol. Por otro lado, en la fisión nuclear, los núcleos se separan, generando núcleos más pequeños y liberando energía. Las centrales nucleares utilizan la fisión nuclear para generar electricidad.

En ambos tipos de reacciones nucleares (fisión y fusión), los átomos experimentan una ligera pérdida de masa. Esta masa perdida se convierte en una gran cantidad de energía en forma de calor y radiación.

La energía térmica resultante se emplea para crear vapor y, finalmente, producir electricidad. Aunque la generación de energía eléctrica es la aplicación más común de la energía nuclear, también se utiliza en diversos campos, como aplicaciones médicas y ambientales.

Existen dos procesos que posibilitan la obtención de energía del núcleo de los átomos: la fusión y la fisión nuclear.

Fisión nuclear

En la fisión nuclear, el núcleo de un átomo pesado, al interactuar con un neutrón incidente, se divide en dos o más núcleos de átomos más ligeros, denominados productos de fisión. Durante este proceso, se liberan neutrones, rayos gamma y una gran cantidad de energía.

El núcleo que captura el neutrón incidente se torna inestable, lo que conduce a su posterior ruptura en fragmentos más livianos, alcanzando un estado de mayor estabilidad. Además de estos productos, la reacción de fisión genera varios neutrones adicionales, los cuales al impactar sobre otros núcleos fisionables desencadenan nuevas reacciones de fisión, dando lugar a un efecto multiplicador conocido como reacción en cadena.

Para que se desarrolle una reacción de fisión en cadena, es necesario cumplir con ciertas condiciones relacionadas con la geometría del material fisible y superar un umbral específico de cantidad de este, denominado masa crítica.

Fusión nuclear

La fusión nuclear se define como una reacción nuclear en la que dos núcleos de átomos ligeros, generalmente hidrógeno y sus isótopos (deuterio y tritio), se combinan para formar un núcleo más pesado, a menudo liberando partículas durante el proceso. Estas reacciones pueden tanto absorber como liberar energía, dependiendo de si la masa de los núcleos involucrados es mayor o menor que la del hierro, respectivamente.

Para que ocurra una reacción de fusión, se requiere alcanzar altos niveles de energía que permitan a los núcleos acercarse a distancias extremadamente cortas, donde la fuerza de atracción nuclear supere las fuerzas de repulsión electrostática. Esto implica satisfacer los siguientes criterios:

1. Obtener la energía necesaria mediante aceleradores de partículas o calentamiento a temperaturas muy elevadas. El segundo enfoque se denomina fusión térmica y consiste en calentar los átomos hasta crear un plasma, una masa gaseosa compuesta por electrones libres y átomos altamente ionizados.
2. Garantizar el confinamiento y control del plasma a altas temperaturas dentro de un reactor de fusión durante el tiempo suficiente para que ocurra la reacción.
3. Alcanzar una densidad de plasma adecuada para que los núcleos estén lo suficientemente cerca como para que las reacciones de fusión tengan lugar.

Los métodos de confinamiento convencionales, como las paredes de un recipiente, no son viables a causa de las altas temperaturas involucradas. Por esta razón, se están desarrollando dos métodos de confinamiento alternativos:

- ➔ Fusión por Confinamiento Inercial (FCI): Implica crear un medio tan denso que las partículas no tengan prácticamente ninguna posibilidad de escapar sin colisionar entre sí. Este proceso se logra mediante la implosión de una pequeña esfera compuesta por deuterio y tritio, inducida por un haz de láser. En este estado altamente denso, se permite la ocurrencia de la reacción de fusión.
- ➔ Fusión por Confinamiento Magnético (FCM): Se basa en atrapar partículas cargadas eléctricamente en el plasma en un espacio reducido mediante un campo magnético

Algunos puntos generalizando este tema son los siguientes:

- La energía nuclear no sólo carece de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) en el medio ambiente, sino que también emite radiactividad en menor medida que las plantas de generación de energía a partir de la quema de carbón. La generación de energía nuclear en las centrales actuales se basa en la fisión nuclear, un proceso mediante el cual el núcleo de un elemento pesado se divide en dos núcleos más ligeros, liberando una cantidad significativa de energía. Esta energía se emplea para impulsar turbinas que producen electricidad.
- En la actualidad, la mayoría de los reactores nucleares utilizan uranio como combustible primario. Sin embargo, los residuos resultantes del uranio permanecen radiactivos durante miles de años, lo que plantea desafíos significativos en cuanto a su almacenamiento seguro a largo plazo.
- Una alternativa potencial al uranio es el torio, cuyos residuos radiactivos mantienen su peligrosidad por un período considerablemente más corto y que además se considera un combustible más seguro en términos de su manejo y almacenamiento.

7.2.2 Contribución de la Energía Nuclear a la Energía Renovable

Energía renovable

Las fuentes de energía renovable son aquellas que aprovechan recursos naturales que son inagotables o se renuevan de manera constante a lo largo del tiempo. Algunos ejemplos de estas fuentes incluyen la energía solar y la energía eólica como se muestra en la figura 7.4. También se ha mencionado previamente la biomasa como ejemplo de fuente de energía renovable.



Figura 7.4 Energías renovables (Fuente: Naturaliza, recuperado de: <https://www.naturalizaeducacion.org/2022/03/30/energias-renovables/>)

Indudablemente, la importancia de las energías renovables radica en su capacidad para abordar dos de los desafíos más apremiantes de nuestro tiempo, que es la contaminación del aire y el cambio climático. Estos problemas ambientales tienen un impacto directo en la salud humana y el bienestar de los ecosistemas en todo el mundo, por lo que resulta crucial impulsar su implementación.

Energía nuclear

La energía nuclear, en contraste con las fuentes de energía renovable, se apoya en un principio fundamental de la física llamado fisión nuclear. Este proceso implica la división controlada de átomos pesados, como el uranio, para liberar una cantidad inmensa de energía en forma de calor como se muestra en la figura 7.5.



Figura 7.5 Energía nuclear (Elaboración propia, basado del Organismo internacional de Energía Atómica).

La eficiencia de la energía nuclear es notable, ya que una pequeña cantidad de material nuclear puede producir grandes cantidades de energía de manera continua.

Sin embargo, es importante comprender que, a pesar de su eficiencia y su capacidad para generar electricidad con bajas emisiones de gases de efecto invernadero durante la producción de energía, la energía nuclear no se clasifica como una fuente de energía renovable.

Papel que desempeña la energía nuclear en beneficio de las energías renovables

Los gases de efecto invernadero, en particular el dióxido de carbono (CO_2) liberado como un subproducto de la quema de combustibles fósiles en una diversa gama de actividades humanas, desempeñan un papel fundamental como principales impulsores del cambio climático.

En vista de esta creciente amenaza climática, se ha convertido en una prioridad global la búsqueda de alternativas más limpias y sostenibles para la generación de energía. Es en este contexto que la energía nuclear se destaca, ya que ofrece múltiples ventajas.

Ahora bien, la energía nuclear y las energías renovables pueden complementarse entre sí. Para analizar sus beneficios, primeramente, es importante analizar las diferencias entre la energía limpia y la no renovable. Debido al alto costo que tiene la infraestructura para las energías renovables en comparación de las energías basadas en combustibles fósiles, además de que, históricamente la energía no renovable tiene más avances tecnológicos; aún no se implementan en su totalidad, por lo que, la generación de las energías verdes no es tan basta.

Y lo que se busca con la energía nuclear, es lograr una transición hacia una matriz energética más sostenible. Para ello, la energía nuclear proporciona una fuente de energía constante y confiable, ya que las centrales nucleares

pueden operar de manera continua. Esto puede compensar la intermitencia de las energías renovables, como la solar y la eólica, que dependen de factores climáticos y diurnos/nocturnos. La energía nuclear puede brindar estabilidad a la red eléctrica cuando las energías renovables no están generando electricidad.

Otro punto a favor que tiene el uso de ambas energías es que, al combinarlas, un país o región puede diversificar su matriz energética, reduciendo así la dependencia de los combustibles fósiles. Y con esto, mejorar la seguridad energética y reducir la vulnerabilidad a las fluctuaciones en los precios de los combustibles.

Para ejemplificar lo anterior, una central nuclear necesita aproximadamente 30 toneladas de uranio enriquecido para lograr un correcto funcionamiento de alrededor de un año. La fisión de tan sólo una libra de uranio libera una cantidad de energía equivalente a la combustión de 50 toneladas de carbón. Por lo tanto, el suministro de 60 toneladas es suficiente para mantener en funcionamiento la planta durante dos años. En comparación con una planta de carbón, que requiere entre dos y tres millones de toneladas.

Adicionalmente, las energías renovables se pueden asentar en las instalaciones de las plantas nucleares.

7.2.3 Impacto Ambiental de la Energía Nuclear

La energía nuclear, como fuente de electricidad, ha sido durante mucho tiempo un tema de debate y reflexión en lo que respecta a su impacto en el medio ambiente figura 7.6. Si bien es considerada una opción de baja emisión de carbono, su ciclo de vida completo, desde la extracción de uranio hasta la gestión de residuos radiactivos, los desastres como el de Chernóbil y Fukushima generan grandes preocupaciones y presentan una serie de desafíos y preocupaciones medioambientales únicas.

Este apunte se adentrará en el mundo de la energía nuclear desde una perspectiva estrictamente ambiental. Se analizará cómo afecta a los ecosistemas, a la calidad del agua y del aire, y a la salud humana.

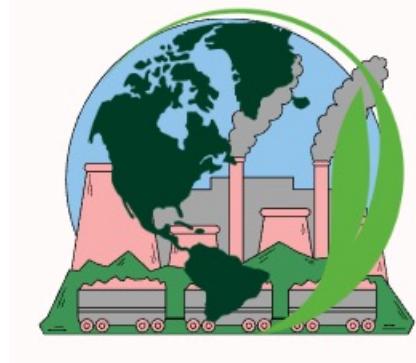


Figura 7.6 Impacto ambiental energía nuclear. (Fuente: Creación propia, canva).

7.2.4 Emisiones efecto invernadero

En términos ambientales, aunque la fisión nuclear en sí no emite gases de efecto invernadero, la cadena completa de producción de energía nuclear implica una cantidad significativa de desechos radiactivos y un riesgo de dispersión en el ambiente. A pesar de su etiqueta de energía “ limpia”, la producción de energía nuclear requiere una gran cantidad de energía para actividades como la minería, el enriquecimiento del uranio, la construcción y desmantelamiento de las centrales nucleares, y el manejo de desechos radiactivos. Esta energía a menudo proviene de fuentes fósiles, lo que indirectamente contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero.

Según datos del Instituto Öko de Alemania, se presenta una comparación de las emisiones de gases de efecto invernadero por kWh para diferentes métodos de producción de electricidad en la Figura 7.7.

| Método de generación | Emisión de gases de efecto invernadero |
|----------------------|--|
| Eólica | 2.8 a 23 |
| Biomasa electricidad | 15 |
| Hidroeléctrica | 4 a 40 |
| Nuclear | 9 a 70 |
| Solar fotovoltaico | 41 a 72 |
| Gas natural | 377 a 427 |
| Carbón | 962 a 1036 |

Figura 7.7 Tabla de emisión de gases de efecto invernadero según el método.

Equivalente de gCo₂/kWh (Fuente: Energía nuclear, contaminación radioactiva y sus efectos a la salud, pg. 41)

A partir de estos datos se puede afirmar que la energía nuclear emite una cantidad menor de gases de efecto invernadero que las de combustible fósil, pero no menos que las de otras fuentes de energía renovable.

7.2.5 Fuentes de Radiación

Existen tres tipos fundamentales de radiación asociada a la energía nuclear con potencial impacto en seres humanos:

- Radiación Alfa:** Esta radiación consiste en núcleos de helio compuestos por dos neutrones y dos protones, lo que les otorga una carga positiva. Suelen ser emitidos por núcleos extremadamente pesados que se transforman en núclidos con cuatro unidades menos de número másico y dos unidades menos de número atómico. Por ejemplo, la desintegración alfa del uranio-238 produce torio-234. Las partículas alfa pueden ser detenidas eficazmente por una capa de unos pocos centímetros de aire o incluso una hoja de papel.
- Radiación Beta:** Las partículas beta son partículas de alta velocidad que pueden ser electrones o positrones, dependiendo del tipo de cambio

nuclear que ocurra. Una radiación beta negativa (electrón) se produce cuando un neutrón se convierte en un protón. Esto provoca un cambio en el núclido, manteniendo su número másico, pero aumentando su número atómico en una unidad. Por ejemplo, el tritio-3 emite dos electrones y se transforma en helio-3. Por otro lado, una radiación beta positiva (positrón) ocurre cuando un protón se convierte en un neutrón. Nuevamente, el núclido resultante tiene el mismo número másico, pero su número atómico disminuye en una unidad. Un ejemplo es el fósforo-30, que se convierte en aluminio-30. Las partículas beta pueden ser detenidas fácilmente por cartón.

- c) **Radiación Gama:** La radiación gamma es de naturaleza electromagnética y posee una alta energía (similar a la luz solar y los rayos X). Cuando un núclido inestable emite partículas alfa o beta, el núclido resultante acumula un exceso de energía en su núcleo, que libera en forma de rayos gamma. Estas radiaciones tienen la capacidad de recorrer largas distancias y penetrar varios centímetros de metal. Son las más absorbidas por el cuerpo humano.

A pesar de que estas radiaciones pueden afectar al ser humano, el grado de impacto depende de su intensidad y la duración de la exposición. Sin embargo, es importante destacar que la humanidad ha estado constantemente expuesta a estas radiaciones a lo largo de su historia.

7.2.6 Radiación y alteración molecular

La cadena de producción de energía nuclear comprende un conjunto de actividades que van desde la extracción de uranio radiactivo hasta la generación de energía y la gestión de residuos nucleares. Estas actividades implican la liberación de radiación en forma de partículas y radiación electromagnética, con potencial impacto en el medio ambiente.

La radiación puede tomar la forma de ondas electromagnéticas o flujos de partículas, como electrones (partículas β), núcleos de helio (partículas α) y

radiación gamma. Cuando esta radiación interactúa con la materia, las partículas incidentes pierden energía debido a colisiones con electrones atómicos. Esto puede llevar a que los átomos se exciten o se ionicen. Si bien en sólidos este efecto puede ser limitado, en líquidos y gases, como el agua, puede tener consecuencias significativas. El agua, esencial para la vida y un componente principal del cuerpo humano, se descompone en iones H⁺ y OH⁻ cuando está expuesta a radiación, lo que puede tener implicaciones químicas y biológicas importantes.

En resumen, la producción de energía nuclear conlleva la liberación de radiactividad que puede afectar la biosfera, especialmente en líquidos como el agua y en los organismos vivos. Esto subraya la necesidad de considerar cuidadosamente los efectos ambientales y de salud en la gestión de la energía nuclear.

Por otro lado, los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes se deben a la ionización de átomos y moléculas en la materia orgánica. La interacción de la radiación con las células puede resultar en la formación de iones primarios, generados directamente por la radiación, y electrones secundarios, que se originan a partir de la interacción de los electrones primarios con otros átomos o moléculas. Esta ionización puede afectar las funciones celulares y tiene consecuencias relacionadas con la cantidad y distribución de la ionización generada por la radiación.

En radiaciones como los rayos X y rayos γ, los fotones pueden desencadenar la liberación de electrones de moléculas o átomos en la materia orgánica, lo que puede dañar células y núcleos celulares. Los electrones resultantes de la ionización primaria, si tienen suficiente energía, pueden causar daños adicionales en otras células. En radiaciones de alta energía, además de los electrones del efecto fotoeléctrico, también se producen fotones y electrones como resultado del efecto Compton, lo que da como resultado un conjunto de electrones con una energía promedio dependiente de la fuente de radiación.

7.2.7 Residuos radioactivos

El manejo de los residuos radiactivos, especialmente los de alta actividad, constituye uno de los principales desafíos de la energía nuclear debido a la falta de una solución definitiva para su gestión y eliminación, así como a su duradera radiactividad. Estos residuos se dividen en alta, media y baja actividad, siendo los de alta actividad los más peligrosos, aunque representan sólo el 1 % del total de residuos, conteniendo el 95 % de la radiactividad. Aunque algunos defensores de la energía nuclear creen que se encontrarán soluciones tecnológicas en el futuro, es crucial encontrar una forma segura de gestionar este tipo de residuos en la actualidad.

Existen alternativas para el manejo y almacenamiento de estos residuos, como el enterramiento en depósitos profundos en formaciones geológicas estables o el almacenamiento en superficie en contenedores especiales con refrigeración. Ambos enfoques tienen ventajas y desventajas. El enterramiento plantea riesgos geológicos y de transporte, además de la dificultad de seguimiento y recuperación de los residuos. Por otro lado, el almacenamiento en superficie permite el acceso y la recuperación de los residuos, pero implica riesgos de seguridad, como el uso potencial con fines bélicos o de terrorismo.

Para los residuos existentes, la solución temporal implica minimizar los transportes, mantener un seguimiento y control riguroso de los contenedores y la posibilidad de recuperación en caso de surgir una solución permanente. Es importante destacar que un aumento significativo en el uso de la energía nuclear podría aumentar la cantidad de residuos sin una gestión adecuada, lo que aumentaría los riesgos asociados.

7.2.8 Gestión de Residuos Nucleares

La gestión de residuos nucleares es un proceso fundamental y altamente especializado que implica la recopilación, clasificación, tratamiento y disposición final de los desechos radioactivos. Para garantizar la seguridad y el cumplimiento de las normativas, es esencial caracterizar adecuadamente

estos residuos, considerando su origen, volumen y características radiológicas, químicas y físicas.

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) juega un papel crucial al establecer normas de seguridad y coordinar esfuerzos a nivel internacional para armonizar enfoques y promover prácticas seguras en la gestión de residuos nucleares. Estas normas son fundamentales para proteger a las personas y al medio ambiente, asegurando un alto nivel de seguridad de manera uniforme en todo el mundo.

Las fases clave de la gestión de residuos nucleares incluyen el procesamiento, donde se tratan y acondicionan los desechos; el almacenamiento, que busca garantizar su aislamiento y confinamiento temporal; y la disposición final, cuyo objetivo es proporcionar una seguridad a largo plazo mediante la colocación de desechos en instalaciones diseñadas con barreras naturales y/o artificiales para proteger a las personas y al medio ambiente.

Las opciones de disposición final pueden variar de acuerdo a los factores como el volumen de los residuos, las regulaciones locales y las condiciones geológicas. En este contexto, el OIEA facilita proyectos internacionales y grupos de trabajo que buscan demostrar la seguridad de las instalaciones de disposición final, además de promover un intercambio de conocimientos entre los Estados Miembros.

La gestión de residuos nucleares es un desafío continuo, y aunque se han logrado avances significativos en áreas administrativas y procedimentales, los problemas relacionados con la aplicación y la seguridad aún persisten. Estos problemas, en su mayoría, sólo pueden ser mitigados o gestionados, y todavía no cuentan con soluciones ideales. Por lo tanto, la cooperación internacional y el compromiso con las normas de seguridad son esenciales para abordar de manera efectiva estos desafíos y garantizar la gestión segura de los residuos nucleares.

Los desechos nucleares requieren un procesamiento cuidadoso antes de su disposición final segura. Este proceso implica la recolección y clasificación

de los desechos, la reducción de su volumen y la modificación de su composición química y física.

Antes de decidir cómo procesar los desechos nucleares, es esencial comprender su origen, tasa de generación, volumen y características. La caracterización de los desechos proporciona información sobre sus propiedades físicas, químicas y radiológicas, lo que ayuda a determinar los requisitos de seguridad y las opciones de procesamiento. Esto garantiza la compatibilidad con los criterios de almacenamiento y disposición final y asegura el cumplimiento de las normativas.

Origen, Utilización y categorías

Los residuos radioactivos se originan como resultado de la utilización de materias nucleares, especialmente en el contexto de la energía nuclear. Cuanto más se emplea esta forma de energía, mayor es la cantidad de residuos generados. Desde la segunda guerra mundial, la energía nuclear se ha aplicado en diversas áreas pacíficas, como la industria, la medicina, las centrales nucleares, la desalación del agua de mar, la producción de hidrógeno, la calefacción urbana y la investigación en universidades, entre otras.

Existen diversas formas de clasificar los residuos radioactivos. La más común es según su estado físico, es decir, si son sólidos, líquidos o gaseosos. Otra forma de clasificarlos es con base en el tipo de radiación emitida, como Alfa, Beta o Gamma. Menos común al público en general es la categorización por actividad específica, que se refiere a la cantidad de actividad radioactiva por unidad de masa o de volumen del material. Una clasificación más técnica se basa en la radiotoxicidad de los residuos, que evalúa su peligrosidad en función de aspectos biológicos, como el tipo de radiación, la absorción en el organismo y la fijación en tejidos u órganos específicos.

Sin embargo, la clasificación más utilizada y discutida a nivel internacional se relaciona con el período de semidesintegración de los residuos radioactivos. En este sentido, tenemos los residuos de baja actividad, que incluye

herramientas, materiales y equipos de protección utilizados durante la manipulación de energía radioactiva; los de mediana actividad, que se generan principalmente durante el proceso de fisión nuclear; y los de alta actividad, que constituyen la mayoría de los residuos y provienen en su mayoría del combustible gastado y las cabezas nucleares de armas radiactivas.

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) desempeña un papel fundamental en establecer un marco de seguridad para la gestión de desechos nucleares y combustible gastado. El OIEA elabora normas de seguridad, coordina comités y brinda servicios de secretaría para convenciones sobre seguridad. Además, organiza proyectos internacionales y grupos de trabajo para armonizar enfoques y promover prácticas seguras en la gestión de desechos nucleares. Uno de estos proyectos es el proyecto CRAFT, que está centrado en demostrar la seguridad de las instalaciones de gestión previa a la disposición final.

Las normas de seguridad que publica la OIEA establecen los principios, requisitos y recomendaciones fundamentales para garantizar la seguridad nuclear. Estas normas son un punto de referencia a nivel mundial para proteger a las personas y al medio ambiente, contribuyendo así a mantener un alto nivel de seguridad de manera uniforme en todo el mundo.

Actividades como el uso médico de la radiación, la operación de instalaciones nucleares, la producción, transporte y manejo de materiales radiactivos, deben de cumplir con estas normas de seguridad. La responsabilidad principal en materia de seguridad recae en la persona u organización responsable de estas actividades, y la regulación de la seguridad es una responsabilidad nacional. Sin embargo, los riesgos radiológicos pueden trascender las fronteras nacionales, y la cooperación internacional es esencial para promover y mejorar la seguridad a nivel global.

Las normas de seguridad se dividen en tres grupos de publicaciones: Las Nociones Fundamentales de Seguridad, que establecen los objetivos y principios básicos; los Requisitos de Seguridad, que detallan los requisitos necesarios para garantizar la protección de las personas y el medio ambiente; y

las Guías de Seguridad, que proporcionan recomendaciones y orientación sobre cómo cumplir con los requisitos.

Se han logrado avances significativos en los desafíos de índole administrativa y de procedimiento, aunque aún persisten los problemas relacionados con la aplicación y la seguridad. Estos dilemas sólo pueden ser mitigados o gestionados y, hasta el momento, no cuentan con una solución perfecta.

La gestión de residuos generados como resultado de la utilización de materiales radioactivos, cuando sus concentraciones exceden los límites máximos permitidos según las normativas vigentes, implica una coordinación eficiente, tanto a nivel administrativo como técnico, la cual se divide en tres etapas, de acuerdo con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA): procesamiento, almacenamiento y disposición final. A continuación, se detallan estas fases.

→ **La fase de procesamiento.**- involucra el tratamiento de los residuos nucleares con el objetivo de asegurar su adecuada disposición final. “Esto exige su recogida y clasificación; la reducción de su volumen y la modificación de su composición química y física; por último, su acondicionamiento para inmovilizarlos y embalarlos antes de su almacenamiento y disposición final” (OIEA, 2018, pág. s/n procesamiento). Para este fin se siguen tres pasos:

- Tratamiento previo: “Se preparan los desechos para su procesamiento, lo cual incluye la clasificación y segregación con el fin de separar los elementos contaminados de los no contaminados. A veces se deben reducir, por ejemplo, troceándolos o triturándolos para optimizar su procesamiento posterior. Las técnicas de descontaminación reducen el volumen de los desechos que requieren tratamiento, lo que a su vez minimiza los costos de su disposición final” (OIEA, 2018, pág. s/n procesamiento).
- Tratamiento: Los residuos son sometidos a tratamiento con el propósito de aumentar su nivel de seguridad y reducir los gastos asociados a las etapas subsiguientes de gestión, tal como se detalla en

el sitio web del OIEA: “Generalmente, los procesos de tratamiento suelen reducir el volumen de los desechos radioactivos al separar el componente radiactivo del grueso de los desechos, lo que a menudo modifica la composición de los desechos durante el proceso. Existen diversas técnicas de procesamiento aplicables al tratamiento de desechos que se utilizan en función de la naturaleza de dichos residuos y los requisitos de aceptación de desechos del emplazamiento de disposición final elegido. La incineración de desechos sólidos y la evaporación de desechos líquidos son dos técnicas habituales de tratamiento”.

- Procesamiento: “se da a los desechos una forma segura, estable y manejable, de manera que puedan transportarse, almacenarse y someterse a disposición final. Las técnicas de acondicionamiento están diseñadas para reducir la tasa de emisión al ambiente de radionucleidos presentes en el bulto de desechos radiactivos, que será sometido a disposición final” (OIEA, 2018, pág. s/n procesamiento).

- ➔ **Almacenamiento.-** Después de recibir tratamiento, los residuos radioactivos deben ser resguardados en áreas específicas que cumplan dos propósitos fundamentales: garantizar su aislamiento y confinamiento, al mismo tiempo que permitan su recuperación una vez que haya concluido el período de almacenamiento. Estas áreas de almacenamiento pueden adoptar dos enfoques: el tipo húmedo, que implica colocar los residuos en piscinas, o el tipo seco, que comprende cuartos equipados con sistemas de enfriamiento.

En el contexto de los residuos nucleares, existen tres tipos principales de almacenamiento. En primer lugar, encontramos el Almacenamiento Temporal Individualizado (ATI), cuyo propósito es mantener los residuos de combustible irradiado o los residuos de alta actividad y larga vida en el lugar donde se generan. Estos sitios de almacenamiento suelen ubicarse en la superficie o a una profundidad relativamente superficial.

En seguida, tenemos el Almacenamiento Temporal Centralizado (ATC), que comparte similitudes con el ATI, pero la diferencia radica en que en

el ATC se reciben los residuos de varias centrales nucleares de un país, consolidándose en un único lugar.

Por último, está el Almacenamiento Geológico Profundo (AGP), una opción altamente respaldada por la comunidad técnica internacional. En este enfoque, los residuos radiactivos se aislan mediante rigurosas especificaciones técnicas y se colocan dentro de contenedores que se depositan en galerías ubicadas en formaciones geológicas estables, a profundidades significativas, aproximadamente alrededor de 500 metros. Estas galerías se encuentran revestidas con material absorbente y se sitúan en terrenos de baja permeabilidad. El Almacenamiento Geológico Profundo representa la fase final de la gestión de residuos y se considera una parte integral de la siguiente fase de gestión de residuos.

- ➔ **Disposición final.-** tiene por objetivo: “garantizar la seguridad mediante la colocación de los desechos en instalaciones diseñadas para mantener un nivel apropiado de contención y aislamiento. En el diseño y mantenimiento de esas instalaciones se tiene en cuenta el uso de barreras naturales y artificiales para proteger adecuadamente a las personas y el ambiente frente a las radiaciones por largos lapsos de tiempo”. (OIEA, 2018, pág. s/n disposición final).

Existen diversas opciones para la disposición final de residuos radioactivos, que pueden variar según el volumen de los residuos, sus características específicas, las regulaciones de cada país y las condiciones geológicas particulares. El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) proporciona una explicación al respecto: “se organizan proyectos internacionales y grupos de trabajo con la finalidad de armonizar los enfoques sobre la seguridad de la disposición final de los desechos radiactivos y proporcionar un foro de intercambio entre los Estados Miembros. Como ejemplo está el proyecto que se ocupa de demostrar la seguridad de las instalaciones de disposición final cerca de la superficie, asimismo, el proyecto centrado en demostrar la seguridad operacional y a largo plazo de las instalaciones de disposición final geológica de desechos radiactivos y la elaboración de un programa específico sobre

la disposición final de combustible gastado y desechos de actividad alta. Otra actividad en este ámbito es el proyecto HIDRA, que se dedica a los aspectos de la intrusión humana en el contexto de la evaluación de la seguridad de las instalaciones de disposición final cerca de la superficie en la fase posterior a su cierre” (OIEA, 2018, pág. s/n disposición final).

7.2.9 Impacto a Futuro

A pesar de que el accidente de Chernóbil dejó un impacto negativo en la percepción política y psicológica de la energía nuclear, las consideraciones para esta fuente de energía en el futuro son notables. Tanto en el corto plazo para el año 2025, como en el largo plazo, la energía nuclear seguirá siendo una pieza fundamental en las políticas energéticas globales.

A corto plazo, gran parte del crecimiento planificado en la energía nuclear ya está en marcha con un crecimiento del 3% anual hasta el 2026. Esto significa que la mayoría de las adiciones futuras serán reactores que ya están en construcción. En regiones donde la demanda eléctrica ha aumentado recientemente, es posible que veamos la construcción de pequeñas plantas de combustibles fósiles con tecnología innovadora, ya que estas se pueden erigir más rápidamente que las plantas nucleares actuales.

Sin embargo, algunos países podrían experimentar proyecciones reducidas de la demanda eléctrica. La disminución de las expectativas en el programa nuclear y las incertidumbres financieras en aumento han llevado a la reducción de la capacidad y la mano de obra en la industria nuclear. La falta de nuevos pedidos ha llevado a muchas empresas a reestructurarse y diversificarse en otras áreas de negocio o a formar alianzas y fusiones para mantener su viabilidad comercial. El éxito de estas estrategias dependerá de cuán rápido se puedan resolver las incertidumbres que rodean la construcción de nuevos reactores.

A pesar de los desafíos que se presenten, la industria nuclear parece estar en camino de cumplir con los objetivos de capacidad nuclear de la OCDE para

el año 2025, ya que sólo se requieren unos pocos proyectos de reactores adicionales, además de los que están en proceso de construcción. Sin embargo, una preocupación mayor radica en la capacidad de la industria para movilizar recursos adicionales rápidamente si las inquietudes actuales sobre los efectos ambientales y climáticos de las plantas de combustibles fósiles se justifican.

El análisis de los efectos a largo plazo del abaratamiento de la energía nuclear nos lleva a considerar diversas dimensiones que pueden influir en la economía y la sociedad. Estos efectos pueden manifestarse a lo largo de un período extenso, abarcando no solo generaciones presentes, sino también futuras, en la cuales podemos mencionar:

Cambios en la tasa de acumulación del capital: La inversión de capital desempeña un papel crucial en el desarrollo económico. Si el abaratamiento de la energía nuclear permite un aumento en el ingreso de una economía, esto puede llevar a una acumulación de capital más rápida. A medida que el capital se acumula, la productividad de la economía puede aumentar aún más, creando un efecto acumulativo a lo largo del tiempo. Aunque el proceso puede verse frenado por la disminución de la productividad marginal del capital a medida que se vuelve más abundante en relación con la mano de obra y la tierra.

Cambios en la población y la mano de obra: El incremento en el ingreso per cápita puede tener efectos variados en la población y la mano de obra. En países con altos ingresos per cápita, podría acelerar la estabilización de la población o incluso reducirla debido a la disminución de la tasa de natalidad y al aumento del ocio. En contraste, en economías cercanas al nivel de subsistencia, un aumento transitorio en los ingresos reales podría generar un rápido crecimiento de la población debido a una reducción de la mortalidad, lo que podría ejercer presión adicional sobre los recursos y aumentar la demanda de mano de obra.

Repercusiones en la tecnología: La oportunidad y la necesidad a menudo impulsan la innovación tecnológica. La devaluación adicional de la energía nuclear podría estimular la invención y perfeccionamiento de dispositivos

de producción y consumo que requieran grandes cantidades de energía. Esto podría conducir a un aumento en la eficiencia y la productividad en varios sectores de la economía.

Costos de desmantelamiento: La prolongación de la vida útil de las instalaciones nucleares puede tener un impacto en los costos de desmantelamiento. A medida que las instalaciones envejecen, los costos de mantenimiento y seguridad pueden aumentar, lo que puede afectar los recursos disponibles para la inversión en nuevas tecnologías.

Por lo anterior, los efectos a largo plazo de la depreciación de la energía nuclear son complejos, pueden variar según las circunstancias específicas de cada país y región. Aunque es difícil predecir con precisión la magnitud de estos efectos, es claro que la energía nuclear puede desempeñar un papel importante en la configuración del futuro económico y tecnológico a lo largo de décadas e incluso generaciones.

La Industrialización y el Ingreso Real

El proceso de industrialización influye en el ingreso real de la población. En las primeras etapas, puede haber una disminución temporal en el ingreso real de los trabajadores manuales debido a la importación de bienes manufacturados baratos. Sin embargo, a medida que avanza la industrialización, los salarios urbanos pueden aumentar y el proceso de urbanización mejoraría las condiciones de vida.

La disponibilidad de energía nuclear puede acelerar este proceso al impulsar el desarrollo industrial. Además, puede reducir la presión demográfica al aumentar la productividad y mejorar las condiciones de vida, lo que, a su vez, estimula el ahorro y la acumulación de capital.

Factores que limitan la Industrialización

Los factores que limitan la industrialización en las áreas poco desarrolladas incluyen:

Capital: La falta de capital es una limitación económica clave para la industrialización. La energía nuclear puede ayudar a reducir las necesidades totales de capital al proporcionar una fuente de energía más asequible.

Destreza y Técnica: La falta de habilidades técnicas y tecnológicas puede ser una limitación tanto económica como técnica. La energía nuclear puede respaldar la adquisición de habilidades técnicas y tecnológicas necesarias para la industrialización.

Energía: La disponibilidad de energía, especialmente en forma de electricidad, es crucial para la industrialización. La energía nuclear puede ofrecer una fuente de energía abundante y relativamente barata, lo que facilita el proceso.

Minerales Específicos: Algunos minerales son esenciales para la industrialización, y la falta de acceso a estos recursos puede limitar el desarrollo industrial. La energía nuclear puede reducir la dependencia de ciertos minerales al permitir una mayor eficiencia en la producción y el procesamiento de materiales.

Teniendo estos puntos a considerar, la energía nuclear puede llegar a tener un papel importante en el impulso de la industrialización en áreas insuficientemente desarrolladas al proporcionar una fuente de energía accesible y al reducir las limitaciones económicas y técnicas que enfrentan estas regiones en su camino hacia el desarrollo industrial.

7.3 Energía mareomotriz

Las centrales hidroeléctricas oceánicas tienen diferente infraestructura. La central mareomotriz almacena el agua oceánica en presas intercambiando el almacenamiento entre pleamar y bajamar (figura 7.8). Existen centrales

hidroeléctricas oceánicas que funcionan con plantas de energía eólica debajo del agua, mediante rotores que funcionan como convertidores eólicos marinos [1].

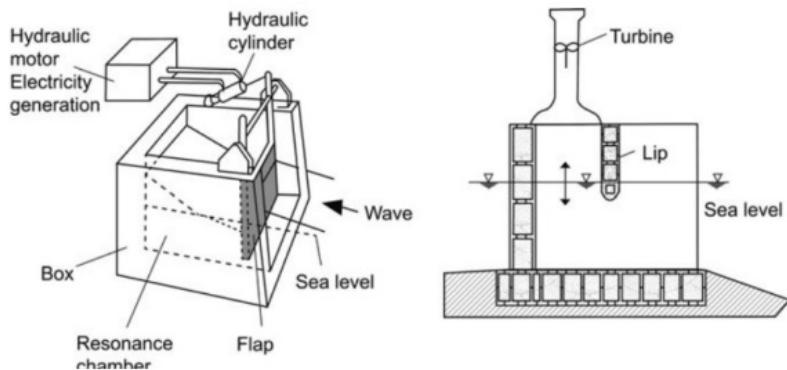


Figura 7.8. Esquema de una central hidroeléctrica marina

8. Almacenamiento de energía

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

8.1 Motivación y necesidad de almacenamiento

La energía eléctrica debe ser utilizada inmediatamente y no es posible almacenarla para su uso posterior. Por esta razón, la generación de electricidad siempre tiene que ser igual a la demanda, es decir, al consumo de energía. Sin embargo, la demanda varía continuamente, por lo que el acto de lograr una igualdad de generación y demanda se conoce como **balanceo de la red**. La demanda fluctúa estacionalmente debido a factores como el clima y la economía; también hay un ciclo diurno reduciendo el consumo en la noche; por último, puede haber variaciones en horas o minutos debido al uso aleatorio de equipos eléctricos por parte de la industria y la población.

Para mantener la red balanceada, es muy importante hacer un adecuado **pronóstico de la demanda** y planear de antemano el **despacho de las centrales eléctricas**, es decir, el itinerario de encendido y porcentaje de carga para cumplir con la demanda esperada. Esta planeación se hace en varias escalas temporales hasta un día antes de la operación de la central.

En caso de haber un error en el pronóstico ocurre una **variación de la frecuencia** de la corriente alterna, lo cual sucede frecuentemente, ya que se trata de un proceso aleatorio y un modelo imperfecto. Por lo anterior, las centrales deben incrementar o bajar su producción para mantener el balance, en caso de que la frecuencia aumente o disminuya, respectivamente. Cada red eléctrica tiene su terminología, regularmente hay **balanceo primario**, con

una escala de segundos; **balanceo secundario**, con una escala de minutos; y **balanceo terciario**, a partir de unos 15 a 30 minutos (figura 8.1).

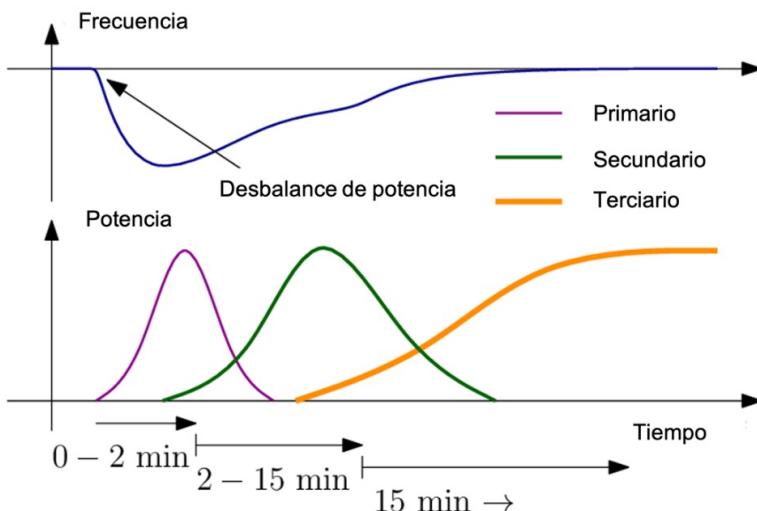


Figura 8.1. Balanceo primario, secundario y terciario de la red eléctrica
(Ersdal et al., 2016)

Cada tecnología de generación tiene una velocidad característica que puede variar su porcentaje de generación, la cual se conoce como la **rampa de generación**. Además, el generar cada MWh adicional tiene cierto costo, principalmente asociado al precio del combustible, que es conocido como el **costo marginal** de cada tecnología. No todas las centrales eléctricas operan de la misma manera. Las **centrales de base**, como las nucleares, carboeléctricas, geotérmicas, y algunas hidroeléctricas, tienen un costo marginal muy bajo pero una rampa muy lenta, por lo que conviene que generen casi todo el tiempo de manera continua y cercano al 100 % de su capacidad. Estas centrales cubren la parte constante de la demanda. Las **centrales de pico**, como las de turbogás, las de diésel y algunas hidroeléctricas tienen un costo marginal muy alto, pero una rampa muy rápida, por lo que conviene que estén apagadas casi todo el tiempo, aunque disponibles para cubrir eventos no planeados como la falla de alguna otra central o la demanda máxima diaria. Por último, hay algunas centrales conocidas como **centrales de seguimiento de demanda** que presentan una operación intermedia que pueden seguir los cambios en la demanda eléctrica.

Algunas formas de energías renovables pueden operar bajo este esquema clásico, como la geotérmica, la hidroeléctrica, termoeléctricas de biomasa y las centrales de energía marítima. Sin embargo, la energía solar y la energía eólica agregan un elemento adicional que es la **variabilidad**. No hay radiación en la noche y la nubosidad puede cambiarla en el día, mientras que el viento también es variable a lo largo del día y del año. Estos dos factores no son controlables; sin embargo, es posible operar redes eléctricas de manera confiable, como lo han demostrado Portugal, Costa Rica, Alemania y Dinamarca.

Gran parte de la variabilidad es predecible y se puede hacer un despacho adecuado, por ejemplo del ciclo diurno de radiación; además, los pronósticos meteorológicos de viento y nubosidad aportan una mayor certidumbre. Asimismo, ambos recursos se complementan, ya que en invierno suele haber más viento y menos radiación mientras que en verano sucede lo contrario; entre el día y la noche hay una diferencia similar. Por otro lado, las variaciones climáticas, longitudinales y latitudinales hacen que, en países grandes como México, el viento siempre esté soplando en algún sitio del país y que la cantidad de horas de luz sea mayor que la que hay en cualquier sitio individual, por lo que la **dispersión geográfica**, es decir, distribuir geográficamente una gran cantidad de centrales, como pueden ser los sistemas residenciales, puede hacer que el conjunto se comporte como una central de base.

Por último, incluso las centrales convencionales tienen una cierta probabilidad de dejar de funcionar súbitamente debido a una falla, para lo cual en toda red eléctrica hay una **reserva de energía** (como el que las centrales generen usualmente a un 90 % de su capacidad). Las centrales renovables son más fiables en este sentido, y esa reserva que existía para los fallos de las centrales termoeléctricas genera una **flexibilidad** que permite llegar a un alto porcentaje de energías renovables sin tener que hacer inversiones adicionales en la red, situación en la que se encuentran aún la mayoría de los países del mundo. Sin embargo, pasado un cierto porcentaje de generación o **porcentaje de penetración** de energías renovables (variable para cada red, pero generalmente siendo una cifra de dos dígitos) se agota la flexibilidad que dan las reservas existentes, la dispersión geográfica, y el despacho mejorado con pronósticos.

Después de este punto, existen momentos de exceso de generación y otros de exceso de demanda, por lo que es necesario convertir la energía eléctrica a otro tipo de energía y así, almacenarla en el día para usarla en la noche o generarla en verano y usarla en invierno. El almacenamiento en sí no es una forma de generación, ya que sólo transporta la energía temporalmente y como hay una cierta eficiencia, en realidad implica una pérdida neta de energía.

8.2 Parámetros de los sistemas de almacenamiento

Las baterías y otros sistemas de almacenamiento tienen ciertos parámetros que es importante definir. La **capacidad** (C) es la cantidad de energía eléctrica que se puede obtener de la batería y se mide generalmente en Amperes-hora (Ah). La mayoría de los sistemas de almacenamiento, y en especial las baterías, tienen una **capacidad efectiva** que es menor a la capacidad total del sistema. La **profundidad de descarga (DoD)**, por sus siglas en inglés) corresponde al porcentaje de la cantidad de energía del total que se ha extraído del sistema, mientras que el complemento es el **estado de carga (SoC**, por sus siglas en inglés), que es el porcentaje de energía remanente. Existe una **profundidad de descarga máxima**, que en el caso de las baterías está determinada por posibles daños al sistema y que determina la capacidad efectiva.

La cantidad de energía que se puede obtener de una batería depende de la potencia de carga o descarga que se aplica, es decir, entre más rápido se descarga la batería menos energía se puede obtener de esta. La **potencia efectiva de carga o descarga (P_{ch})** se relaciona con la potencia aplicada (P) en carga o descarga mediante un parámetro α , que depende del SoC y de si se trata de carga o descarga:

$$P_{ch} = \alpha P^2$$

Aunque no se utilice, una batería pierde carga a lo largo del tiempo en lo que se conoce como **autodescarga**, que es función del SoC. La **eficiencia de ida y vuelta (η_T)** mide la relación entre la energía que se utiliza para cargar la

batería o sistema de almacenamiento (E_{in}) y la energía que obtiene de este (E_{out}):

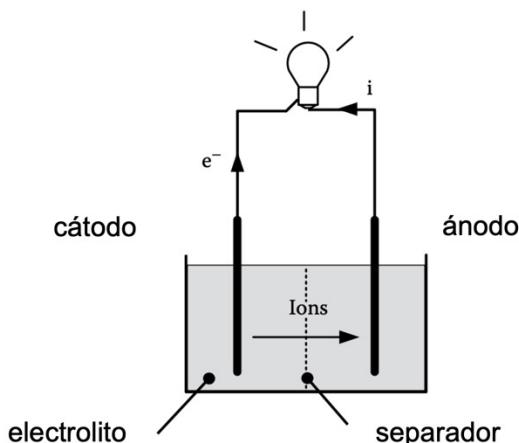
$$\eta_T = \frac{E_{in}}{E_{out}}$$

La eficiencia de ida y vuelta es función de la pérdida por autodescarga y las pérdidas en carga y descarga.

8.3 Baterías

Una **batería** es un sistema de **almacenamiento electroquímico**, donde la energía eléctrica es convertida en energía química a través de una **reacción de oxidación-reducción** y viceversa. Un **electrodo** es el elemento donde se lleva a cabo la reacción que genera un flujo de electrones; el polo positivo se llama **ánodo** y el negativo **cátodo** (figura 8.2). La corriente se transporta al circuito eléctrico mediante los **conductores de corriente**, que suelen ser metálicos, y entre los electrodos a través de un medio llamado **electrolito**, que en muchas ocasiones es líquido.

Figura 8.2. Celda electroquímica (Ruffer, 2018)

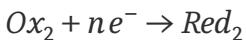


La reacción en el cátodo es:



Donde Red_1 es una especie química reductora (fuente de electrones), Ox_1 es una especie oxidante (que acepta electrones), n es un número entero, y e^- es un electrón libre. La reacción en el cátodo es:

La reacción global es:



De acuerdo con el tipo de batería y las especies involucradas se logra un cierto voltaje, que se puede calcular a partir de la serie electroquímica. Los voltajes suelen ser bajos, por lo general inferiores a 5 V. Para llegar a los voltajes usuales de trabajo (12, 24, 48 V y más para almacenamiento en la red eléctrica) se suelen colocar celdas en serie para sumar sus voltajes. El voltaje de una celda varía de acuerdo con el SoC. Para cargar y descargar una batería se requiere un sistema de control que monitoree el voltaje para detectar el SoC, la auto-descarga, la DoD máxima y el SoC máximo para evitar daños e incendios. Este sistema se conoce en inglés como **BMC, Battery Management System**.

Una batería produce corriente directa. Los aparatos electrónicos suelen utilizar esta corriente, por lo que no es necesario convertir la energía eléctrica obtenida de sus baterías. Por otro lado, la gran mayoría de las redes y circuitos eléctricos son en corriente alterna, lo que requiere un inversor que tendrá una pérdida al pasar de corriente directa a alterna y viceversa.

El tipo más común de baterías es el de **plomo-ácido** que tiene electrolito acuoso, por lo regular se encuentran en electrodomésticos y automóviles, principalmente. Este tipo de baterías suelen tener una eficiencia de ida y vuelta de alrededor de 75 %, una DoC máxima de 50 %, una densidad de energía de 30 Wh/kg, y vidas útiles de 1 a 5 años, dependiendo del ciclo de carga y descarga. Existen también baterías alcalinas de hierro-níquel, níquel-cadmio, zinc-bromo (las últimas dos usadas en baterías a escala de red eléctrica) y tecnologías de electrolito no acuoso, desarrolladas a partir de los 80s y que utilizan litio (Li), uno de los elementos más electropositivos (-3.02 V). Existen baterías de litio-metal, litio-polímero, y de **ion-litio**. La tecnología de ion-litio tiene muy altas densidades de energía (200 Wh/kg), eficiencias de ida y

vuelta de alrededor del 95 %, DoC máximas de 80-90 %, y vidas útiles de hasta 10 años. Pueden tener también tasas de descarga muy altas, dependiendo de la tecnología en particular. Sin embargo, son mucho más caras que las baterías de plomo-ácido, aunque su precio ha caído exponencialmente en los últimos años. Estas características las han hecho las baterías de elección en electrónicos como celulares, para electromovilidad y para aplicaciones de almacenamiento de red.

Las baterías suelen tener una **densidad energética**, es decir, cuánta energía se tiene por unidad de masa, de entre 30 y 200 Wh/kg, mientras que los hidrocarburos líquidos suelen llegar a densidades de 10 kWh/kg. Esta diferencia de densidad energética ha sido uno de los principales retos de diseño en la creación de automóviles eléctricos, donde el uso de materiales novedosos y la eliminación de elementos innecesarios en los trenes eléctricos, como las transmisiones, han logrado reducir el peso total de los vehículos.



Figura 8.3 Izquierda: sistema de baterías conectado a la red eléctrica (Lambert, 2017), derecha: sistema de baterías casero (BVI Solar, s.f.)

Las baterías suelen utilizarse para almacenar energía en la red eléctrica en escalas de horas (figura 8.3 izquierda). Asimismo, permiten mitigar la meteorología variable a lo largo de un día, los fallos a corto plazo en centrales eléctricas y en la previsión de la demanda, además de compensar ciclos naturales deterministas de variabilidad como la ausencia de energía fotovoltaica en la noche. También pueden ayudar a disminuir la pendiente de rampas de energía, como la que se da por el efecto conjunto de la puesta del sol y la entrada de la hora pico, en lugares con alta penetración de energía

solar, conocida como curva de pato. Incluso, pueden disminuir la demanda máxima pico, absorber el exceso de generación renovable cuando hay poca demanda y proveer control primario y secundario en el balanceo de la red. Los usuarios privados también pueden limitar su demanda y obtener ahorros usando baterías, además de tener un sistema de respaldo en caso de un apagón (figura 8.3 derecha).

Por otro lado, un sistema de control por inteligencia artificial podría aprovechar el almacenamiento distribuido de los automóviles eléctricos. Si los usuarios dejan sus carros conectados toda la noche, se puede tener un ciclo de carga que optimice la vida útil del sistema, que cargue fuera de momentos pico y que descargue en momentos pico a lo largo de toda la red, evitando la congestión de las redes de transmisión y distribución.

Las baterías tradicionales tienen metales pesados que se pueden reciclar, pero también pueden contaminar fácilmente suelos y agua, mientras que las baterías modernas como las de ion-litio requieren tierras raras que escasean y pueden requerir un importante esfuerzo de minería, agudizando problemas geopolíticos. El país con mayores yacimientos de litio en el mundo es Bolivia, mientras que México está en la posición 10.

8.4 Plantas de rebombeo

La energía hidroeléctrica tiene la ventaja de ser extremadamente flexible en su operación, arrancar en segundos con la apertura de una compuerta, incluso si no hay tensión en la red eléctrica, y puede suministrar potencias muy altas en rampas rápidas. Además, este tipo de energía es inherentemente una forma de almacenamiento estacional. Muchos países aprovechan la temporada de lluvias para llenar sus presas, mientras que en la época de secas utilizan el agua almacenada para consumo humano, riego, y generación eléctrica.

Sin embargo, también es posible utilizar a las centrales hidroeléctricas para almacenar los excedentes de energía generados por la energía solar y eólica, así mismo para aumentar la confiabilidad de la red en los momentos de demanda

pico y cuando la generación renovable sea baja. Las centrales necesitan poder operar tanto en un modo de generación de energía con turbinas como en uno de bombeo, para almacenar la energía eléctrica en forma de energía potencial gravitacional. Las **centrales de rebombeo** operan de esta manera y no son una implementación reciente, ya que la primera estuvo en Engeweiher, Suiza en 1907. Actualmente, la central más grande se encuentra en Fengning, China, con una capacidad de generación de 3,400 MW y de almacenamiento de 40 GWh. México aún no cuenta con sistema de rebombeo, mientras que en Estados Unidos tiene un 20 % de la capacidad global instalada.

La gran mayoría de las centrales de rebombeo utilizan un sistema de dos vasos de almacenamiento con una diferencia de elevación (figura 8.4). En la represa principal del vaso inferior se encuentra el cuarto de máquinas donde existe una tubería forzada que conecta a ambos vasos. Es raro que se tengan dos conductos diferentes de bombeo y generación; por lo general existe una sola máquina eléctrica que actúa como generador y motor, lo que disminuye costos (figura 8.5).

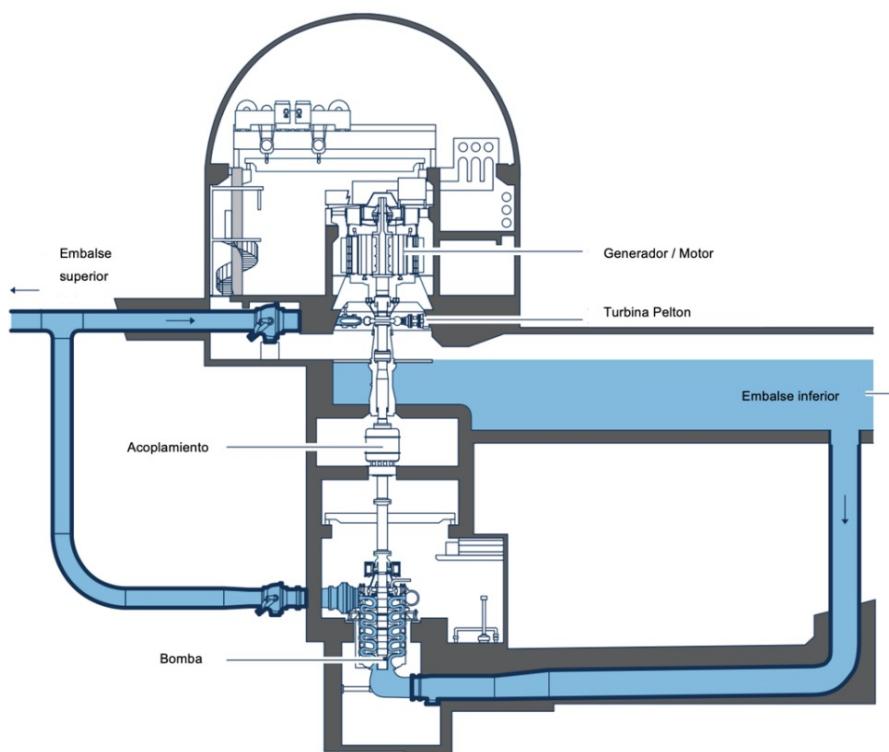


Figura 8.4. Sistema de rebombeo terciario (Ruffer, 2018)

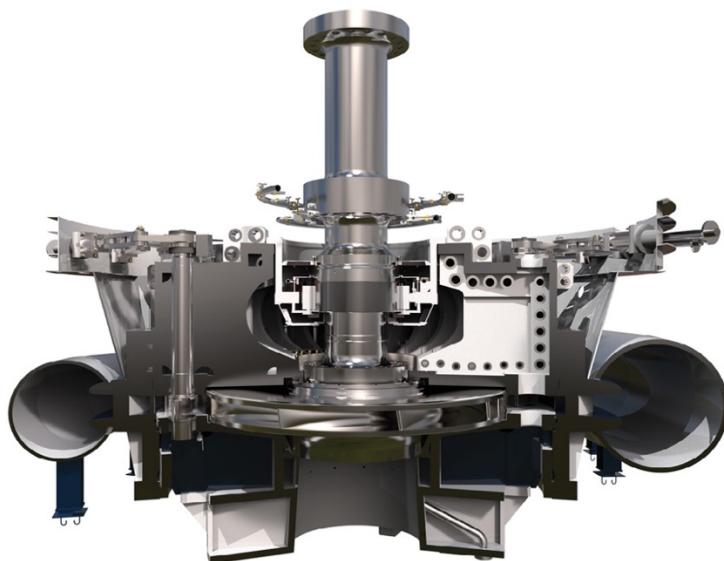


Figura 8.5. Turbina Francis reversible
(Ruffer, 2018)

En una la primera tipología, el **sistema terciario** tiene por un lado una turbina tipo Pelton que funciona a presión atmosférica, convirtiendo toda la presión del fluido en energía cinética. Este tipo de turbina no puede operar en sentido contrario, por lo que adicionalmente se cuenta con un sistema de bombeo radial. Tanto la bomba como la turbina comparten el mismo eje y máquina eléctrica, mientras que la alimentación y salida del sistema se bifurca para tener un conducto para bombeo y otro para generación; en este caso el eje sólo opera en un sentido, simplificando el diseño de la máquina eléctrica. La segunda tipología involucra un sistema de turbina reversible, generalmente del tipo Francis (figura 8.5). Por lo general, el diseño de la máquina eléctrica es más complejo, pero las obras de conducción se simplifican considerablemente, reduciendo los costos totales.

La problemática de tener dos almacenamientos es que la topografía necesaria para el almacenamiento superior es difícil de encontrar, sobre todo en conjunto con un río cercano en el que se pueda construir un sistema hidroeléctrico; una exploración inicial de factibilidad debe identificar los sitios con características idóneas. El almacenamiento superior suele ser totalmente artificial sin conexión con algún río o ser un lago; por lo general estos sitios se encuentran en zonas remotas y con un balance ecológico delicado, lo que añade aún más impactos a los que tiene la energía hidroeléctrica convencional.

Las bombas y turbinas hidráulicas tienen una eficiencia de operación de acuerdo con la carga y el gasto que manejan, por lo que ambos sistemas tienen un punto de operación ideal con máxima eficiencia. En un sistema de rebombeo se tienen pérdidas de energía debidas a la eficiencia mecánica, a la eficiencia de conversión eléctrica, a la eficiencia de sincronización (en el caso de una turbina de velocidad variable) y las pérdidas por evaporación en el vaso de almacenamiento. Generalmente, se alcanzan eficiencias de viaje redondo entre un 70-80 %, si el sistema está diseñado adecuadamente.

8.5 Economía de hidrógeno

El hidrógeno verde, producido por electrólisis con energías renovables, puede ser utilizado como un combustible líquido. Tiene una densidad energética de alrededor de 120 MJ/kg, lo cual es tres veces la densidad de otros combustibles como el diésel o la gasolina. Su principal defecto es que para ser almacenado de forma líquida debe de estar en un tanque presurizado y aislado térmicamente, para lograr un almacenamiento criogénico a 33 K. Es preferible almacenarlo en forma gaseosa a temperatura ambiente y a presión atmosférica, con una densidad energética incluso menor que el gas natural. Existen formas de almacenamiento químico, como los hidruros metálicos o el metanol, pero existen pérdidas de energía en la conversión y complicaciones técnicas adicionales. Por otro lado, el hidrógeno es difícil de almacenar, ya que se puede fugar fácilmente, es fuertemente explosivo y muy volátil.

Sin embargo, utilizar el hidrógeno como el principal combustible líquido lo posicionaría como la divisa energética de la economía mundial, permitiendo acoplar una gran cantidad de sectores y descarbonizar industrias que hasta el momento no encuentran alternativas para reducir sus emisiones. El hidrógeno se puede quemar en una caldera para calefacción o agua caliente sanitaria, o puede ser el combustible de un motor de combustión interna. En ambos casos, la combustión ideal del hidrógeno produce únicamente vapor de agua como subproducto e incluso si la combustión es parcial no se producen particulados. En realidad, sí hay una cierta cantidad de emisiones de

NO_x debido a la disociación térmica del nitrógeno atmosférico, lo mismo que sucede al utilizar un combustible convencional.

Es posible utilizar hidrógeno en un motor de combustión interna como en los automóviles adaptados a gas natural en un pequeño porcentaje de mezcla, o modificar ligeramente los motores para permitir hasta un 100 % de hidrógeno. Los motores de hidrógeno también se podrían utilizar para locomotoras, aviones, y embarcaciones. El hidrógeno se podría mezclar en un pequeño porcentaje con la red de gas natural y utilizarse en los quemadores de boilers y calderas residenciales sin modificaciones, o de igual manera tener equipo especializado para quemar únicamente hidrógeno. Por otro lado, se podría utilizar el hidrógeno para grandes hornos industriales, ya que por la potencia energética que requieren no se suelen conectarse a la red eléctrica y en su lugar utilizan combustibles fósiles. Los hornos siderúrgicos, hornos de tambor para cemento Portland y hornos de túnel para cerámicos y mampostería son algunos ejemplos de las industrias en las que se podría utilizar la combustión del hidrógeno.

La alternativa más eficiente y con menor impacto ambiental en la utilización de hidrógeno es el uso de celdas de combustible (figura 8.6). Las celdas de combustible son un tipo de celdas electroquímicas de flujo (celdas con un anolito y un catolito análogos al ánodo y cátodo que fluyen y reaccionan entre sí a través de una membrana) que generan una corriente eléctrica a partir de la reacción redox entre el oxígeno y el hidrógeno.

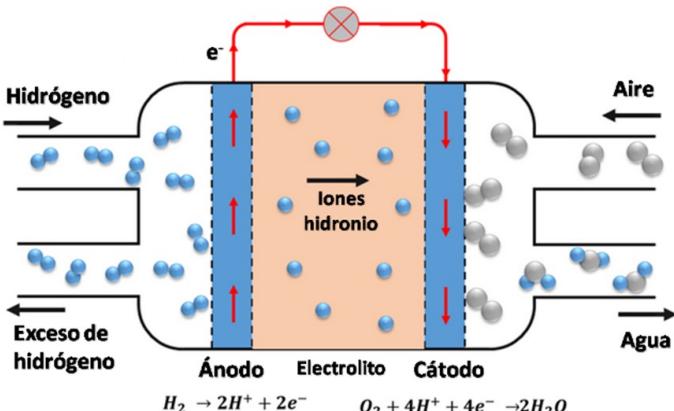


Figura 8.6. Celdas de combustible (Morón, 2022)

La reacción química en el anolito es:



En el catolito la reacción es:



En las celdas de combustible convencionales la temperatura de trabajo es la del medio ambiente y el oxígeno se obtiene directamente del aire. En este caso el resultado de la reacción es exclusivamente vapor de agua, evitando cualquier problemática de contaminación local del aire. Existen múltiples variantes de la tecnología, como celdas de membranas de intercambio de protones, celdas de ácido fosfórico, de ácido sólido, de combustible alcalino y celdas de alta temperatura como de combustible de óxido sólido y de carbonato fundido.

Existen ya automóviles particulares, autobuses y locomotoras con celdas de combustible. Sin embargo, los precios siguen siendo muy altos, existen pocas estaciones de recarga, y la principal limitación de la economía de hidrógeno es que se necesita una infraestructura sólida de distribución y almacenamiento análoga a la de los combustibles fósiles, pero que requiere tiempo y una gran inversión para desplegarla. Otro uso de las celdas de combustible es como plantas de emergencia para proteger a los edificios de posibles cortes eléctricos y tener un suministro ininterrumpido de energía. En la actualidad, las máquinas de emergencia consisten en motores de diésel que generan una gran cantidad de emisiones y ruido, mientras que como se mencionó anteriormente las celdas de combustible no generan emisiones y su operación es silenciosa.

8.6 Otras tecnologías de almacenamiento

Existen muchas otras propuestas de tecnologías de almacenamiento, la mayoría de las cuales se encuentran en etapas muy tempranas y a las que no se les han encontrado soluciones comerciales.

El **almacenamiento por potencial gravitacional** (figura 8.7) consiste en utilizar energía para levantar un elemento de gran masa con una grúa, para posteriormente bajarlo de manera controlada, generando energía en el proceso. Esto es parecido al concepto de los frenos regenerativos de un automóvil eléctrico, donde en vez de utilizar balatas que disipen calor, se reduce la velocidad con un generador en el eje que produce electricidad mediante la resistencia a la rotación de este. En grandes cuevas o minas abandonadas se puede aprovechar el **almacenamiento por aire comprimido**, donde con el exceso de generación se bombea aire, incrementando la presión, y cuando se extrae energía se utiliza una turbina que la obtiene del aire en movimiento entre la cueva a presión y el exterior. Estos dos sistemas tienen el potencial de almacenar energía tanto a corto como a mediano y largo plazo, dependiendo de sus características individuales.



Figura 8.7.

Almacenamiento por potencial gravitacional (Olson, 2018). A la izquierda se tiene una carga completa, a la derecha el sistema está descargado.

Otro sistema mecánico es el del **volante de inercia**, que consiste en una rueda atada a un eje que gira. Si el par que lo hace girar desaparece, el eje sigue girando debido a la inercia rotacional que tiene el volante. Esta tecnología se utiliza en los motores de combustión interna, en los motores de vapor, y es la principal forma de balanceo primario en las redes eléctricas, donde la rotación de los generadores de las centrales eléctricas convencionales genera una resistencia a una caída súbita de la frecuencia eléctrica. Debido a la disipación de energía por fricción, los volantes de inercia sólo almacenan energía durante un tiempo limitado de segundos o minutos. Algunos desarrollos recientes que se han utilizado, sobre todo en la industria aeroespacial, utilizan rodamientos de levitación magnética, minimizando así estas pérdidas.

Un **capacitor** es un componente eléctrico que almacena energía de forma electrostática. Se utiliza para almacenar una pequeña cantidad de energía en circuitos electrónicos, como los que existen en una computadora para evitar una pérdida de memoria catastrófica, en el caso de una interrupción súbita del suministro eléctrico, o para mantener el reloj interno de esta. En la electrónica de potencia se utilizan principalmente para mejorar la calidad de la energía eléctrica. Existe una variedad que se conocen como **supercapacitores**, que pueden almacenar una cantidad mucho mayor de energía, pero a voltajes más reducidos. Los supercapacitores actuales tienen una vida útil mucho más larga que una batería, ya que resisten más ciclos de carga y descarga, y además pueden entregar la energía en una rampa mucho más rápida. Sin embargo, la mayoría de los capacitores tienen un tiempo de autodescarga mayor en escala de semanas, mientras que las baterías se descargan en una escala de meses y tienen una menor densidad energética que las baterías.

Los supercapacitores suelen utilizarse donde se requiere energía en el corto plazo y donde no es necesario mover la fuente de almacenamiento una gran distancia. En un auto eléctrico no es viable que la principal fuente de energía sea un supercapacitor, ni que en una red eléctrica se utilicen para mantener el balance de energía en escala de horas o días. Su principal uso se ha centrado en otros tipos de electromovilidad, como los autobuses eléctricos con catenaria (conocidos como trolebuses en México) y los tranvías sin catenaria.

Los tranvías sin catenaria se han utilizado en centros históricos de Europa en los que el cableado aéreo afectaría la estética del lugar o donde por ciertas actividades no es viable tenerlo. En Sevilla, España, se tiene la procesión religiosa de mayor escala en el mundo cristiano durante la Semana Santa. Para este evento tenía que retirarse la catenaria del tranvía, lo que provocaba que estuviera fuera de operación dos meses al año. Actualmente el pantógrafo del tranvía se eleva únicamente en cada estación donde se recarga con la energía necesaria para llegar a la siguiente estación.

Por último, el calor se puede almacenar para utilizarse como energía eléctrica posteriormente. Este es el principio de funcionamiento de la energía solar termoeléctrica, mencionada con más detalle en el capítulo 3.

9. Aspectos económicos y financiamiento

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

La energía es el motor que impulsa a la sociedad moderna, su producción y consumo tienen un impacto significativo en el medio ambiente y en la economía global. Por esta razón, los costos asociados a la generación de energía son un tema crucial, ya que la demanda energética sigue en constante aumento debido al crecimiento poblacional y al desarrollo de la industria.

Al construir una planta generadora de energía, es importante tener en cuenta una variedad de costos, entre los cuales se incluyen [16]:

- Costos totales de instalación (CI).
- Costos fijos de operación y mantenimiento (CFOM)
- Costos variables de operación y mantenimiento (CVOM)
- Costos de combustibles (Cc)

Los costos totales de instalación abarcan una amplia gama de gastos involucrados en el desarrollo de un proyecto energético, abarcando aspectos como la creación de la infraestructura, la conexión a la red eléctrica, la adquisición de equipos, la ingeniería necesaria y los imprevistos, entre otros. Por su parte, los costos fijos son aquellos necesarios para mantener la planta en funcionamiento una vez que esté en operación. Los costos variables están directamente vinculados con la producción de energía de la planta y se calculan mediante la relación entre la generación anual de energía en comparación con la producción máxima continua teórica de la planta. Asimismo, los costos de combustible son relevantes para aquellas instalaciones que

requieren carbón o gas para generar la energía. Sin embargo, es importante señalar que la mayoría de los proyectos de energía renovable no presentan costos de combustible, a excepción quizás de aquellos basados en biomasa [15]. Debido a la variabilidad en los costos asociados, resulta difícil comparar las distintas tecnologías de generación de energía en términos absolutos. Por esta razón, el LCOE (Costo Nivelado de Energía, por sus siglas en inglés, Levelized Cost of Energy) se presenta como una métrica útil para comparar el costo de las plantas generadoras de energía.

9.1 Levelized Cost of Energy (Costo de apalancamiento de energía)

El costo nivelado de la energía (LCOE, por sus siglas en inglés) de un proyecto es la relación entre los costos totales y la generación total de electricidad a lo largo de su vida útil, medidos en (\$/MWh), como se muestra a continuación:

$$LCOE = \frac{\text{Costo total del proyecto}}{\text{Energía total generada}} \left[\frac{\$}{\text{MWh}} \right] \quad (1)$$

EL LCOE calcula el valor presente del costo total de construcción y permite la comparación de diferentes tecnologías (por ejemplo, eólica, solar, gas natural) con vidas útiles desiguales, tamaños de proyecto diferentes, costos de capital distintos, riesgo, rendimiento y capacidades en la operación de una planta de energía durante una vida útil asumida [15]. La fórmula para calcular el LCOE está dada por:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+i)^t}} \quad (2)$$

Siendo,

$LCOE$ = Levelised cost of electricity generation.

I_t = Costos de inversión en el año t

M_t = Costos de operación y mantenimiento en el año t

F_t = Costos de combustible en el año t

E_t = Generación de energía en el año t

i = Tasa de descuento

t = Tiempo de vida del proyecto

Es importante resaltar que, si bien el LCOE resulta una métrica útil para la comparación de proyectos, presenta ciertas limitaciones al no tomar en consideración las dinámicas del mercado, ni el valor variable asociado a determinadas tecnologías. Además, no tiene en cuenta ingresos o costos adicionales, como servicios auxiliares de la red. Aunque útil como punto de partida, no reemplaza simulaciones de sistemas energéticos completos para determinar la mejor combinación de capacidad y minimizar costos [16].

Un factor importante para tener en cuenta al calcular el LCOE es el Factor de Recuperación de Capital (CRF, por sus siglas en inglés). El CRF representa la relación entre una anualidad constante y el valor presente de recibir esa anualidad durante un período n . Utilizando una tasa de interés i , el Factor de Recuperación de Capital se define de la siguiente manera:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3)$$

Donde ‘n’ es el número de anualidades recibidas. El CRF está relacionado con la fórmula de anualidades, que calcula los pagos periódicos necesarios para recuperar un capital inicial invertido (C_I) en un proyecto, considerando una tasa de interés y un período de tiempo específico. De esta manera, la fórmula de anualidades está dada por la expresión:

$$\text{Pago anual} = C_I \times CRF \quad (4)$$

Teniendo en cuenta la ecuación (4), la ecuación (2) puede ser escrita como:

$$LCOE = \frac{C_I \times CFR + C_{FOM}}{E_t \times 8760 \times F_c} + C_{VOM} + C_{Fuel} \times HR \quad (5)$$

Dónde:

E_t , generación de energía en el año [MWh]

C_I/E_t , costos totales de instalación [\$/MWh]

C_{FOM}/E_t , costos fijos anuales de operación y mantenimiento [\$/año]

C_{VOM} , costos variables de operación y mantenimiento [\$/MWh]

C_{Fuel} , costo del combustible [\$/MMBTU]

HR, Heat rate [BTU/kWh]

F_c , factor de capacidad de la planta

El HR (*heat rate*, por sus siglas en inglés) es una medida de la eficiencia de las plantas generadoras de energía que convierten un combustible en calor y este en electricidad, expresado en (BTU/kWh). En otras palabras, el HR es la cantidad de energía utilizada por una central eléctrica para generar un kilovatio-hora (kWh) de electricidad [17]. Por otra parte, el factor de capacidad de una planta de energía (F_c) es una medida de su producción real en relación con su producción máxima posible durante un cierto período de tiempo, generalmente un año. Se expresa como un porcentaje y se utiliza para evaluar qué tan eficientemente opera una planta de energía.

El factor de capacidad (F_c) es una suposición para calcular el LCOE y tiene un impacto significativo en el cálculo del LCOE, ya que determina la cantidad real de energía producida por una potencia específica instalada. El F_c se calcula mediante la relación entre la potencia eléctrica promedio real que una planta entrega durante un período de tiempo y la potencia nominal que es capaz de proporcionar en condiciones óptimas [18], tal como se muestra a continuación:

$$\text{Factor de capacidad} (F_c) = \frac{\text{Energía producida}}{\text{Máxima energía producida posible}} \quad (6)$$

La Figura 9.1. muestra las medias y medias ponderadas de los factores de capacidad para todo el mundo.

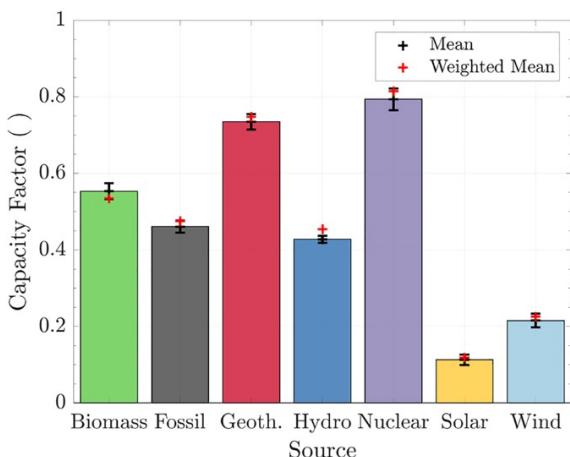


Figura 9.1. Factores de capacidad medios y ponderados del mundo (2000 – 2017).

Tomado de [18]

Los factores de capacidad permiten a los expertos en energía examinar el rendimiento genera y la confiabilidad de diferentes tecnologías para la generación de energía. En otras palabras, mide con qué frecuencia una planta está funcionando a su máxima capacidad. Una planta con un factor de capacidad del 100 % significa que está produciendo energía todo el tiempo [19].

Ejemplo:

Se desea construir una planta generadora de energía con una producción anual promedio de 5,000 MWh, utilizando gas natural como combustible. El objetivo es evaluar el LCOE, expresado en (\$/kWh), a lo largo de los 25 años de vida útil. Las suposiciones son las siguientes:

La inversión inicial del proyecto es de \$1,200,000 para una planta de 1,000 kW y la tasa de interés es del 8 %. Los costos fijos y variables de operación y mantenimiento son de \$120,000/año y \$0.1/kWh, respectivamente. El costo del combustible es de \$2/MMBTU y tiene una HR de 7,500 BTU/kWh. Finalmente, el factor de capacidad de la planta es del 55 %.

Primero, calculamos el CRF mediante la ecuación (3):

$$CRF = 0.08(1 + 0.08)^{25} / [(1 + 0.08)^{25} - 1]$$

$$CRF = 0.0936$$

Ahora, calculamos los costos fijos:

$$\text{Costos fijos} = \frac{\$1,200,000 \times 0.0936/\text{año} + \$120,000/\text{año}}{1,000 \text{ kW} \times 0.55 \times 8760 \text{ h/año}}$$

$$\text{Costos fijos} = \$0.048/\text{kWh}$$

Ahora, calculamos los costos variables:

Costos variables

$$= \$0.1/\text{kWh} + \$2/\text{MMBTU} \times 7,500 \text{ BTU}/\text{kWh} \times (1 \text{ MMBTU}/1 \times 10^6 \text{ BTU})$$

$$\text{Costos variables} = \$0.115/\text{kWh}$$

Por tanto, el LCOE está dado por:

$$\text{LCOE} = \text{Costos fijos} + \text{Costos variables}$$

$$\text{LCOE} = \$0.163/\text{kWh}$$

En la última década, se ha presenciado una notable disminución en el costo de las energías renovables en comparación con las fuentes de energía convencionales, como el petróleo, el gas y el carbón. Esto se debe a que los costos de los combustibles fósiles dependen de dos factores: precio del combustible y costos operativos de la planta. En cambio, las energías renovables son más económicas porque sus plantas tienen bajos costos operativos y no requieren combustible, ya que aprovechan recursos naturales como el viento y el sol. El costo principal de la energía renovable radica en la tecnología y la planta en sí misma [5]. La Figura 9.2 ilustra la evolución de los precios de la

electricidad según su fuente de generación, abarcando el período desde 2009 hasta 2021, expresados en dólares por megavatio-hora (\$/MWh).

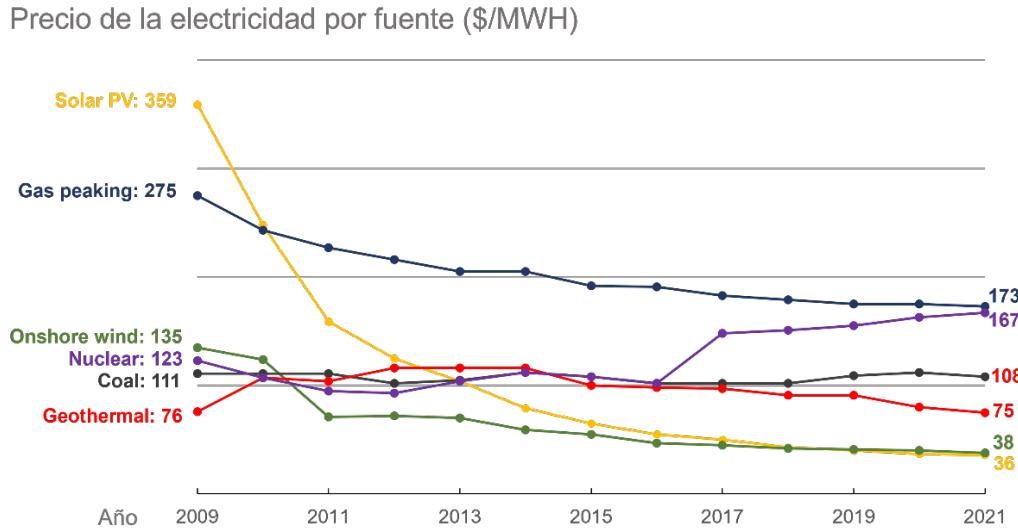


Figura 9.2. Precio de la electricidad por fuente 2009-2021 (\$/MWH).

Fuente de datos: Lazard Levelized Cost of Energy Analysis: Versión 16.0

La energía solar fotovoltaica ha experimentado una drástica reducción de costos a lo largo de los años. En 2009, el precio del megavatio-hora de electricidad era de \$359, pero para 2021, se redujo significativamente a tan solo \$36, 89 % de reducción. Este descenso de precios ha llevado a que la energía solar fotovoltaica se vuelva más asequible que otras fuentes de energía, incluyendo la energía nuclear, el gas, el carbón e incluso la energía eólica terrestre. La energía eólica ha visto reducciones en sus costos desde 2009, mientras que los métodos más establecidos como la energía nuclear y el carbón han aumentado de precio o solo han experimentado una ligera disminución (Tabla 9.1). Esta diferencia de precio es fundamental para fomentar la adopción rápida de fuentes de energía renovable, y ya se están viendo efectos con un aumento significativo en la capacidad de energía renovable instalada en 2019, representando el 72 por ciento de todas las adiciones de capacidad a nivel mundial [6].

Tabla 9.1. Variación de los precios de la electricidad por fuente desde el año 2009 hasta el 2021. Fuente de datos: Lazard Levelized Cost of Energy Analysis: Version 16.0

| Año | Precio de la electricidad (\$/MWh) | | | | | |
|-------------|------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | Solar PV | Eólica | Gas | Carbón | Geotérmica | Nuclear |
| 2009 | 359 | 135 | 275 | 111 | 76 | 123 |
| 2010 | 248 | 124 | 243 | 111 | 107 | 107 |
| 2011 | 159 | 71 | 227 | 111 | 104 | 95 |
| 2012 | 125 | 72 | 216 | 102 | 116 | 93 |
| 2013 | 104 | 70 | 205 | 105 | 116 | 104 |
| 2014 | 79 | 59 | 205 | 112 | 116 | 112 |
| 2015 | 65 | 55 | 192 | 108 | 100 | 108 |
| 2016 | 55 | 47 | 191 | 102 | 98 | 102 |
| 2017 | 50 | 45 | 183 | 102 | 97 | 148 |
| 2018 | 43 | 42 | 179 | 102 | 91 | 151 |
| 2019 | 40 | 41 | 175 | 109 | 91 | 155 |
| 2020 | 37 | 40 | 175 | 112 | 80 | 163 |
| 2021 | 36 | 38 | 173 | 108 | 75 | 167 |
| Variación | ↓ 89% | ↓ 71% | ↓ 37% | 2,7% | 1,3% | ↑ 35% |

De este modo, la implementación de las energías renovables es crucial en la actualidad debido a la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles, cumplir con los objetivos climáticos, y aprovechar la reducción de los precios de la electricidad. La dependencia histórica de los combustibles fósiles ha tenido efectos perjudiciales en el medio ambiente, con consecuencias como el cambio climático y la mala calidad del aire. Para abordar estos desafíos, es esencial la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles, como la solar y la eólica, que no emiten gases de efecto invernadero y son cada vez más asequibles en virtud de los avances tecnológicos.

10. Sustentabilidad y certificación

10.1 Beneficios de las certificaciones

¿De qué me sirve certificar, certificarnos o certificarme? ¿qué beneficio hay? ¿para qué?

Las anteriores son preguntas frecuentes que tienen las siguientes respuestas:

Ya sea de productos o servicios las certificaciones nos permiten demostrar para nuestro público objetivo, gobierno o a nosotros mismos la profesionalización de nuestras actividades.

Entonces, el beneficio de las certificaciones es profesionalizarnos como personas, empresas y país, pero ¿de qué nos sirve esto?:

1. La profesionalización implica establecer procesos y procedimientos más eficientes, lo que puede aumentar la productividad y reducir los costos operativos, es decir, nos hace más eficientes en nuestra operación
2. Con profesionales capacitados en posiciones clave, el gobierno o la empresa estará mejor equipada para tomar decisiones informadas y estratégicas.
3. Las instituciones de gobierno o una empresa profesionalizada es más atractiva para profesionales calificados, lo que facilita la contratación de personal talentoso y la retención de empleados clave.
4. Las buenas prácticas de los gobiernos y las empresas con una estructura organizativa sólida y una gestión profesional son más propensas a

atraer inversionistas y acceder a financiamiento a través de préstamos y capital de riesgo.

5. La profesionalización puede ayudar a escalar de manera más efectiva, gestionando los desafíos asociados con el crecimiento y asegurando que se mantenga un enfoque estratégico.
6. Una gestión profesional suele estar más al tanto de las regulaciones y puede ayudar a la empresa a evitar problemas legales y financieros costosos; lo que mitiga y reduce riesgos.
7. Nos brinda resiliencia, una empresa profesionalizada es más ágil y capaz de adaptarse a los cambios en el mercado y las circunstancias externas.
8. Profesionalizarnos mejora la reputación de la empresa o gobierno, tanto entre los clientes como entre los socios comerciales, lo que puede llevar a mayores oportunidades de negocio.
9. Una empresa profesionalizada tiende a tener un mayor valor en el mercado.

10.2 Estándares de edificación sustentable

A lo largo del planeta, existen diferentes estándares de calidad para validar/certificar tipo de edificaciones como sustentables, dependiendo de tipo de espacio a evaluar Tabla 10.1.

Tabla 10.1 Estandares de calidad en diferentes países

| Estándar de cumplimiento (certificación) | País de origen |
|---|----------------------------------|
| NMX-AA-164-SCFI-2013 Edificación Sustentable-Criterios y Requerimientos Ambientales Mínimos | México |
| LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) | Estados Unidos |
| BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) | Reino Unido |
| Green Star | Australia |
| CASBEE (Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency) | Japón |
| DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen) | Alemania |
| EDGE (Excellence in Design for Greater Efficiencies) | Internacional, creada por el IFC |

10.3 Criterios y requerimientos ambientales mínimos

La Norma Mexicana NMX-AA-164-SCFI-2013, titulada “Edificación Sustentable - Criterios y Requerimientos Ambientales Mínimos,” es un pilar fundamental en el campo de la construcción sustentable en México.

Fue emitida en el 2013 por la Secretaría de Economía de México, y establece criterios y requisitos ambientales mínimos que los **proyectos de edificación de obra nueva o en operación deben cumplir**. Su objetivo es reducir el impacto ambiental de la construcción y promover prácticas que respeten y preserven el entorno.

Esta norma se basa en principios centrales de sostenibilidad y busca contribuir al desarrollo sustentable del país. A continuación se presentan algunos puntos clave abordados por el estándar:

a) Eficiencia energética

La norma enfatiza la importancia de la eficiencia energética en los edificios. Esto implica la adopción de tecnologías y diseños que minimicen el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero. Algunos ejemplos incluyen el uso de materiales aislantes, sistemas de iluminación eficiente y sistemas de climatización de bajo consumo.

b) Uso responsable del agua

Promueve la implementación de tecnologías y prácticas que reduzcan el consumo de agua en edificios. Esto puede incluir la instalación de dispositivos de bajo flujo en grifos y sanitarios, así como sistemas de recolección y reutilización de agua pluvial.

c) Gestión de residuos

La norma establece directrices para una gestión adecuada de los residuos de construcción y demolición. Esto fomenta la separación y el reciclaje de materiales, reduciendo la cantidad de desechos enviados a vertederos.

d) Calidad del ambiente interior

Se enfoca en la calidad del aire interior y el confort de los ocupantes. Esto incluye la especificación de materiales de construcción con bajos niveles de compuestos orgánicos volátiles (COV) y sistemas de ventilación adecuados.

e) Espacios verdes y biodiversidad

La norma alienta la incorporación de áreas verdes y la preservación de la biodiversidad en los alrededores de los edificios. Esto contribuye a mejorar el paisaje urbano y promover la salud ambiental.

f) Accesibilidad, responsabilidad social y movilidad sostenible

Promueve la accesibilidad para personas con discapacidades y el uso de medios de transporte sostenibles, como el transporte público y la infraestructura para bicicletas.

La Norma Mexicana NMX-AA-164-SCFI-2013 es fundamental para impulsar la construcción sustentable en México. Establece estándares mínimos que los proyectos deben seguir para reducir su huella ambiental y contribuir al bienestar de la sociedad y el medio ambiente. Cumplir con esta norma no sólo beneficia al entorno natural, sino que también puede conducir a una mayor eficiencia y ahorro de costos a largo plazo. Promover y adherirse a esta norma es un paso esencial hacia un futuro más sostenible y respetuoso con el medio ambiente en México.

Bibliografía Consultada

- S. Erdogan, U. K. Pata, and S. A. Solarin, "Towards carbon-neutral world: The effect of renewable energy investments and technologies in G7 countries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 186, p. 113683, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.RSER.2023.113683.
- H. Ritchie, M. Roser, and P. Rosado, "CO₂ and Greenhouse Gas Emissions," 2020, Accessed: Aug. 29, 2023. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>
- "In partnership with Statistical Review of World Energy 2023 | 72 nd edition," 2023. Accessed: Aug. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- R. Islam, Saifur Rahman, and Naruttam Kumar Roy, "Renewable Energy and the Environment," 2018, doi: 10.1007/978-981-10-7287-1.
- Alan Buis, "Milankovitch Cycles and Their Role in Earth's Climate." [Online]. Available: <https://climate.nasa.gov/news/2948/milankovitch-orbital-cycles-and-their-role-in-earths-climate/>
- Alan Buis, "Why Milankovitch (Orbital) Cycles Can't Explain Earth's Current Warming." [Online]. Available: <https://climate.nasa.gov/explore/ask-nasa-climate/2949/why-milankovitch-orbital-cycles-cant-explain-earths-current-warming/>
- R. K. Pachauri, A. Reisinger, L. Bernstein, Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, and Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate change 2007 : synthesis report*. 2007.
- Chávez, R. (2020). Equipos que conforma un Sistema Interconectado a la Red. <https://ccee.mx/blog/energia-solar-fotovoltaica/equipos-que-conforman-un-sistema-interconectado-a-la-red>. Revisado el 1 de febrero de 2023. (Imagen)
- Corpovalle (2020). Solicitud pública de oferta Nro. 001 de 2020. <https://www.corpovalle.co/wp-content/uploads/2020/05/INVITACION-PUBLICA-VERSIÓN%CC%81N-FINAL.pdf>. Revisado el 1 de febrero de 2023. (Imagen)

- Diario Oficial de la Federación (2012). NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones eléctricas (utilización).
- Enphase (2016). Microinversores Enphase M250 y M215: Manual de instalación y funcionamiento.
- Enphase (s.f.). IQ 7+. <https://enphase.com/es-mx/installers/microinverters/iq7-plus>.
- Fernández Salgado, J. (2010). Compendio de energía solar: Fotovoltaica, Térmica y Termoeléctrica (Adaptado al Código Técnico de la Edificación y al nuevo RITE).
- Foster, R., Ghassemi, M, y Cota, A. (2010). Solar Energy: Renewable Energy and the Environment. CRC Press.
- Fronius (s.f.). Fronius Symo 3.0-3-M. <https://www.fronius.com/es-es/spain/energia-solar/installadores-y-socios/datos-tecnicos/todos-los-productos/inversor/fronius-symo/fronius-symo-3-0-3-m>. Revisado el 1 de febrero de 2023. (Imagen)
- INELDEC (s.f.). Cuál es la diferencia entre paneles solares monocristalinos y policristalinos PERC media celda. <https://ineldec.com/diferencias-entre-paneles-solares-policristalinos-monocristalinos-perc/>. Revisado el 1 de febrero de 2023. (Imagen)
- International hydropower association. Recuperado el 15 de julio de 2023 de: https://hydropower-assets.s3.eu-west-2.amazonaws.com/publications-docs/2019_hydropower_status_report_0.pdf
- Jinko Solar (s.f.). Tiger Mono.facial 450-470 Watt. [https://www.jinkosolar.com/uploads/TR%20JKM450-470N-7RL3-\(V\)-A1-EN.pdf](https://www.jinkosolar.com/uploads/TR%20JKM450-470N-7RL3-(V)-A1-EN.pdf).
- Mayo, P. (2019). El coche solar no existe. <https://espirituracer.com/reportajes/el-coche-solar-no-existe/>. Revisado el 1 de febrero de 2023. (Imagen)
- Solhé (s.f.). Sistema fotovoltaico para casa. <https://solhe.com.ar/portfolio/sistema-fotovoltaico-para-casa/>. Revisado el 1 de febrero de 2023. (Imagen)
- Soliclima (2019). ¿Cuáles son los problemas comunes en la reparación de paneles solares?. <https://news.soliclima.com/noticias/energia-solar/cuales-son-los-problemas-comunes-en-la-reparacion-de-paneles-solares>. Revisado el 1 de febrero de 2023. (Imagen)
- Stocker, Liam. (2016). UPM Shotton to meet energy demand with UK's largest private wire solar park. <https://www.current-news.co.uk/news/upm-shotton-to-meet-energy-demand-with-uks-largest-private-wire-solar-park>. Revisado el 1 de febrero de 2023. (Imagen)
- Suneast Technology (s.f.). Taishou Suneast New Energy Technology Co., Ltd. https://pt.made-in-china.com/co_suneast-pv/. Revisado el 1 de febrero de 2023. (Imagen)
- Timestech (2020). SunAlpha and Flair Group team up to solarize their manufacturing plant. <https://timestech.in/sunalpha-and-flair-group-team-up-to-solarise-their-manufacturing-plant/>. Revisado el 1 de febrero de 2023. (Imagen)

- De Azua, C. R. (2000). The future of wind energy. *Tul. Envtl. LJ*, 14, 485.
- Crawley, G. M. (Ed.). (2021). Wind, Water and Fire: The Other Renewable Energy Resources (Vol. 7). World Scientific.
- Nelson, V., & Starcher, K. (2018). Wind energy: renewable energy and the environment. CRC press.
- Muschal, F. (2007). Energy from Wind, Sun, and Tides. Cherry Lake.
- Sathyajith, M., & Philip, G. S. (Eds.). (2011). Advances in wind energy conversion technology. Springer Science & Business Media.
- National Research Council. (2007). Environmental impacts of wind-energy projects. National Academies Press.
- Jain, P. (2016). Wind energy engineering. McGraw-Hill Education.
- Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011). Wind energy handbook. John Wiley & Sons.
- Tabak, J. (2009). Wind and water (Vol. 6). Infobase Publishing.
- Wagner, H. J. (2020). Introduction to wind energy systems. In EPJ Web of Conferences (Vol. 246, p. 00004). EDP Sciences.

Altamirano, A. Y. F. (2020). México y su transición energética: un cambio en pro de la energía Renovable. LADEE, 1(1), 26-42

Peña Rodríguez M. F. (S. f.). Ventajas y desventajas del uso de la Energía Nuclear. UNAM. Recuperado el 18 de septiembre de 2023 de: <https://www.ier.unam.mx/~rbb/ERyS2013-1/nuclear/Maria-Fernanda-Pena-Rodriguez.pdf>

Procesamiento. (2018, abril 4). Iaea.org. Recuperado el 18 de septiembre de 2023 de: <https://www.iaea.org/es/temas/procesamiento>

Normas de Seguridad. (2019, marzo 13). Iaea.org. Recuperado el 18 de septiembre de 2023 de: <https://www.iaea.org/es/recursos/normas-de-seguridad>

Huenges, E., & Ledru, P. (2011). Geothermal energy systems: exploration, development, and utilization. John Wiley & Sons

Herzog, A. V., Lipman, T. E., & Kammen, D. M. (2001). Renewable energy sources. Encyclopedia of life support systems (EOLSS). Forerunner Volume-'Perspectives and overview of life support systems and sustainable development, 76.

Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2013). Geothermal energy: utilization and technology.

Stober, I., & Bucher, K. (2013). Geothermal energy. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi, 10, 978-3.

Manzella, A., Allansdottir, A., & Pellizzone, A. (Eds.). (2019). Geothermal energy and society. Springer International Publishing.

Dowling, C. B., Neumann, K., & Florea, L. (Eds.). (2016). Geothermal energy: an important resource (Vol. 519). Geological Society of America.

- Orr, T. B. (2007). Geothermal Energy. Cherry Lake.
- Rosen, M. A., & Koohi-Fayegh, S. (2017). Geothermal energy: sustainable heating and cooling using the ground. John Wiley & Sons.
- Glassley, W. E. (2014). Geothermal energy: renewable energy and the environment. CRC press.
- Gupta, H. K., & Roy, S. (2006). Geothermal energy: an alternative resource for the 21st century. Elsevier.
- Huenges, E., & Ledru, P. (Eds.). (2011). Geothermal energy systems: exploration, development, and utilization. John Wiley & Sons.
- Kubik, M. (2006). The future of geothermal energy. Massachusetts Inst. of Technology (MIT), Cambridge, MA (United States).

Peña Rodríguez M. F. (S. f.). Ventajas y desventajas del uso de la Energía Nuclear. UNAM. Recuperado el 18 de septiembre de 2023 de: <https://www.ier.unam.mx/~rbb/ERyS2013-1/nuclear/Maria-Fernanda-Pena-Rodriguez.pdf>

Procesamiento. (2018, abril 4). Iaea.org. Recuperado el 18 de septiembre de 2023 de: <https://www.iaea.org/es/temas/procesamiento>

Normas de Seguridad. (2019, marzo 13). Iaea.org. Recuperado el 18 de septiembre de 2023 de: <https://www.iaea.org/es/recursos/normas-de-seguridad>

BVISolar (s.f.). Battery Storage. <https://www.bvisolar.com/solar-battery-storage-systems>. Revisado el 1 de febrero de 2023. (Imagen)

Central Hidráulica de Bombeo (s.f.). Funcionamiento. <https://sites.google.com/site/centralhidraulicadebombeo/autores/paso2>. Revisado el 1 de febrero de 2023. (Imagen)

Ersdal, A. M., Imsland, L., Uhlen, K., Fabozzi, D., & Thornhill, N. F. (2016). Model predictive load-frequency control taking into account imbalance uncertainty. Control Engineering Practice, 53, 139-150. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2015.12.001>. Revisado el 1 de febrero de 2023. (Imagen)

Good New Energy (2021). ¿Para qué utilizaremos el hidrógeno verde, la ya conocida como “energía del futuro”? <https://goodnewenergy.enagas.es/innovadores/para-que-utilizaremos-el-hidrogeno-verde-la-ya-conocida-como-energia-del-futuro/>. Revisado el 1 de febrero de 2023. (Imagen)

Hodge, B. (2017). Alternative Energy Systems and Applications. Wiley.

Lambert, F. (2017). Tesla announces new electric grid services by bundling Powerwalls and Powerpacks. Electrek. <https://electrek.co/2017/05/12/tesla-new-electric-grid-services-bundling-powerwall-powerpack/>. Revisado el 1 de febrero de 2023. (Imagen)

Morón, E. (2022). Pilas de combustible de hidrógeno, limitaciones y una posible solución. <https://hive.blog/hive-196387/@emiliomoron/pilas-de-combustible-de-hidrogeno-limitaciones-y-una-posible-solucion>. Revisado el 1 de febrero de 2023. (Imagen)

- Nelson, V. (2011). Introduction to Renewable Energy. CRC Press.
- Olson, E. (2018). Massive, Gravity-Based Battery Tower Could Solve Renewable Energy's Storage Problem. <https://insights.globalspec.com/article/10784/massive-gravity-based-battery-towers-could-solve-renewable-energy-s-storage-problem>. Revisado el 1 de febrero de 2023. (Imagen)
- Rufer, A. (2018). Energy Storage: Systems and Components. CRC Press.
- Sayigh, A. (2012). Comprehensive Renewable Energy, Volume 4: Fuel Cells and Hydrogen Techonology. Elsevier.
- Wikimedia (2018). Transformation in joining up sectors. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Transformation_in_joining_up_sectors.jpg. Revisado el 1 de febrero de 2023. (Imagen)

1

2

3

4

5

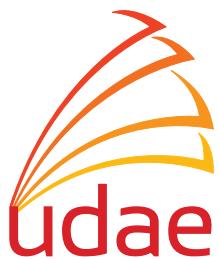
6

7

8

9

10



Apuntes de energías renovables ——————
se publicó digitalmente en el repositorio
de la Facultad de Ingeniería en noviembre de 2025.
Primera edición electrónica de un ejemplar
(13 MB) en formato PDF.

El cuidado de la edición y diseño estuvieron a cargo
de la Unidad de Apoyo Editorial de la Facultad
de Ingeniería. Las familias tipográficas utilizadas
fueron Source Serif Pro, Sienna Math Pro y Rubik
con sus respectivas variantes.