

CONTENIDO

Página

1. ENERGÍA, MEDIO AMBIENTE Y RELACIONES DE LOS ECOSISTEMAS.....	1
1.1. La Ecología.....	2
1.2. Conceptos de ecología.....	3
1.3. Componentes de un ecosistema.....	5
1.4. Los ciclos biogeoquímicos.....	10
1.4.1. El ciclo del agua.....	11
1.4.2. El ciclo del carbono.....	11
1.4.3. El ciclo del nitrógeno.....	13
1.4.4. El ciclo del fósforo.....	14
1.4.5. El ciclo de azufre.....	16
1.5. Contaminantes en los ecosistemas.....	17
2. HUELLA ECOLÓGICA DE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS.....	22
2.1. Huella ecológica.....	23
2.1.1. Necesidad de huella ecológica.....	23
2.1.2. Huella ecológica y términos relacionados.....	25
2.1.3. Uso de valores EF.....	29
2.1.4. Componentes de la huella ecológica.....	31
2.2. Huella de carbono.....	32
2.3. Huella ecológica de los sistemas de producción energéticos.....	35
2.3.1. Comparativa de los sistemas de energía.....	37
2.4. Energía nuclear.....	41
3. SISTEMAS CONVENCIONALES DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA E IMPACTOS AMBIENTALES:	
LAS CENTRALES TÉRMICAS.....	48
3.1. ¿Cómo funciona una central térmica?.....	49
3.2. Impactos ambientales de las centrales térmicas.....	50
3.3. Cambio climático global.....	56
3.3.1. Causas del cambio climático.....	57

3.3.2. Consecuencias medioambientales.....	62
3.3.3. Consecuencias socioeconómicas	63
3.4. Agotamiento de la capa de ozono.....	63
3.5. Lluvia ácida.....	67
3.5.1. Efectos medioambientales.....	68
3.5.2. Efectos en edificios y monumentos	71
4. CONSIDERACIONES ECOLÓGICAS Y AMBIENTALES DE LAS CENTRALES NUCLEARES	73
4.1. Introducción.....	74
4.2. Riesgos de las centrales nucleares.....	79
4.2.1. Minería del uranio.....	79
4.2.2. Enriquecimiento del uranio	80
4.2.3. Operaciones en un reactor	80
4.2.4. Eliminación de los desechos.....	82
4.2.5. Desmantelamiento	85
4.2.6. Coste	86
4.2.7. Las plantas nucleares como un objetivo en las guerras y el terrorismo.....	87
4.3. Evaluación de las centrales nucleares desde la vertiente ecológica.....	88
5. LOS SISTEMAS DE ENERGÍA SOLAR Y SUS EFECTOS AMBIENTALES.....	96
5.1. Aspectos tecnológicos en los sistemas de generación de energía solar.....	97
5.1.1. Energía solar térmica	98
5.1.1.1. Componentes de una instalación solar térmica.....	98
5.1.2. Energía solar de concentración (CSP).....	102
5.1.2.1. Componentes de un CSP solar	103
5.1.3. Solar PV	106

5.1.3.1. Componentes de un sistema PV	108
5.2. Impactos ambientales de los sistemas de energía solar	109
5.2.1. Impactos ambientales de la energía solar	111
5.2.2. Impactos ambientales de la energía solar concentrada	112
5.2.2.1. Sistemas fotovoltaicos.....	115
6. ENERGÍA EÓLICA.....	121
6.1. Energía eólica.....	123
6.2. Elementos de una la turbina eólica.....	122
6.2.1 Rotor	123
6.2.2 Góndola.....	126
6.2.3 Torre del aerogenerador	126
6.3. Impactos ambientales del uso de energía eólica.....	127
6.3.1. Impactos en la vida silvestre.....	128
6.3.2. Impactos visuales.....	129
6.3.3. Impacto auditivo	130
7. ENERGÍA MAREOMOTRIZ E HIDRÓGENO	133
7.1. Potencial de las olas y mareas para la producción de electricidad	134
7.2. Impacto ambiental de las olas y de la energía mareomotriz	144
7.3. Energía del hidrógeno.....	147
7.3.1. Tecnologías de producción de hidrógeno.....	150
7.3.2. Impacto ambiental.....	154
8. ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	159
8.1. Producción de energía geotérmica.....	162
8.2. Impacto ambiental del uso de geotermia Energía	173
9. ENERGÍA HIDROELÉCTRICA	178
9.1. Sistemas de energía hidroeléctrica	179
9.2. Impactos medioambientales.....	196

10. SISTEMAS DE ENERGÍA A BIOMASA.....	201
10.1. Energía de la biomasa.....	202
10.2. Consumo de energía de biomasa.....	203
10.2.1. Consumo global.....	203
10.2.2. Consumo en la Unión Europea.....	205
10.3. Fuentes de biomasa para la generación de energía	206
10.3.1. Cultivos alimentarios.....	206
10.3.2. Plantas ricas en hidrocarburos.....	207
10.3.3. Residuos.....	207
10.3.4. Malezas y plantas silvestres.....	207
10.3.5. Pastos y especies leñosas.....	208
10.4. Convertir la biomasa en otras energías.....	209
10.5. Técnicas para la producción de biomasa.....	210
10.5.1. Conversión termoquímica.....	210
10.5.2. Centrales eléctricas a biomasa.....	211
10.5.3. Cogeneración o generación combinada de electricidad (CHP).....	212
10.5.4. Uso de gasificadores a biomasa.....	214
10.6. Procesos bioquímicos.....	215
10.6.1. Fermentación del etanol.....	215
10.6.2. Producción de etanol a partir de cultivo lignocelulósico.....	215
10.6.3. Digestión anaerobia.....	216
10.6.4. Esterificación del biodiesel.....	216
10.6.5. Tecnologías emergentes.....	216
10.7. Impactos ambientales de la biomasa.....	217
10.7.1. Producción de biomasa.....	217
10.7.2. Recursos de la tierra y del agua.....	218
10.7.3. Erosión del suelo y desecación.....	219
10.7.4. Pérdida de nutrientes.....	219
10.7.5. Pérdida del hábitat y la vida natural.....	219

	Página
10.8. Conversión de biomasa a energía utilizable.....	220
10.8.1. Impactos medioambientales de los procesos térmicos.....	220
10.8.2. Quemar madera.....	221
10.8.3. Uso de biomasa para calor y energía.....	221
10.8.4. Quema de los residuos sólidos urbanos...	222
10.8.5. Eliminación de cenizas y desechos de las plantas	223
10.8.6. Captación del biogás	223
10.8.7. Impacto de la fermentación del etanol y el biodiesel.....	224

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 2.1. Comparativa entre el ciclo de vida del dióxido De carbono y los costes de las emisiones.....	38
Tabla 3.1. Tipos de impactos resultantes de las diferentes descargas	52
Tabla 3.2. Línea del tiempo del cambio climático.....	60
Tabla 4.1. Evaluación de las centrales nucleares desde el punto de vista ecológico.....	88
Tabla 5.1. Impactos ambientales de la energía termosolar de pequeña escala para generar calor.....	112
Tabla 5.2. Impactos ambientales de la energía solar concentrada	113
Tabla 5.1. Impacto ambiental del ciclo de vida de PV.....	115
Tabla 5.2. Impacto ambiental de la energía solar concentrada	113
Tabla 5.3. Efectos ambientales de la energía fotovoltaica en su ciclo de vida	115
Tabla 5.4. Huella hídrica (WF) por unidad de electricidad de diferentes fuentes de energía.....	117
Tabla 6.1. Material utilizado en una turbina eólica.....	125
Tabla 6.2. Impactos ambientales de una planta eólica	128
Tabla 8.1. Resumen de la utilización de la geotermia en el mundo durante el año 2015	169
Tabla 10.1. Ejemplos de usos de biomasa para energía	210

LISTA DE REPRESENTACIONES

Figura	Página
Figura 1.1. Ejemplo de cadena alimentaria	7
Figura 1.2. Ejemplo de cadena trófica.....	8
Figura 1.3. Pirámides ecológicas	9
Figura 1.4. El ciclo del agua.....	12
Figura 1.5. El ciclo del carbono.....	13
Figura 1.6. El ciclo del nitrógeno.....	14
Figura 1.7. El ciclo del fósforo	15
Figura 1.8. El ciclo del azufre.....	16
Figura 1.9. Biomagnificación	19
Figura 1.10. Transporte de contaminantes en aguas subterráneas	20
Figura 2.1. Ecosistemas.....	24
Figura 2.2. Huella ecológica mundial y biocapacidad	28
Figura 2.3. Desglose de la huella ecológica	29
Figura 2.4. Componentes de la huella ecológica	32
Figura 2.5. Unidades de la huella ecológica.....	33
Figura 2.6. Comparación de la huella ecológica en diversos sistemas de energía	40
Figura 3.1. Diseño de una central térmica.....	50
Figura 3.2. Concepto de cadena de combustible.....	52
Figura 3.3. Efecto invernadero	59
Figura 3.4. Nivel de Ozono	65

Figura	Página
Figura 3.5. Mecanismo del agotamiento del ozono	66
Figura 3.6. Efecto de la lluvia ácida en Great Smoky Mountains'Forest.....	70
Figura 4.1. Reacción de fisión y reacción en cadena	75
Figura 4.2. Cantidad mundial de energía nuclear	76
Figura 4.3. Depósitos verticales con estructuras de hormigón y acero.....	83
Figura 4.4. Depósitos horizontales.....	83
Figura 5.1. Componentes del sistema solar térmico, sistema de circulación forzada	102
Figura 5.2. Esquema de un colector cilindro-parabólico....	103
Figura 5.3. Funcionamiento de una torre solar	104
Figura 5.4. Funcionamiento de un colector lineal Fresnel .	105
Figura 5.5. Funcionamiento de un colector de platos de energía solar	106
Figura 5.6. Descripción general de un sistema PV sin conexión a la red	107
Figura 5.7. Ciclo de vida de las tecnologías de las energías renovables	109
Figura 5.8. Impactos ambientales de la energía fotovoltaica, energía solar concentrada y eólica.....	119
Figura 6.1. Esquema de un aerogenerador y sus componentes.....	124
Figura 7.1. Planta de energía mareomotriz.....	137
Figura 7.2. Columna de agua oscilante	140

Figura	Página
Figura 7.3. Dispositivos para captura de olas	142
Figura 7.4. Conversión de la energía térmica oceánica.....	143
Figura 7.5. Valla de marea	145
Figura 7.6. Materias primas y procesos tecnológicos en la producción de hidrógeno.....	150
Figura 7.7. Funcionamiento de una célula fotoeléctrica.....	153
Figura 7.8. Producción fotobiológica de hidrógeno.....	154
Figura 8.1. Planta de energía de vapor seco	166
Figura 8.2. Planta de energía de relámpago de vapor	166
Figura 8.3. Central geotérmica de ciclo binario.....	167
Figura 8.4. Central geotérmica de ciclo binario.....	167
Figura 8.5. Comparación de la energía geotérmica de uso directo en todo el mundo.....	170
Figura 8.6. Atlas termal europeo	172
Figura 9.1. Hidroeléctrica tipo embalse	181
Figura 9.2. Diagrama de hidroenergía de un río	182
Figura 9.3. Sistema hidroeléctrico de bombeo	185
Figura 9.4. Componentes de un sistema hidroeléctrico.....	189
Figura 9.5. Turbina Pelton.....	191
Figura 9.6. Turbina Turgo	191
Figura 9.7. Turbina Francis	193
Figura 9.8. Turbina Kaplan	194
Figura 9.9. Turbina de flijo cruzado.....	194

Figura	Página
Figura 9.10. Tipología de pequeñas plantas hidroeléctricas según cabezal, capacidad y descarga	196
Figura 10.1. El proceso de fotosíntesis	202
Figura 10.2. Consumo global de energía en 2013.....	204
Figura 10.3. Producción de energía a partir de biomasa sólida y cifras de crecimiento del consumo en la UE desde 2.000.....	206
Figura 10.4. Fuentes de biomasa para generar energía	209
Figura 10.5. Fuentes de biomasa para generar energía	212
Figura 10.6. Cogeneración comparada con la producción de energía por separado	213
Figura 10.7. Plantas de ciclo combinado (CHP) con motores de gas.....	214

Traducción: Sonia M^a GARCÍA CARRASCO

AELV (Amigos de Europa Leonardo da Vinci)

e-mail: sonia.garcia@aelv.org

CAPÍTULO 1

ENERGÍA, MEDIOAMBIENTE Y RELACIONES DE LOS ECOSISTEMAS

Autores: Başak TAŞELİ¹ and Evren ALTIOK²

¹Giresun University, Faculty of Engineering, Environmental Engineering Department, Giresun-Turkey

e-mail: basak.taseli@giresun.edu.tr

²Giresun University, Faculty of Engineering, Genetics and Bioengineering Department, Giresun-Turkey

e-mail: evren.altiok@giresun.edu.tr

Resumen: En cierto modo, la ecología es tan vieja como la existencia de humanidad y a la vez una de las ramas más recientes de la ciencia. En esta parte del libro se tratan los conceptos básicos de la ecología y los componentes de un ecosistema, para comprender la interacción de sus diversas partes. Se habla también de las redes ecológicas, la energía y la nutrición. Se verá el concepto de cadena alimentaria, el flujo de energía dentro de un ecosistema y los diversos ciclos de los elementos minerales dentro de la biosfera, además del efecto de la actuación humana en este ciclo. Al final del capítulo se analiza el transporte y depósito de los contaminantes en el ecosistema.

Objetivos de aprendizaje:

Al final de este capítulo el estudiante será capaz de,

- Describir el término ecología
- Definir los componentes de un ecosistema
- Conocer los efectos de la ecología
- Diferenciar las estructuras bióticas y abióticas
- Conocer el funcionamiento de los sistemas ecológicos: flujos de energía y de nutrientes
- Conocer los efectos de la energía solar sistema en el control de los flujos alimentarios
- Explicar los conceptos de cadena alimentaria y flujo de energía en el ecosistema
- Explicar el ciclo de la materia en la biosfera
- Distinguir entre los conceptos de cadena alimentaria y cadena trófica
- Explicar los efectos de la actuación humana sobre el ciclo de la biosfera

1.1 La Ecología

La ecología es la parte de la biología que trata del estudio de la vida, los organismos y las poblaciones. Es una ciencia multidisciplinar que utiliza los instrumentos de otras disciplinas para explicar algunos de los fenómenos naturales observados. La palabra 'Ecología' proviene del griego "oikos", que significa "casa" o "lugar para vivir", y designa el estudio de los organismos en sus hábitats originales. También hace referencia al estudio de las interacciones de los organismos entre ellos y sus relaciones con el entorno físico y químico que les rodea.

1.2 Conceptos de Ecología

Biomás: Una extensa región terrestre, relativamente distinta a otras, y que se caracteriza por tener un clima, un suelo, plantas y animales similares, independientemente del lugar donde se encuentre.

Tundra: Es la región más predominante en la Tierra. La mayor parte de la vegetación la forman el musgo, la hierba y los pequeños arbustos de hoja perenne.

Taiga: Es la formada por bosque caduco con una gran diversidad de mamíferos, pájaros, e insectos. También hay reptiles y anfibios, pero no como especies predominantes.

Prado: Crece en regiones donde la precipitación anual no es suficiente para sostener el crecimiento de árboles.

Desierto: Los terrenos que reciben menos de 250 mililitros de precipitaciones anuales, siendo la falta de humedad el factor esencial que forma este bioma.

Selva tropical: Se caracteriza por las altas temperaturas y las grandes precipitaciones anuales. Crecen una gran variedad de plantas y de especies animales.

Biomás acuáticos: Los estuarios son las zonas donde confluyen en agua salada del mar y el agua dulce de los ríos. Biológicamente hablando, son los ecosistemas más productivos del planeta, que además actúan como filtros de agentes contaminantes y protegen de inundaciones.

Hábitat: El hábitat de un organismo es el lugar donde vive, puede ser tan grande como el océano o un bosque o pequeño, como una charca.

Nicho ecológico: Cada organismo tiene su propia función dentro de la estructura de la comunidad en la que habita. En otras palabras, cuando hablamos de nicho ecológico, nos referimos a la «ocupación» o a la función que desempeña cierto individuo dentro de una comunidad.

Cadena alimentaria: La secuencia lineal de las especies que se alimentan de otras especies en un ecosistema.

Ciclos bioquímicos: El ciclo de los elementos (nitrógeno, oxígeno...) a través de los seres vivos y su retorno a la tierra.

Eutrofización: Acumulación de residuos orgánicos en el litoral marino, en un lago, laguna, embalse, etc., que causa la proliferación de ciertas algas.

Biomasa: Cantidad total de materia viva presente en una comunidad o ecosistema.

Comunidad: toda la población de una determinada especie que ocupa un hábitat.

Nivel trófico: Todos los organismos que componen un mismo ecosistema y se nutren de la misma fuente de energía (p.e. la luz del sol).

Ecosistema: Una comunidad y su entorno físico y químico. Tiene un componente biótico (vida) y uno abiótico (sin vida).

1.3 Componentes de un ecosistema

Los componentes sin vida de un ecosistema: Se conoce como factores abióticos a las condiciones ambientales, los minerales, y en general, la materia inerte con la cual los seres vivos interactúan: el viento, el terreno, la humedad, la porosidad del suelo, la temperatura, la composición del agua, los gases, los minerales...

Los componentes vivos de un ecosistema: son los organismos vivos que habitan en él.

Productores: Todas las plantas verdes se consideran productores ya que asimilan elementos químicos simples provenientes del suelo, el agua y el aire, y junto con la energía del sol, los transforma, por medio de la fotosíntesis, en productos químicos más complejos y energéticamente ricos que producen oxígeno.



El resto de los seres vivos son consumidores, ya que necesitan la energía química y otras sustancias nutritivas provenientes de otros seres vivos para subsistir.

Consumidores: Las vacas son herbívoras y se alimentan exclusivamente de plantas. Como consiguen su alimento directamente de productores se llaman consumidores primarios. Los seres vivos que se alimentan de otros que son comedores de plantas son los consumidores secundarios, también les llaman carnívoros. De este modo, un animal que se come a un consumidor secundario se denomina consumidor terciario y así sucesivamente.

Descomponedores: Son los consumidores que consiguen la energía y las sustancias nutritivas digiriendo otras plantas o animales muertos. Estos organismos son las bacterias y hongos responsables de la descomposición y pudrición de los productos de deshecho de otros animales, terminando así el ciclo mineral dentro del ecosistema.

Nitrificación: Proceso por el cual ciertas bacterias del suelo oxidan el amonio liberando nitrito (NO_2) como producto de deshecho, que luego otras bacterias utilizan para su metabolismo energético, produciendo nitrato (NO_3).

Amonificación. Descomposición de desechos nitrogenados y restos de organismos por bacterias y hongos.

Denitrificación: Reducción de nitratos y nitritos a nitrógeno gaseoso (N_2) y óxido nitroso (NO_2).

Fijación de nitrógeno: Algunas bacterias asimilan el nitrógeno gaseoso (N_2) del aire, en las reacciones de reducción, los electrones se unen al nitrógeno, formado amoníaco (NH_3) o amonio (NH_4^+).

Los ecosistemas son sistemas abiertos que requieren continuamente energía y nutrientes. El funcionamiento de un ecosistema implica una serie de ciclos, como el ciclo de agua y el ciclo nutritivo, que se desarrollan gracias al flujo de energía proveniente de la luz solar.

Organización trófica: Los ecosistemas están organizados en niveles distintos de nutrición. Se denomina **nivel trófico** a cada uno de los conjuntos de especies, o de

organismos, de un ecosistema que coinciden por la posición o turno que ocupan en el flujo de energía y nutrientes, es decir, a los que ocupan un lugar equivalente en la cadena alimentaria.

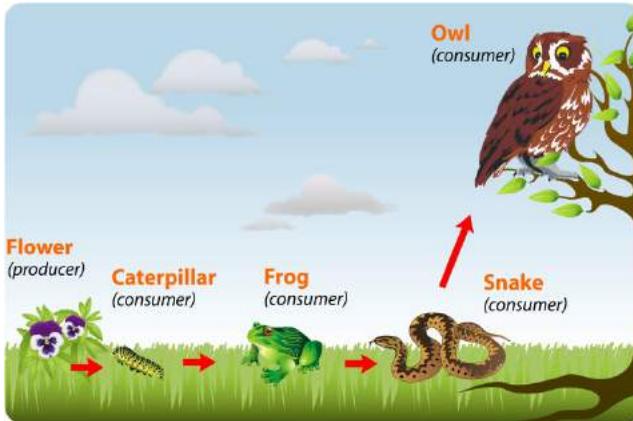


Figura 1.1. Ejemplo de cadena alimentaria (www.google.com.tr/search?q=food+chain)

En cada transferencia de una cadena alimentaria (Figura 1.1), una parte importante de la energía potencial se pierde por las reacciones químicas en forma de calor. A causa de esta pérdida progresiva de energía durante el proceso de alimentación de los diferentes organismos que componen la cadena, el flujo de energía total en cada nivel siguiente es cada vez menor. Esto limita, por lo general, el número de intervinientes en una cadena alimentaria, a cuatro o cinco organismos. En la mayoría de los casos las relaciones entre los organismos son tan complejas que la cadena alimentaria se desarrolla en forma de red, ramificándose en la denominada red alimentaria o red

trófica (Figura 1.2), que es, en la realidad, el funcionamiento de cómo se alimenta un ecosistema.

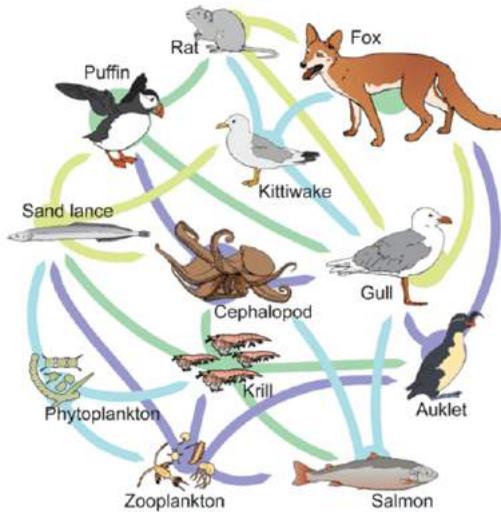


Figura 1.2. Ejemplo de red trófica ([www.google.com.tr.search?q=food+web](http://www.google.com.tr/search?q=food+web))

Un ecosistema también puede ser representado por pirámides ecológicas. Hay tres tipos de pirámides (Figura 1.3).

Pirámides de Números: construida contando el número de individuos de cada nivel trófico.

Pirámide de Biomasa: representa la cantidad de biomasa, materia orgánica viva o muerta, de cualquier nivel trófico.

Pirámide de Energía: Representa la energía almacenada en cada nivel trófico y que se encuentra disponible para el nivel superior.

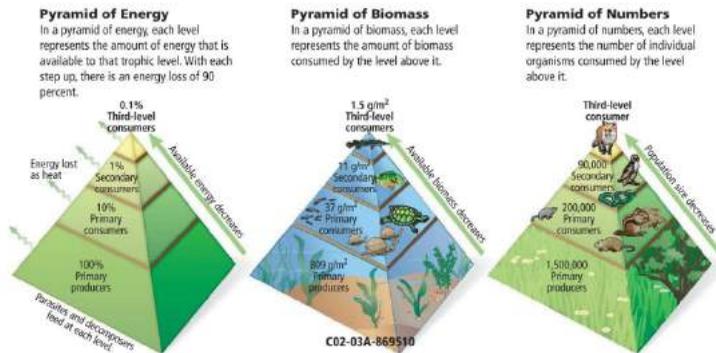


Figura 1.3. Ecological pyramids (<https://www.google.com.tr/search?q=food+web>)

Cuando la energía es transferida al siguiente nivel trófico, sólo el 10 % de la misma es utilizada para generar nueva biomasa, el resto es utilizada durante los procesos metabólicos (regla del 10%).

Función de ecosistema: todos los seres vivos de un ecosistema están relacionados por la alimentación y dependen unos de otros para sobrevivir.

Flujo de energía: En última instancia, la mayor parte de organismos dependen del sol para la obtención de energía. Esta transferencia comienza cuando la energía de la luz del sol es fijada por una planta verde mediante la fotosíntesis. En cada transferencia de energía dentro de una cadena alimentaria, aproximadamente el 90% de la energía química almacenada en el nivel inferior se pierde, no estando disponible para el nivel más alto. Dado que la cantidad total de energía que entra en la cadena alimentaria es a través de las plantas, ésta está disponible para los

organismos que ocupan la posición inferior en la cadena. Expresado en términos numéricos, el consumo energético quedará así: maíz – ternera – humano (10.000 ud – 1.000 ud. – 100 ud. de energía); al mover al hombre a un nivel inferior en la cadena alimentaria, se obtiene directamente diez veces más de energía: maíz – ternera (1.000 ud. y 1.000 ud. de energía).

1.4 Los ciclos biogeoquímicos

Todos los organismos vivos son dependientes no sólo de una fuente de energía sino también de la materia inorgánica, que está continuamente interactuando en todas las partes del ecosistema. El **ciclo biogeoquímico** se refiere al movimiento de los elementos entre los seres vivos y el ecosistema mediante procesos de degradación y descomposición por el que estos elementos cambian de una forma inorgánica a una molécula orgánica una y otra vez. La materia es limitada, de manera que su reciclaje es un punto clave en el mantenimiento de la vida en la Tierra, de otro modo, los nutrientes se agotarían y la vida desaparecería. De los 92 elementos químicos que existen en la naturaleza, aproximadamente 40 son esenciales para la existencia de los organismos vivos y forman el entorno abiótico de los seres vivos. El ciclo implica un cambio de los elementos de una forma inorgánica a una molécula orgánica constantemente (Kumar, 1997).

1.4.1 El ciclo del agua

El sol, que determina el ciclo de lluvias, calienta el agua de los océanos, convirtiéndola en vapor de agua. La evapotranspiración se define como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación. Corrientes ascendentes de aire llevan el vapor a las capas superiores de la atmósfera, donde las bajas temperaturas provocan la condensación del vapor en nubes, transportadas por las corrientes de aire a través del globo. Cuando colisionan, las partículas caen a través de las precipitaciones en forma de agua o nieve. Parte de esta precipitación se acumula formando capas de hielo en los glaciares, que pueden almacenar esta agua congelada durante miles de años. El agua de deshielo corre sobre la superficie del terreno, provocando escorrentías y, a veces, inundaciones. La mayor parte de las precipitaciones retorna a los océanos o sobre la tierra, donde las corrientes subterráneas de agua se acumulan y son almacenadas en lagos de agua dulce. Otras acumulaciones son las provenientes de los afluentes y ríos, que al infiltrarse en zonas rocosas dan lugar a los acuíferos, almacenando agua dulce durante largos períodos de tiempo (Figura 1.4).

1.4.2 El ciclo del carbono

Las moléculas basadas en el carbono son cruciales para la vida, ya que la transferencia de energía se produce a través del consumo y el almacenamiento de hidratos de carbono. La fuente de casi todo el carbono encontrado en la

atmósfera y disuelto en las aguas de la tierra es el dióxido de carbono.

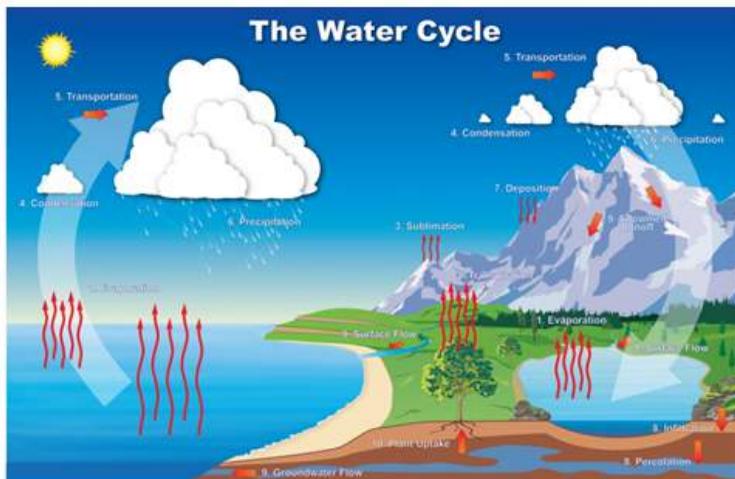


Figura 1.4. El ciclo del agua (<https://www.google.com.tr/search?q=biogeochemical+cycles>)

El ciclo del carbono comprende una secuencia de eventos clave, que son las reacciones provocadas por la respiración de los seres vivos y la fotosíntesis de las plantas. Los hidratos de carbono y el oxígeno utilizados en la respiración de los animales producen dióxido de carbono, agua y energía. De otro lado, las plantas absorben el dióxido de carbono y agua para realizar la fotosíntesis produciendo hidratos de carbono y oxígeno (Figura 1.5).

Cuando un animal o una planta mueren, el carbono contenido en ellos es usado por los organismos descomponedores y puede acumularse en el entorno para producir carbón, aceite o gas natural.

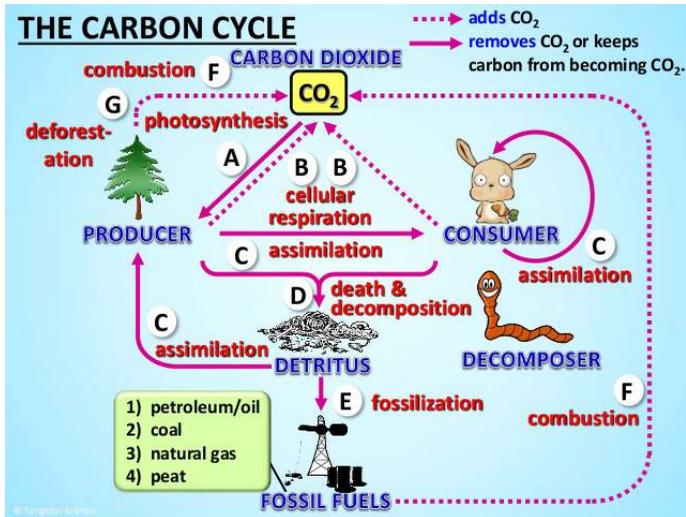


Figura 1.5. El ciclo del carbono (<https://www.google.com.tr/search?q=biogeochemical+cycles>)

1.4.3 El ciclo del nitrógeno

El nitrógeno es esencial para la vida ya que es un elemento crucial para la formación de proteínas y ácidos nucleicos. El depósito principal de nitrógeno se encuentra en la atmósfera, la cual está formada por un 78% de este elemento. La atmósfera es el reservorio más grande de cualquier elemento gaseoso. El nitrógeno en forma de gas de la atmósfera es fijado por las bacterias y las algas cianofíceas (plancton marino). Ambas fijan el nitrógeno, ya sea en forma de nitrato o de amoníaco. Cuando una planta o animal muere, las bacterias amonificantes (descomponedoras) transforman los compuestos orgánicos y liberan al suelo NH₃. El amoníaco liberado al

suelo sufre el proceso de nitrificación, que es realizado por dos tipos de bacterias, una convierte el amonio en nitrito y otra el nitrito en nitrato; así nuevamente las plantas tienen una forma aprovechable de nitrógeno. (Figura 1.6).

1.4.4 El ciclo del fósforo

Es un ciclo sedimentario en la corteza terrestre, cuyo principal depósito es la roca formada en eras geológicas pasadas.

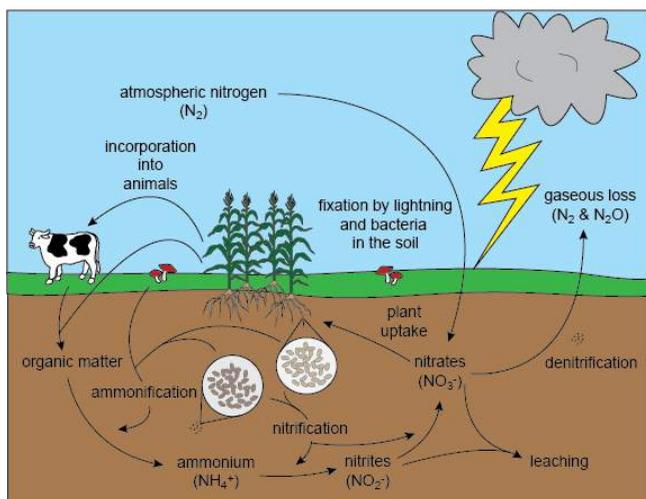


Figura 1.6. El ciclo del nitrógeno <https://www.google.com.tr/search?q=biogeochemical+cycles>

Las precipitaciones erosionan el fosfato que se disuelve en el terreno donde crecen las plantas y es absorbido por las raíces de las mismas para el llevar a cabo la síntesis celular. Los animales reciben el fósforo de las plantas,

devolviéndolo al suelo cuando excretan. Muchos de estos fosfatos disueltos en el terreno son arrastrados por las corrientes de agua hasta el mar, formando sedimentos marinos. Una parte de este elemento retorna a la tierra a través de los excrementos de las aves marinas que se alimentan de peces (Figura 1.7). La participación humana es un factor importante en este ciclo en concreto. Actualmente el litoral marino y los lagos tienen un exceso de fosfato biodisponible. Este excesivo enriquecimiento de nutrientes lejos de ser beneficioso provoca una exagerada proliferación de algas. Este proceso es conocido como la **eutrofización** (Kumar, 1997).

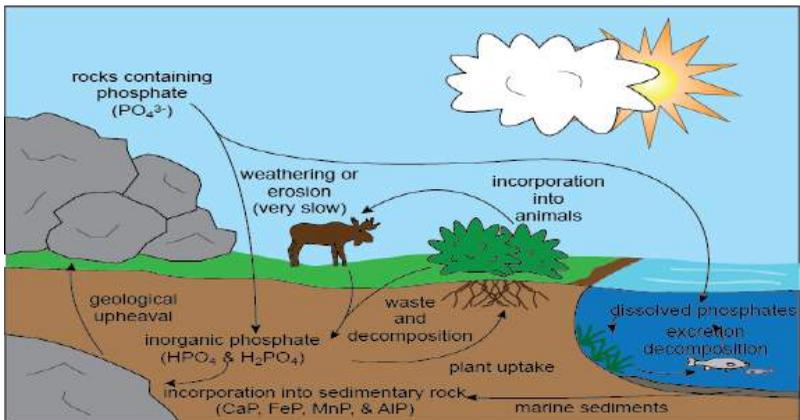


Figura 1.7. El ciclo del fósforo (<https://www.google.com.tr/search?q=biogeochemical+cycles>)

1.4.5 El ciclo del azufre

El azufre, en pequeñas cantidades, es un elemento esencial para la formación de moléculas orgánicas. Se encuentra combinado con otros elementos (plomo o mercurio), como sulfatos en las rocas o como azufre libre. El mayor depósito de azufre está en la corteza terrestre como yeso (CaSO_4) y piritita (FeS_2). Tras la oxidación las bacterias liberan sulfuro de hidrógeno (H_2S), un gas con olor a huevo podrido, característico de las aguas residuales. El agua dulce contiene sulfato, sulfuro de hidrógeno y azufre elemental, la tierra contiene sulfato y la atmósfera contiene óxido de azufre (SO_2). La actividad volcánica libera algo de sulfuro de hidrógeno al aire (Figura 1.8).

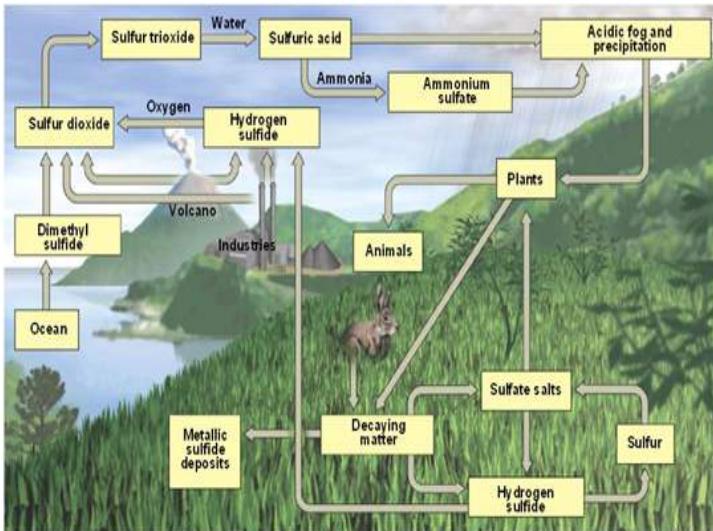


Figura 1.8. El ciclo del azufre (<https://www.google.com.tr/search?q=biogeochemical+cycles>)

1.5 Contaminantes en los ecosistemas

Contaminante: cualquier agente que afecta a la salud, la supervivencia o la actividad de los organismos vivos de manera desfavorable y modifica su entorno negativamente.

Compuestos Orgánicos Persistentes (COP): compuestos químicos resistentes a la degradación ambiental, por ejemplo, los componentes electrónicos. Incluye los DDT y PCB's.

¿Cómo entran los agentes contaminadores en el entorno?

Origen puntual: una fuente única identificable y localizada de contaminación, como factorías, plantas de energía y aguas residuales.

Origen no puntual: Los agentes contaminantes provienen de fuentes dispersas como los desechos de una granja de animales o una obra en construcción.

Los factores que influyen en el movimiento de los contaminantes por un ecosistema son:

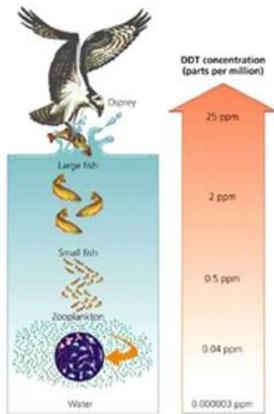
- La solubilidad de los contaminantes, que determina cómo, dónde y cuándo se moverá por el entorno, los contaminantes solubles se mueven rápida y extensamente por el entorno.
- El transportador del contaminante, generalmente necesitan un portador para moverse por el entorno y dentro del cuerpo de un ser vivo.

- La asimilación de los agentes, una vez dentro del cuerpo del ser vivo, los agentes penetran fácilmente en tejidos y células donde se acumulan en los depósitos de lípidos, protegidos del metabolismo.
- La persistencia de estos agentes, que puede ser muchos años y que determina el tiempo que lleva su desaparición del ecosistema, p.e. los plásticos e hidrocarburos tratados con cloro son muy resistentes a la degradación. Asimismo, los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) son, por naturaleza, muy resistentes a la degradación.

Contaminantes en la cadena alimentaria:

Bioacumulación: proceso por el cual las células, al absorber las sustancias nutritivas y minerales esenciales, almacenan agentes contaminantes dañinos, alcanzando concentraciones crecientes a medida que se avanza en el nivel trófico de la cadena alimentaria.

Biomagnificación: proceso por el cual los efectos de los agentes contaminantes se amplían dentro de la cadena alimentaria (Figura 1.9). Algunos agentes nocivos son muy estables y resistentes a la degradación metabólica, permaneciendo mucho tiempo en el organismo. Cuando un organismo es consumido por un miembro de un nivel superior de la cadena trófica, el consumidor sólo es capaz de asimilar aproximadamente el 10% de la biomasa de la presa (Regla del 10 %), así, la mayor parte de los contaminantes pasan de la presa al consumidor por solubilidad.



The higher up the food chain, the more concentrated the pesticides become.

This process is called biomagnification (or bioamplification)

Figura 1.9. Biomagnificación (<https://www.google.com.tr/search?q=biogeochemical+cycles>)

Movimiento de agentes contaminantes: La advección, la difusión y la dispersión son los procesos principales que transportan los contaminantes lejos de su fuente (Figura 1.10).

Advección: Desplazamientos dentro de una masa de aire atmosférica o una bolsa de agua. El contaminante se mueve a la velocidad del aire o agua en el que fluye.

Difusión: Proceso por el cual las moléculas contaminantes se dispersan en el aire o el agua. ¿Qué causa la difusión molecular? A una temperatura dada (p.ej. 20°C), las moléculas tienen cierta energía que las mantiene en movimiento. Como resultado de este movimiento las moléculas colisionan. La colisión modifica la trayectoria inicial de la molécula contaminante. La difusión mueve los contaminantes de alta concentración a baja concentración, extendiéndolos. El mejor ejemplo de difusión es poner una

pequeña cantidad de colorante en un vaso lleno de agua sin movimiento, lentamente el colorante se extenderá por el agua hasta teñirla uniformemente, el colorante debe tener la misma densidad que el agua. Tomado de <https://www.coursehero.com/file/219914/esm222-08-9-movement/>

Dispersión: Los edificios, las rocas de los ríos, la grava y la arena de los acuíferos contribuyen a la expansión de los contaminantes, unido al viento y las corrientes de agua.

Retardo: Un contaminante absorbido por el suelo se propaga a menor velocidad que si se encuentra en el aire o el agua. Lleva más tiempo para el agente recorrer una distancia. Los contaminantes unidos a las partículas en movimiento (coloides), se pueden agregar o no.

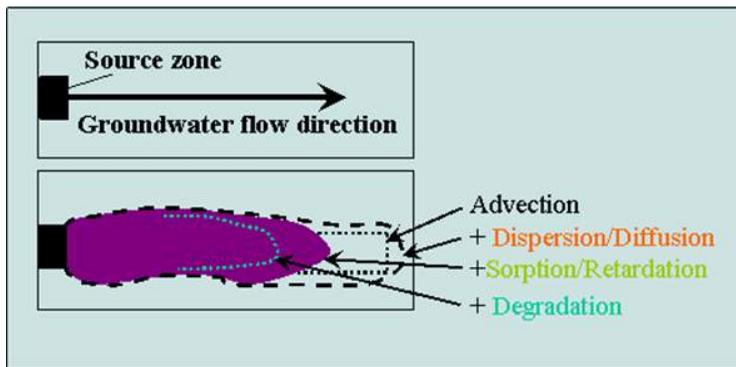


Figura 1.10. Transporte de contaminantes en aguas subterráneas (<https://www.coursehero.com/file/219914/esm222-08-9-movement/>.)

Referencias:

Ambelu A., Deboch B., & Lenjissa D., (2007). Lecture Notes on Ecology, Jimma University, in collaboration with the Ethiopia Public Health Training Initiative, The Carter Center, the Ethiopia Ministry of Health, and the Ethiopia Ministry of Education.

Kumar, H.D. (1997). Modern Concepts of Ecology. 8th Edition, USA, Vikas Publication House.

Web page (2017), retrieved from <https://www.google.com.tr/search?q=biogeochemical+cycles>

CAPÍTULO 2

HUELLA ECOLÓGICA DE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS

Autor: Gamze YÜCEL İŞILDAR¹

¹Gazi University, Institute of Science and Technology,
Environmental Sciences Dept, Ankara-Turkey

e-mail: akarakoc@gazi.edu.tr

Resumen: Con el crecimiento de la población y el aumento del consumo en muchas partes del mundo, la carga ecológica de la humanidad sobre el planeta se ha elevado y los recursos naturales se han vuelto insuficientes para satisfacer todas nuestras demandas. Por lo tanto, la capacidad de la naturaleza se ve mermada para absorber gran parte de la contaminación generada. Es necesario realizar evaluaciones comparativas entre las demandas humanas y los recursos limitados del planeta. En este capítulo se habla sobre el concepto de "Huella Ecológica" (EF), un supuesto ecológico de "biocapacidad" y cómo las demandas se acercan o superan este supuesto. Se explica la "huella de carbono" (CF), o huella ecológica que se centra estrictamente en los gases de efecto invernadero liberados por la quema de combustibles fósiles implicados en los sistemas convencionales de producción de energía. Finalmente, se comparan los sistemas de energía alternativa en términos de EF y CF.

Objetivos de aprendizaje:

Al final de este capítulo el estudiante será capaz de,

- Conocer las definiciones y las implicaciones de los conceptos de huella ecológica (EF) y huella de carbono (CF)
- Conocer los resultados de los cálculos y las limitaciones de las huellas ecológica y de carbono
- Conocer los componentes de la huella ecológica
- Comparar las diversas huellas ecológicas de los sistemas de producción de energía

2.1. Huella ecológica

2.1.1. Necesidad de huella ecológica

El suelo, el agua, el aire, los minerales y las plantas son algunos de los recursos naturales que hacen posible la vida en la Tierra. La energía que nutre, sustenta y alimenta todas las células que forman los seres vivos y las provee de los nutrientes esenciales para formar los tejidos proviene de la naturaleza.

Los ciclos del ecosistema que limpian el agua y el aire y regulan el clima son todos provistos por la naturaleza. Todos los recursos naturales provienen de la Tierra y de ellos depende el bienestar humano, de la capacidad del hábitat para proporcionar los bienes y servicios que necesitamos. Los servicios del ecosistema se resumen a continuación en la Figura 2.1.

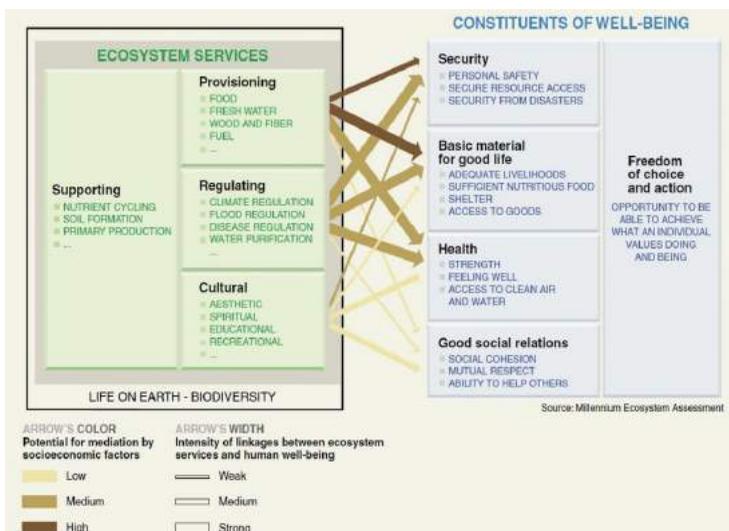


Figura 2.1. Ecosistemas y servicios (http://www.unepfi.org/fileadmin/documents/bloom_or_bust_report.pdf)

Con el aumento de la población y el incremento del consumo en el mundo, ha crecido la presión ecológica de la humanidad sobre el planeta y los recursos naturales resultan insuficientes para satisfacer todas nuestras demandas. El colapso de los recursos pesqueros, el cambio climático inducido por el carbono, la deforestación y la pérdida de tierras de cultivo debido a la erosión y la salinización, son ejemplos más ilustrativos de las presiones que amenazan la capacidad de los ecosistemas para seguir produciendo recursos y servicios renovables esenciales. Particularmente desde mediados del siglo XX, estamos poniendo en peligro una serie de sistemas ambientales clave y excediendo la *capacidad de carga* de la tierra. Por capacidad de carga, entendemos la capacidad

máxima de la naturaleza para sostener a la población humana y sus actividades, en términos de alimento, agua, hábitat, energía. Desafortunadamente, la capacidad de la naturaleza se vuelve insuficiente para absorber gran parte de la contaminación generada. Según el informe *World Footprint* de *Global Footprint Network* (noviembre 2015), hoy en día la humanidad utiliza el equivalente a la capacidad de 1,6 planetas para proporcionar los recursos que utilizamos y absorber los residuos que generamos. Para dimensionar esta cuestión, es necesario observar, comprender y confrontar los impactos concretos de los problemas ambientales, el deterioro y el agotamiento de los recursos. La capacidad de medir la presión sobre los ecosistemas ayuda a reconocer la crisis ambiental. Por lo tanto, hay que buscar mediciones empíricas para comprender las fuerzas motrices que impulsan estos impactos y encontrar formas de reducirlos, manteniendo el bienestar económico y social (Galli A. et al., 2015).

La *Contabilidad de la Huella Ecológica* (EFA) se ha utilizado como primera aproximación de la presión total sobre los ecosistemas (Galli 2015; Lin D. et al., 2015; Wackernagel M. et al., 2014). La *huella ecológica* (EF) es una herramienta para estimar si la tasa de consumo de la humanidad excede o no la capacidad de carga de la Tierra, la medida en que la sociedad excede la capacidad regenerativa del planeta.

2.1.2 Huella ecológica y términos relacionados

La **huella ecológica** de una población concreta es el área de la tierra productiva y los ecosistemas acuáticos necesarios para producir los recursos que la población

consume y la asimilación de los desechos que produce, en cualquier lugar del planeta donde haya terrenos y agua pasa ser habitable (Wackernagel M. y Rees W., 1996). Mide los requisitos de las áreas productivas: tierras de cultivo, tierras de pastoreo, bosques, áreas marinas, terrenos edificables para vivienda e infraestructura. Esta contabilidad de recursos es similar al análisis del ciclo de vida donde el consumo de energía, biomasa, material de construcción, agua, etc. se convierten en una medida normalizada de la superficie de tierra llamada **hectárea global (gha)**. Una gha es una hectárea biológicamente productiva con productividad media mundial para un año dado. Los diferentes tipos de tierras tienen una productividad diferente. Por ejemplo, una hectárea mundial de tierras de cultivo ocuparía una superficie física menor que las tierras de pastos biológicamente menos productivas, ya que se necesitarían más pastizales para proporcionar la misma biocapacidad que una hectárea de tierras de cultivo. Debido a que la bioproductividad mundial varía ligeramente de un año a otro, el valor de una gha puede variar ligeramente de un año a otro (WWF, 2016). Recientemente se ha cambiado para medir el uso de la tierra que se requiere para las actividades que se llevan a cabo en la biosfera dentro de un año dado mientras se considera la tecnología y el manejo de recursos prevalecientes en ese año (Borucke M. et al., 2013). Estas hectáreas biológicamente provechosas, ponderadas por productividad, permiten a los investigadores conocer tanto la biocapacidad de una región, como la demanda de necesaria para satisfacer una necesidad dada (Huella Ecológica). El **factor de equivalencia** es el factor clave que permite que tierras de diferentes tipos se conviertan en

la unidad común de hectáreas globales. Estos factores de equivalencia se basan en evaluaciones de la productividad relativa en tierras de distintas características en un año dado. En la mayoría de los cálculos de EF, se utiliza un índice de idoneidad para la producción agrícola como medida aproximada de la capacidad productiva de los diferentes tipos de tierras. Dentro de un determinado tipo de tierra la capacidad de un área para producir bienes y servicios útiles puede variar drásticamente en función de factores como el clima, la topografía o la gestión y uso del mismo. Los **factores de rendimiento** permiten comparar diferentes áreas del mismo tipo de tierra en base al denominador común del rendimiento. Estos factores convierten una hectárea de un tipo de tierra específico, como los pastizales en un número equivalente de hectáreas promedio mundial de ese mismo tipo de tierra (<http://www.footprintnetwork.org/faq/>).

Si la Huella Ecológica de una población excede la biocapacidad de la región, esa región tiene un **déficit ecológico**. La cantidad de bienes y servicios que sus tierras y mares pueden proveer (frutas y vegetales, carne, pescado, madera, algodón para la ropa y absorción de dióxido de carbono), supera lo que los ecosistemas de la región pueden renovar. Una región con déficit ecológico no satisface la demanda al sobreexplotar sus propios activos ecológicos (p.e. por la sobrepesca) y/o emitir dióxido de carbono a la atmósfera. Las consecuencias de la sobreexplotación son claras: pérdida de hábitat y especies y acumulación de carbono en la atmósfera (Tittensor D. P. et al., 2014). Si la biocapacidad de una región supera su EF, significa que tiene una reserva ecológica.

La Figura 2.2 muestra las tendencias de la EF mundial y la biocapacidad (en gha), de 1961 a 2012. Es obvio que una situación global de sobreexplotación ha comenzado en los años setenta y desde entonces la demanda de la humanidad ha aumentado constantemente. Se prevé que la demanda humana sobre la capacidad regenerativa de la Tierra seguirá creciendo constantemente y superará dicha capacidad en un 75% para 2020. Un nuevo diseño de esta carga de demanda requeriría cambios considerables en tecnologías, infraestructuras y comportamientos, a fin de apoyar una producción y estilos de vida que consuman menos recursos (WWF, 2016)

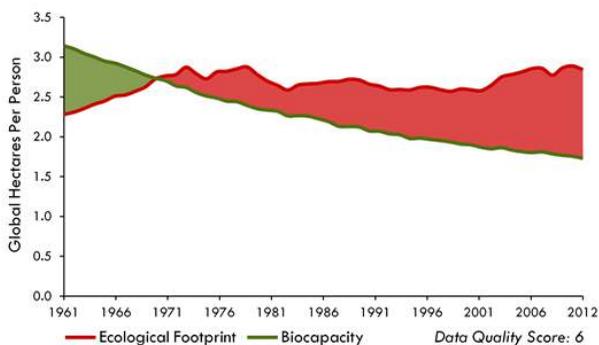


Figura 2.2. Huella ecológica y biocapacidad (<http://www.footprintnetwork.org/content/images/trends/2016/world.png>)

La influencia de la actividad humana se muestra en la Figura 2.3.

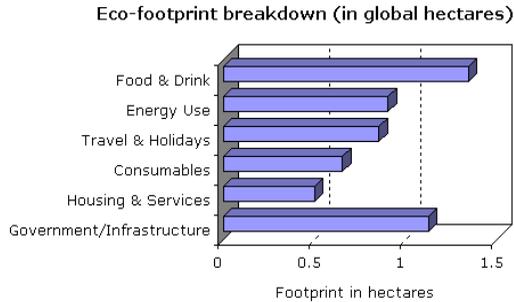


Figura 2.3. Desglose de la Huella Ecológica (en gha) (<http://info.cat.org.uk/questions/low-impact-living/what-ecological-footprint/>)

2.1.3. Uso de valores EF

Los resultados de la Huella Ecológica muestran cuán lejos está la humanidad de una utilización justa y segura de los recursos naturales y los espacios, hallándose un uso excesivo del patrimonio natural y de los servicios ecológicos, siendo el resultado de los estudios relevante para alertar ante la necesidad inmediata de protección del medio y de un enfoque hacia la sostenibilidad. (Dearing J. A. et al., 2014)

Los valores de la Huella Ecológica se usan para:

- Informar en qué medida un país, ciudad, persona o instalación utiliza más o menos la tierra disponible
- Analizar posibles escenarios para el futuro de la demanda humana y del ecosistema

- Situar a la humanidad en una gestión sostenible del consumo de alimentos y energía, frenando el exceso, y aumentando la productividad de los ecosistemas naturales y agrícolas
- Ser una herramienta útil para educar a las personas sobre la capacidad de carga y el consumo excesivo, con el objetivo de liderar un cambio de comportamientos hacia la naturaleza
- Involucrar a los actores públicos en la transformación de la sociedad basándose en diagnósticos certeros, para implantar políticas y en toma de decisiones en estos económicas.

La Huella es sobre todo útil para planificación cuando se plantean decisiones relacionadas con inversiones a largo plazo.

Hay que tener en cuenta que los cálculos de EF tienen algunas limitaciones (Galli A. et al., 2016). La EF utiliza un solo concepto o enfoque -la biocapacidad- para rastrear la dependencia humana de los ecosistemas que complejos e interdependientes. No aborda todas las consecuencias ambientales relacionadas con el consumo humano, como la contaminación y la pérdida de hábitat (Galli A. et al., 2012). Es un enfoque que toma una instantánea del uso de los recursos de una comunidad en un momento particular. Se necesitan datos ecológicos históricos para permitir comparaciones a través del espacio y el tiempo (Marazzi L., 2017). Proporciona información sobre una condición mínima para la sostenibilidad: si las actividades de consumo humano encajan o no dentro del umbral biológico definido por la biocapacidad de la Tierra (Lin et

al., 2015). La Huella Ecológica no es sólo una medida del impacto humano, sino también una medida predictiva de la sostenibilidad. Es un sistema de contabilidad que compara la demanda humana en los ecosistemas de la Tierra con lo que estos ecosistemas son capaces de renovar. La Huella Ecológica deben ser utilizada como marco de referencia mínimo necesario, pero no suficiente, como aproximación a todas las demandas de la humanidad que compiten por áreas biológicamente productivas (Galli, 2016).

2.1.4. Componentes de la huella ecológica

En la contabilidad de la huella ecológica, se distinguen seis componentes o productos del ecosistema para el bienestar humano y la alimentación: producción de plantas, producción de ganadería, producción de pescado, producción de madera, suministro de espacio vital y producción de CO₂ (Galli A. et al., 2012; Kitzes et al., 2009).

Los componentes son ponderados con factores de equivalencia antes de la suma total, es un indicador terrestre. (Wackernagel y Rees, 1996; Steen-Olsen et al., 2012).

La figura 2.4 muestra y explica los componentes de la EF.

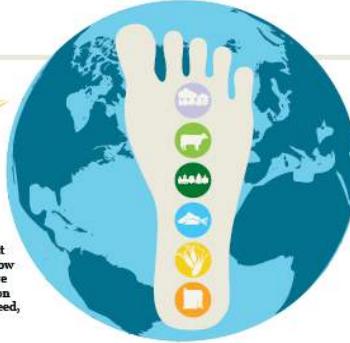
Carbon

Represents the amount of forest land that could sequester CO₂ emissions from the burning of fossil fuels, excluding the fraction absorbed by the oceans which leads to acidification.



Cropland

Represents the amount of cropland used to grow crops for food and fibre for human consumption as well as for animal feed, oil crops and rubber.



Grazing Land

Represents the amount of grazing land used to raise livestock for meat, dairy, hide and wool products.



Forest

Represents the amount of forest required to supply timber products, pulp and fuel wood.



Built-up Land

Represents the amount of land covered by human infrastructure, including transportation, housing, industrial structures and reservoirs for hydropower.



Fishing Grounds

Calculated from the estimated primary production required to support the fish and seafood caught, based on catch data for marine and freshwater species.

Figura 2.4 Componentes de la huella ecológica (WWF, 2016)

2.2. Huella de carbono

La descripción de la huella ecológica en componentes individuales muestra cómo cada uno contribuye a la demanda que la actividad humana ejerce en el hábitat. Probablemente el componente más conocido del EF es la

Huella de Carbono (CF). El aumento de las demandas antropogénicas fue más prominente para el FC (+260% por el creciente uso de combustibles fósiles, electricidad y productos energéticos intensivos) y los componentes de la Huella Agraria (+125%) (WWF, 2016). El creciente interés en la FQ viene como resultado de la mayor conciencia pública sobre el calentamiento global.

La **Huella de Carbono** representaría el área de la tierra requerida para absorber el CO₂ que se libera por quema de combustibles fósiles y otras fuentes (WWF, 2016). Se utiliza para describir la cantidad total de CO₂ y otras emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de las que es responsable ser humano. Las definiciones varían en cuanto a las actividades y los gases de efecto invernadero que deben incluirse en la evaluación de la huella. Algunas sólo mencionan el dióxido de carbono (Global Footprint Network, 2007). Otras definiciones y métodos incluyen todos los gases de efecto invernadero de Kioto y miden las emisiones en términos de "equivalentes de dióxido de carbono", como Carbón Trust (2007).

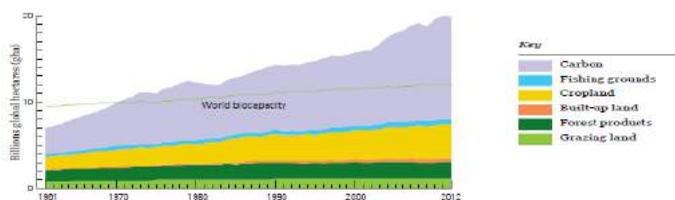


Figura 2.5. Unidades de la huella ecológica (WWF, 2016)

La Figura 2.5 muestra que el **carbono** es el componente dominante del EF de la humanidad (que oscila entre el 43% en 1961 y el 60% en 2012). Su principal causa ha sido la quema de combustibles fósiles, carbón, petróleo y gas natural. La línea verde representa la capacidad de la Tierra para producir recursos y servicios ecológicos (biocapacidad). Se aprecia una ligera tendencia al alza, debido principalmente al aumento de la productividad agrícola (Global Footprint Network, 2016). Los datos se dan en hectáreas globales (gha) (WWF, 2016)

A pesar de su nombre, la Huella de Carbono no se expresa en términos de área. La cantidad total de gases de efecto invernadero se mide en unidades de masa (kg, t, etc.) y no se produce ninguna conversión a una unidad de superficie (hectárea, metro cuadrado...). Cualquier conversión a una unidad de área distinta tendría que basarse en una variedad de supuestos que aumentarían las incertidumbres y errores asociados con una estimación particular de la Huella de Carbono. Cuando sólo se incluye el CO₂, la unidad es kg CO₂; si se incluyen otros GEI, la unidad es kg CO₂-e, expresando la masa de CO₂ equivalente. Éstos se calculan multiplicando la masa real de un gas con el factor de potencial de calentamiento global para este gas en particular, haciendo que los efectos del calentamiento global de diferentes GEI sean comparables y aditivos.

Sin embargo, dentro de un cálculo completo de la Huella Ecológica, los datos sobre las emisiones CO₂ se traducen en el área en hectáreas globales requeridas para absorber estas emisiones de carbono (Monfreda C. et al., 2004). Esta huella de carbono global basada en hectáreas puede

añadirse a otros componentes del EF, como la huella ecológica total de una población o actividad.

Es ampliamente aceptado que la evaluación del ciclo de vida (ACV) es una herramienta útil para calcular la huella de carbono, especialmente a nivel de producto (Wiedmann T. y Minx J., 2008). Sin embargo, las críticas hacia la huella de carbono permanecen. La más importante es la de quienes entienden que la enorme cantidad de datos compromete la calidad del resultado, especialmente en situaciones en las que esos datos, extremadamente limitados para su uso en cuentas micro o meso escala, conducen a la subestimación (Chakraborty D. y Roy J., 2013; De Benedetto L. y Kleme s J., 2009). Otra crítica es que la falta de consideración de las tierras con ausencia de carbono llevar a correr el riesgo de ignorar los procesos de retroalimentación terrestre, como la degradación abrupta de los sistemas forestales, la redistribución de la vegetación y los flujos oceánicos que afectan aún más el ciclo global del carbono, lo que puede tener impactos perjudiciales en el clima (Fang K. et al., 2013).

2.3. Huellas ecológicas de los sistemas de producción de energía

El uso y la demanda de energía están aumentando continuamente debido al crecimiento demográfico. Todas las formas de generación de energía tienen un impacto ambiental variable en el aire, el agua y la tierra. Los sectores residenciales, de trabajo, ocio y servicios, consumen enormes cantidades de energía y producen grandes emisiones de CO₂. Considerando que cerca del 80% de nuestra energía primaria actual proviene de

energías fósiles, los impactos ambientales de los sistemas de producción de energía son cada vez más importantes. Además de la creciente necesidad de energía, el riesgo del cambio climático causado por las emisiones de CO₂ para el medio ambiente y la salud humana es un reto científico y político internacional.

Para evaluar la carga medioambiental relativa de los sistemas energéticos en el medio ambiente, las cadenas de suministro de energía deben considerarse sobre la base del ciclo de vida, incluyendo todos los componentes del sistema y los tipos de impactos. Como herramienta de contabilidad de recursos, el EF puede ayudar a determinar los principales contribuyentes al impacto ambiental de la producción de energía, y a comparar los impactos de los sistemas de energía alternativa, de los combustibles fósiles, de las renovables y nucleares.

Al hacerlo, debe tenerse en cuenta:

- Cuánto espacio físico se necesita para generar la energía
- Cómo cambia este requisito entre fuentes de energía no renovables y renovables
- Cuáles son las implicaciones ecológicas de esas necesidades de espacio
- Qué se debe monitorear para comprender el efecto de las instalaciones generadoras de energía sobre los ecosistemas, la salud humana y los sistemas sociales

En esta sección, se detallan y comparan los impactos ambientales de los combustibles fósiles, las energías renovables y los sistemas de energía nuclear en términos de ciclos de vida, EF y valores de CF.

2.3.1. Comparativa de los sistemas de energía

La comparación de las diferentes tecnologías energéticas plantea un reto metodológico debido a que se basan en fuentes y técnicas muy diferentes para explotarlas.

Las tecnologías convencionales se basan principalmente en recursos fósiles como el carbón, el petróleo crudo y el gas natural. Estas tecnologías suelen ejercer su mayor presión sobre el medio ambiente durante el consumo, emitiendo CO₂ a la atmósfera y cambiando así los sistemas globales de flujo de carbono con graves consecuencias para el clima global.

Sin embargo, energías renovables como la eólica, solar, fotovoltaica e hidráulica tienen impactos ambientales especialmente vinculados a la construcción e instalación de los equipos: paneles fotovoltaicos, turbinas eólicas y colectores solares. Las *tecnologías energéticas basadas en recursos renovables* representan una gama muy diversa de tecnologías, con grandes diferencias en la tipología de impactos ambientales.

Existen varias metodologías para evaluar los impactos ambientales, tales como MIPS (Material Input Per Service Unit), CML-Method, CED (Demanda Acumulativa de Energía) y la ya mencionada huella ecológica. La huella de las energías renovables se puede utilizar en conjunción con modelos de huella de CO₂ para comprender los costes

y beneficios reales de la energía renovable para las sociedades (Burger J. y Gochfeld M., 2012).

Para una evaluación completa del impacto ambiental se necesita una herramienta de análisis que pueda medir los flujos de materiales, los flujos de energía y las emisiones. Esto requiere una medida con multitud de factores, para permitir la comparación pero que evalúe los diferentes impactos de forma transparente, certeza y científica.

A continuación, se resumen los resultados de los estudios comparativos de los impactos ambientales de los sistemas energéticos que utilizan la evaluación del ciclo de vida y las huellas ecológicas. La Tabla 2.1 muestra los rangos del ciclo de vida de las emisiones de CO₂ por kWh de electricidad generada para las fuentes de energía eléctrica consideradas (todas las tecnologías excepto los biocombustibles).

Tabla 2.1. Comparativa entre el ciclo de vida del dióxido de carbono, emisiones y costes (Jacobson M.Z., 2008).

Technology	Lifecycle	Opportunity cost emissions due to delays	War/terrorism (nuclear) or 500 yr leakage (CCS)	Total
Solar PV	19–59	0	0	19–59
CSP	8.5–11.3	0	0	8.5–11.3
Wind	2.8–7.4	0	0	2.8–7.4
Geothermal	15.1–55	1–6	0	16.1–61
Hydroelectric	17–22	31–49	0	48–71
Wave	21.7	20–41	0	41.7–62.7
Tidal	14	20–41	0	34–55
Nuclear	9–70	59–106	0–4.1	68–180.1
Coal-CCS	255–442	51–87	1.8–42	307.8–571

La Tabla 2.1 indica que el carbón tiene el mayor impacto. En segundo lugar, el impacto de la energía solar fotovoltaica es mayor y muy cercano a la geotérmica. El rango de impacto de la energía nuclear es muy amplio, como se menciona en la sección 2.4, y es difícil de comparar. Las emisiones del ciclo de vida climático sólo se producen durante la construcción, instalación, mantenimiento y clausura de la tecnología. En el caso de la energía geotérmica, las emisiones se producen debido a la evaporación de CO₂ disuelto del agua caliente en plantas de secado rápido o de vapor, pero no en plantas binarias. En el caso del etanol de maíz, etanol celulósico, carbón-CCS y energía nuclear, hay emisiones adicionales durante la extracción y producción del combustible. Para los biocombustibles y el carbón-CCS, las emisiones las producen los componentes de escape durante la combustión (Jacobson, 2008)

En el estudio realizado por Kettl, et. al (2011) se utilizó el *Índice de Procesos Sostenibles* (SPI) para examinar si las energías renovables tienen menor impacto para el medio ambiente que las tecnologías provenientes de fósiles. Los resultados (Figura 2.6) indicaron que, incluso una tecnología "limpia" basada en fósiles como las turbinas de gas natural, ejercen una mayor presión que todas las alternativas basadas en recursos renovables. La electricidad derivada de gas natural (con 41.0m²a / MJ) ejerce 10.8 veces el impacto de la tecnología de biogás (con 3.8m²a / MJ) y dos veces más que la fotovoltaica de base renovable (PV con 19.9m²a / MJ).

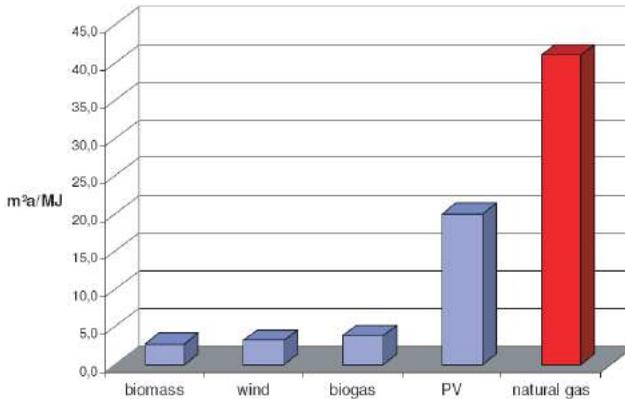


Figura 2.6. Comparación de la huella ecológica en diversos sistemas de energía (Kettl, et al., 2011)

*La unidad m²a/MJ significa área de huella por año de producción y MJ producido.

Finalmente, hay que considerar que Nugent y Sovacool (2014) revisaron críticamente 153 estudios del ciclo de vida de las energías renovables, especialmente la eólica y la solar. Se descubre que: "un rango de intensidades de emisión para cada tecnología, desde un mínimo de 0.4g CO₂-eq/kWh hasta un máximo de 364.8g CO₂-eq/kWh para la energía eólica, con un valor medio de 34.11g CO₂-eq/kWh. Para la energía solar, encuentra un rango de 1 g de CO₂- eq/kWh a 218 g de CO₂-eq/kWh ". Esto significa que muchas ECV tienden a ser subjetivas en sus criterios de decisión y parecen estar influenciadas por diferentes factores internos y externos. Incluso si se hacen objetivamente, las ECVs libres de sesgos pueden dar resultados diametralmente opuestos debido a las diferencias en su metodología, como se ejemplifica.

2.4. Energía nuclear

La mayoría de las emisiones se producen durante la extracción de uranio, el enriquecimiento y la fabricación de combustible. El desmantelamiento representa el 35% de las emisiones de CO₂ durante la vida útil, e incluye también las emisiones derivadas de la construcción y mantenimiento de las instalaciones de almacenamiento de residuos. La fase más intensiva en energía del ciclo nuclear es la extracción de uranio, que representa el 40% de las emisiones totales de CO₂. (Oficina Parlamentaria de Ciencia y Tecnología, 2006). Los resultados de Poinssot et. al., 2014 destacan de nuevo que la energía nuclear tiene el menor impacto en términos de emisión de GEI (unos 5,3 g/kWhe). Esto es 100 veces más bajo que la energía fósil y 8 veces más bajo que la fotovoltaica. Al considerar la contaminación atmosférica (SO_x y NO_x), la energía nuclear tiene valores más altos que la hidroeléctrica y la eólica, pero aún más bajos que la fotovoltaica y obviamente que las energías fósiles. En cuanto a otros indicadores de impacto (acidificación, eutrofización y COPC), las cifras de energía nuclear están sistemáticamente en segundo lugar, con un impacto superior al de la hidroelectricidad, pero inferior al de cualquier otra fuente de energía, incluso eólica y fotovoltaica. Del mismo modo, aunque la minería tiene un fuerte impacto, el uso de la tierra para la energía nuclear sería el más bajo. Por el contrario, las cifras del consumo de agua y la extracción de energía nuclear son significativamente más elevadas que las de otras fuentes de energía, en el ámbito de las energías fósiles. Por último, los residuos tecnológicos producidos por la energía nuclear son aproximadamente 1.000 menor que los de las

energías fósiles, pero siguen siendo 10 veces más altos que las renovables. Esto está directamente relacionado con el gran tamaño de las infraestructuras (plantas) que se necesitan para operar todo el ciclo del combustible (en particular los reactores).

Sin embargo, las catástrofes ocurridas en centrales nucleares como Chernobyl (USSR en 1986) y Fukushima (Japón, 2011) pueden tener efectos sociales y ecológicos de alto impacto, tanto a nivel regional como mundial. Existe un considerable "temor" sobre el potencial de accidentes de baja probabilidad, pero grandes consecuencias. El coste total del ciclo de vida de la explotación de una instalación nuclear puede ser elevado. Los costes del ciclo de vida incluyen la minería, molienda, enriquecimiento y fabricación (con los consiguientes efectos ecológicos y para la salud humana), corredores de transporte seguros, y el problema no resuelto de la eliminación de desechos, que puede conllevar un uso significativo del suelo subterráneo (Burger J. y Gochfeld M., 2012).

De hecho, no existe consenso en la literatura científica en cuanto a la huella de carbono de los reactores nucleares existentes. Los estudios para su determinación son un área problemática. La incoherencia metodológica y contextual entre las numerosas ECV de energía nuclear publicadas ha dado lugar a resultados muy diversos, haciendo difícil la comparación directa y frustrando una comprensión clara y colectiva (Warner E. y Garvin H., 2012). Los resultados son inciertos y especulativos. En 2012, cuatro años después del documento de Sovacool (2008), Ethan Warner y Garvin Heath encontraron 274 documentos que

contenían LCA nucleares. Seleccionaron 27 para su estudio. Sus datos sobre las emisiones de carbono oscilaban entre 4 y 220 g CO₂/kWh. No hallaron un promedio, sino un valor medio: la mitad de las estimaciones estaban por debajo de 13 g CO₂/ kWh. Estas dos revisiones de la literatura publicada arrojaron resultados contradictorios. Uno sugiere que la huella de carbono está por encima del límite CCC, el otro bien debajo.

(http://www.theecologist.org/News/news_analysis/2736691/false_solution_nuclear_power_is_not_low_carbon.html).

La situación de la energía nuclear como fuente de electricidad baja en carbono es dudosa: mientras que se compara favorablemente con los combustibles fósiles tradicionales como el carbón, la cadena logística necesaria para extraer y procesar uranio, la construcción de plantas y el desmantelamiento de plantas crean una huella de carbono para la energía nuclear que es significativamente mayor que las fuentes renovables. (https://www.cse.org.uk/downloads/reports-and-publications/planning/renewables/common_concerns_about_wind_power.pdf)

Disminuir o incluso eliminar la dependencia de los combustibles fósiles y orientarse hacia las fuentes de energía renovables, representa una gran oportunidad para reducir la huella de la actividad humana a una escala que la Tierra pueda soportar.

Referencias:

Borucke, M., Moore, D., Cranston, G., Gracey, K., Iha, K., Larson, J., Lazarus, E., Morales, J.C., Wackernagel, M., Galli, A. (2013). Accounting for demand and supply of the biosphere's regenerative capacity: the national footprint accounts' underlying methodology and framework. *Ecological Indicators*, (24), 518–533.

Galli, A., Lin, D., Wackernagel, M., Gressot, M. and Winkler, S. (2015). Brief for GSDR – Humanity's growing Ecological Footprint: sustainable development implications. Global Footprint Network.

Burger, J. and Gochfeld, M. (2012). A conceptual framework evaluating ecological footprints and monitoring renewable energy: wind, solar, hydro, and geothermal. *Energy and Power Engineering*, (4), 303-314.

Chakraborty, D. And Roy, J. (2013). Energy and carbon footprint: numbers matter in low energy and low carbon choices. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, (5), 1–7.

De Benedetto, and L., Klemes, J. (2009). The environmental performance strategy map: an integrated LCA approach to support the strategic decision making process. *Journal of Cleaner Production*, (17), 900-906.

Dearing, J.A., Wang, R., Zhang, K., Dyke, J.G. and Haberl, H. (2014). Safe and just operating spaces for regional social-ecological systems. *Global Environmental Change*, (28), 227-238.

Fang, K., Heijungs, R. and De Snoo, G. (2013). The footprint family: comparison and interaction of the ecological, energy,

carbon and water footprints. *Revue deMétallurgie*, (110), 77–86.

Galli, A., Wiedmann, T.O., Ercin, E., Knoblauch, D., Ewing, B.R. and Giljum, S. (2012). Integrating ecological, carbon and water footprint into a “Footprint Family” of indicators: definition and role in tracking human pressure on the planet. *Ecological Indicators*, (16), 100–112.

Galli, A. (2015). On the rationale and policy usefulness of ecological footprint accounting: the case of Morocco. *Environmental Science & Policy* (48), 210–224.

Jacobson, M. Z. (2008). Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy and Environmental Science*, (2), 148–173.

Kettl, K., Niemetz, N., Sandor, N., Eder, M. and Narodoslawsky, M. (2011), Ecological Impact of Renewable Resource-Based Energy Technologies. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, (1), 1-5.

Kitzes, J., Galli, A., Bagliani, M., Barrett, J., Dige, G., Ede, S., Erb, K., Giljum, S., Haberl, H. And Hails, C. (2009). A research agenda for improving national ecological footprint accounts. *Ecological Economics*, (68), 1991–2007.

Lin, D., Galli, A., Borucke, M., Lazarus, E., Grunewald, N., Martindill, J., Zimmerman, D., Mancini, S., Iha, K. and Wackernagel, M. 2015. Tracking supply and demand of biocapacity through ecological footprint accounting. *Sustainability Assessment of Renewables- Based Products: Methods and Case Studies*, 179–200.

Marazzi, L. (2017). *Our Ecological Footprint*, Macat International Ltd.

Monfreda, C., Wackernagel, M. and Deumling, D. (2004). Establishing national natural capital accounts based on detailed ecological footprint and biological capacity accounts. *Land Use Policy*, 231-246.

Nugent, D. and Sovacool, B.K. (2014). Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar PV and wind energy: A critical meta-survey. *Energy Policy*, (65), 229-244.

Parliamentary Office of Science and Technology, Postnote. (2006). Carbon footprint of electricity generation. Number 268

Sovacool, B.K. (2008). Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey. *Energy Policy*, 36(8), 2950-2963.

Steen-Olsen, K., Weinzettel, J., Cranston, G., Ercin, A.E. and Hertwich, E.G. (2012). Carbon, land, and water footprint accounts for the European Union: consumption, production, and displacements through international trade. *Environmental Science & Technology*, (46), 10883-10891.

Tittensor, D.P., Walpole, M., Hill, S.L.L., Boyce, D.G., Britten, G.L., Burgess, N.D., Butchart, S.H.M., Leadley, P.W., Regan, E.C. and Alkemade, R. (2014). A mid-term analysis of progress toward international biodiversity targets. *Science* 346 (6206): 241–244.

Wackernagel, M., Cranston, G., Morales, J. C. and Galli, A. (2014). Ecological footprint accounts, In: Atkinson, G., Dietz, S., Neumayer, E., Agarwala, M. (Eds.), *Handbook of Sustainable Development*. second revised edition Edward Elgar Publishing, Cheltenham, Glos, UK.

Wackernagel, M. and Rees, W. (1996). *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. New Society Publishers.

Warner, E. and Garvin, H. (2012). Life cycle greenhouse gas emissions of nuclear electricity generation. systematic review and harmonization. *Journal of Industrial Ecology*, 16(1), S73-S92.

Wiedmann, T. And Minx, J. (2008). A definition of ‘carbon footprint’. In: Pertsova, C.C. (Ed.), *Ecological Economics Research Trends* (pp. 1–11), Hauppauge, NY, USA: Nova Science Publishers.

WWF. 2016. *Living Planet Report 2016. Risk and resilience in a new era*. WWF International, Gland, Switzerland.

Web page (2017), retrieved from <http://www.footprint>

Web page (2017), retrieved from <http://www.footprintnetwork.org/content/images/trends/2016/world.png>

CAPÍTULO 3

SISTEMAS CONVENCIONALES DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA E IMPACTOS AMBIENTALES: LAS CENTRALES TÉRMICAS

Autores: Başak TAŞELİ¹ y Duygu ALTIOK²

¹Giresun University, Faculty of Engineering, Environmental Engineering Department, Giresun-Turkey

e-mail: basak.taseli@giresun.edu.tr

²Giresun University, Faculty of Engineering, Food Engineering Department, Giresun-Turkey

e-mail: evren.altiok@giresun.edu.tr

Resumen: La energía se requiere principalmente para satisfacer las necesidades de las personas y de los sectores como la industria, la vivienda y el transporte. Unido a los beneficios indispensables en nuestras vidas, la energía conlleva la contaminación del medio ambiente durante los procesos de producción, conversión, transporte y consumo. Los sistemas de producción y conversión de energía a gran escala, el crecimiento de la población y el desarrollo industrial, tienen una gran influencia en el equilibrio ecológico y en las relaciones transfronterizas. Las emisiones de las plantas de energía son el principal factor que provoca los problemas ambientales. Éstas incluyen emisiones sólidas, líquidas y gaseosas. No cabe duda de que la quema de combustibles fósiles aumenta inevitablemente la emisión de óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂) y dióxido de carbono (CO₂) que son

claramente responsables del calentamiento global. En este capítulo se describirá el impacto ecológico de la formación de la lluvia ácida y el agotamiento del ozono estratosférico.

Objetivos de aprendizaje:

Al final de este capítulo el estudiante será capaz de,

- Describir el concepto de impacto ambiental
- Explicar cómo operan las plantas de energía térmica
- Conocer los impactos de una central térmica
- Describir los conceptos de cambio climático, calentamiento global, agotamiento del ozono y lluvia ácida
- Conocer la cronología y la gravedad del cambio climático
- Explicar las causas y consecuencias del cambio climático, la lluvia ácida y el agotamiento de la capa de ozono.
- Ser consciente de la influencia humana en los cambios del medioambiente.

3.1 ¿Cómo funciona una central térmica?

Las centrales térmicas utilizan agua para su funcionamiento. El vapor se produce quemando combustible fósil (p.e. carbón) que luego se utiliza para hacer funcionar una turbina de vapor. Tras pasar por la turbina, el vapor se condensa en un condensador y se recicla volviendo a alimentar la caldera para convertirse de nuevo en vapor. (Figura 3.1). Además de carbón estas centrales usan petróleo o gas natural como combustible (<http://www.electricaleasy.com/2015/08/thermal-power-plant.html>).

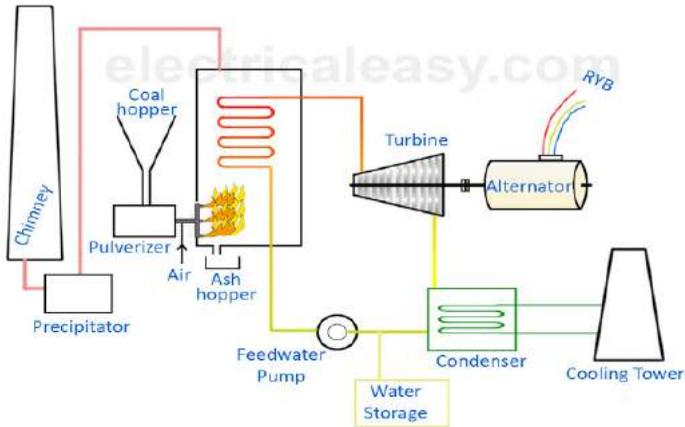


Figura 3.1. Diseño de una central térmica (<http://www.electricaleasy.com/2015/08/thermal-power-plant.html>)

3.2 Impactos ambientales de las centrales térmicas

Los efectos ambientales de una central térmica deben examinarse antes y después de la producción de energía. Por ejemplo, en una planta de energía que utiliza carbón, se debe considerar la eliminación de los restos de carbón y las cenizas, evaluando los efectos de la combustión de este fósil. El impacto más significativo de estas plantas se debe a las emisiones sólidas, líquidas y gaseosas resultantes de la combustión (Figura 3.2). Estas emisiones incluyen dióxido de azufre y nitrógenos (SO_2 , NO_x), hidrocarburos, monóxido de carbono y dióxido de carbono. La emisión líquida la constituye el agua residual, que es usada en grandes cantidades para enfriar los procesos. Los metales pesados como Fe, Zn, Cu y Pb son

emisiones sólidas que forman parte de las cenizas, permaneciendo suspendidos en el aire o transportados hacia las aguas subterráneas por la lluvia (www.britannica.com).

Además de las emisiones directas, existen componentes secundarios que incluyen ozono formado a partir de óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles (VOCs), compuestos de azufre derivados del dióxido de azufre y lluvia ácida formada a partir de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno. La Tabla 3.1 resume los tipos de emisiones.

Centrales eléctricas de carbón, petróleo y gas natural

Riesgos laborales:

- Accidentes y enfermedades durante la construcción de las minas y las perforaciones del terreno para buscar petróleo
- Accidentes en las líneas de transporte del carbón y petróleo a la planta de energía
- Accidentes durante las operaciones en la planta
- Cáncer por exposición a hidrocarburos cancerígenos

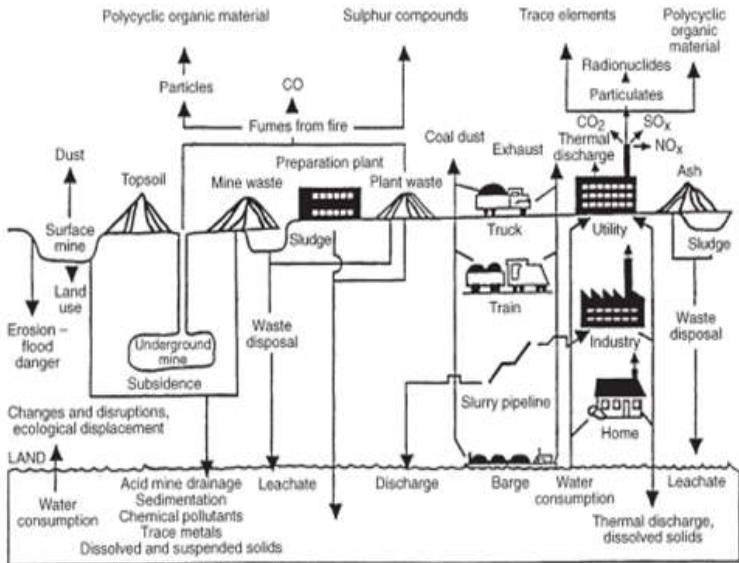


Figura 3.2. Concepto de cadena de combustible (www.britannica.com)

Tabla 3.1. Tipología de impactos resultantes de diferentes descargas (www.britannica.com)

Source of environmental impacts	Human Health		Biological Resources							
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Outdoor air particulates	X	X								

SO2	X	X	X	X				
NOx, nitrate, NO2		X	X	X		X		
toxics, lead, mercury	X	X	X	X	X	X	X	X
<hr/>								
CO	X	X						
CO2	X	X	X	X	X	X	X	X
CFCs	X	X	X	X	X	X	X	X
steam								
Secondary outdoor air								
acid aerosols	X	X						
acid deposition			X	X	X	X	X	
ozone (HCs, VOCs)	X		X	X			X	
Indoor air								
Surface water disposal								
Chemical	X	X	X		X	X	X	
Thermal					X	X		X
Solid waste disposal								

Transportation							X		X
Land use							X		X
Hazardous/PCBs	X	X			X	X		X	
Toxics in ash	X	X			X	X		X	
Construction/operation									
Facility: land use			X	X			X		X
Transmission-land use			X	X			X		X
Explosion/accident	X	X							X
Spills	X	X	X		X	X	X	X	X
Decommissioning							X	X	X
Fuel acquisition									
Extraction	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Processing	X	X	X		X	X	X	X	X
Transportation/storage	X	X	X		X	X	X	X	X

A: mortality; B: morbidity; C: vegetation; D: forests E: fisheries; F:aquatic; G:terrestrial; H:groundwater; I:climate change; J:aesthetics

Riesgos públicos:

- Lesiones y mortalidad durante el transporte de carbón, petróleo y gas
- Efectos negativos debidos a la inhalación de sustancias contaminantes durante la construcción de las minas, las plantas y los campos petrolíferos
- Efectos negativos de la inhalación de contaminantes liberados durante la combustión del carbón, el petróleo y el gas
- Sustancias tóxicas liberadas en forma de desechos sólidos y líquidos
- Incendios y explosiones de petróleo y gas almacenados

Impactos medioambientales:

- Pérdida de terrenos provocados por las actividades mineras a cielo abierto y por la minería subterránea
- Lluvia ácida
- Contaminación del agua debido a los efluentes líquidos de las minas
- Contaminación de agua debido a desechos sólidos y líquidos de la planta de energía
- Pérdida de bosques, cultivos y de regeneración de especies de animales silvestres debido a la absorción de los contaminantes producidos por la planta
- Propagación de los agentes contaminantes provenientes de los depósitos de cenizas
- Calentamiento global debido al CO₂ liberado durante la combustión
- Contaminación del agua provocada por accidentes durante el transporte del petróleo.

3.3 Cambio climático global

Clima: es el promedio de las condiciones climáticas de un lugar en un amplio rango de tiempo y espacio. Los elementos que determinan el clima en una región son la temperatura, el viento, la humedad, la presión del aire y las variaciones a lo largo de los días, meses y años.

Cambio climático: es un cambio en el clima como resultado de las actividades humanas que deterioran directa o indirectamente la composición de la atmósfera y distorsiona el ciclo climático natural observado en períodos de tiempo comparables.

Calentamiento global: es el aumento de las temperaturas promedio del aire cerca de la superficie de la Tierra, que viene siendo analizado desde los últimos dos siglos.

La intensa quema de combustibles fósiles y el aumento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, especialmente el dióxido de carbono, son los responsables del denominado calentamiento global de nuestro planeta.

Los gases que lo provocan son el dióxido de carbono, el metano, el monóxido de carbono, los hidrocarburos y los clorofluorocarbonos. Se afirma que el mayor efecto del calentamiento global es la erosión de los glaciares en los polos, que causaría el aumento del nivel del mar e inundaciones en muchos países. Si el consumo de combustibles fósiles se mantiene de la misma manera, la temperatura en la Tierra aumentará 5 grados en los próximos 50 años, lo que provocaría grandes catástrofes.

El efecto invernadero provocaría mucha evaporación del agua de los ríos y los océanos dando lugar a inundaciones.

3.3.1 Causas del cambio climático

Actividad volcánica: la actividad volcánica libera grandes cantidades de dióxido de azufre y otros aerosoles en la estratosfera. Estos compuestos reducen la transparencia atmosférica y, por lo tanto, la cantidad de radiación solar que llega a la superficie de la Tierra y a la troposfera. La actividad volcánica se puede concentrar de tal manera que los gases como el vapor de agua, la ceniza, el SO₂, CO₂ y el NH₄ podrían cambiar el clima global. Además, el magma de los canales volcánicos encuentra carbono en la superficie de la tierra liberando dióxido de carbono. Este CO₂, que se mezcla en la atmósfera, juega un papel importante en el cambio climático. Como consecuencia de las explosiones de los volcanes, los elementos liberados a la atmósfera también pueden afectar el clima.

Actividad tectónica: con los movimientos tectónicos (movimientos que tienen lugar en la corteza terrestre), el cambio de las formaciones del suelo hace que cambien las corrientes oceánicas y del aire, y pueden suceder cambios climáticos a gran escala. La actividad tectónica influye especialmente en las concentraciones de dióxido de carbono.

Gases de efecto invernadero: son compuestos que se encuentran en la atmósfera y tienen la propiedad de retener el calor, favoreciendo así el efecto invernadero, ya que

pueden absorber la radiación infrarroja emitida desde la superficie de la Tierra y volver a irradiarla a su superficie. Estos gases son el dióxido de carbono (CO_2), clorofluorocarbonos CFC's y halones, metano (CH_4), diazotóxido (N_2O) y ozono (O_3).

Vapor de agua: el calentamiento de la superficie de la tierra y de la atmósfera inferior desencadena la mayor tasa de evaporación del agua de la superficie. En la atmósfera inferior, una mayor concentración de vapor de agua absorbe una gran cantidad de radiación de onda larga y la emite hacia abajo.

Dióxido de carbono: el CO_2 es el gas que almacena más calor en la atmósfera y su concentración depende de la actividad de los volcanes, la combustión y la descomposición natural de la materia orgánica y la respiración de los organismos aeróbicos. El aumento en la cantidad de CO_2 y otros gases que retienen el calor puede conducir a cambios climáticos.

Metano: el metano (CH_4) es el segundo gas de efecto invernadero más importante y también retiene el calor, aunque su tiempo de permanencia en la atmósfera es más corto que el CO_2 . Llega a la atmósfera como resultado de la actividad humana y de los animales.

Nivel de ozono en la superficie y otros compuestos: la cantidad de ozono varía según las latitudes atmosféricas. El ozono superficial (O_3) es el resultado de la contaminación del aire y debe distinguirse del O_3 que se encuentra de forma natural en la estratosfera. Debido al

efecto invernadero, disminuye en la capa estratosférica y aumenta en las áreas cercanas a la tierra. El uso de gases clorofluorocarbonados afecta a la concentración de ozono. Normalmente, la radiación UVB alcanza las capas inferiores de la atmósfera y parte de ella queda atrapada en la superficie de la tierra. Los efectos biológicamente dañinos se observan cuando aumenta la temperatura de la superficie. La variación de las concentraciones de ozono en la atmósfera tiene un impacto en el cambio climático.

Aerosoles: Los aerosoles reflejan y absorben una parte de la radiación solar entrante. Los aerosoles se acumulan fácilmente en la atmósfera en cuestión de días y se propagan por la lluvia, la nieve o por la sedimentación del aire (Figura 3.3).

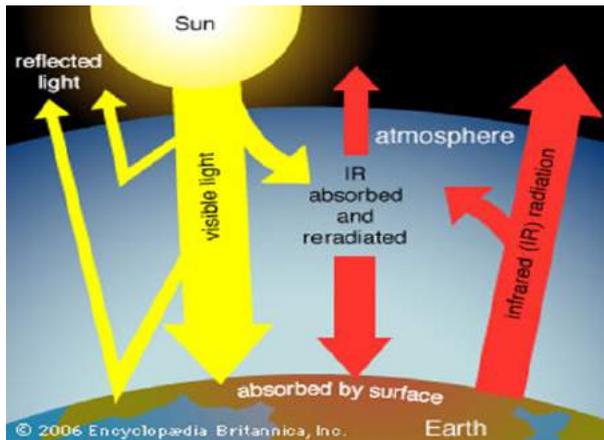


Figura 3.3. Greenhouse effect (www.qa-international.com)

La Tabla 3.2 muestra la línea del tiempo del cambio climático

Table 3.2. Línea del tiempo del cambio climático (www.britannica.com)

Year	Action
1896	Svante Arrhenius construye el primer modelo de cambio climático por influencia del CO ₂ atmosférico
1920-1925	La era del desarrollo del petróleo a gran escala comienza con la apertura de los campos petrolíferos de Texas y el Golfo Pérsico
1957	Roger Revelle and Hans E. Suess escriben “que los seres humanos están llevando a cabo un experimento geofísico a gran escala” en un documento que examina la absorción de CO ₂ en los océanos
1960	La curva desarrolla por el científico del clima estadounidense Charles David Keeling comienza a rastrear la concentración atmosférica de CO ₂
1973	Primera crisis del petróleo
1974	Primera evidencia de sustancias químicas cloradas involucradas en el agotamiento de la capa de ozono
1979	Segunda crisis del petróleo
1980	Curva de Keeling: concentración de CO ₂ = 337 ppm
1990	El primer informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)

	determinan la existencia de un calentamiento en el pasado y un probable calentamiento en el futuro
1992	La conferencia de las Naciones Unidas en Río crea una Convención Marco sobre el Cambio Climático
1997	El Protocolo de Kioto se creó con la intención de limitar las emisiones de los gases de efecto invernadero de los países industrializados
2000	Curva de Keeling: concentración de CO ₂ =367 ppm
2001	El tercer informe del IPCC señala que el calentamiento resultante de las emisiones de GHG es muy probable
2005	El Protocolo de Kioto entra en vigor. Todos los principales países industrializados se registran, excepto E.E.U.U
2006	China se convierte en el mayor emisor de GEI
2007	El cuarto informe del IPCC señala que se están produciendo los efectos del calentamiento global
2011	Canadá se retira del protocolo de Kioto
2014	Curva de Keeling: concentración de CO ₂ =367 ppm
2015	El Acuerdo Climático de París que reemplaza al Protocolo de Kioto está firmado por casi 200 países
2016	El Acuerdo Climático de París entra en vigor

3.2.2 Consecuencias medioambientales del cambio climático

El calentamiento global y el cambio climático tienen el potencial de variar las temperaturas del aire terrestre que influyen en el ecosistema y, por lo tanto, en la biodiversidad de las plantas, los animales y otras formas de vida. Según las previsiones, en Europa a finales del siglo XXI, la temperatura promedio aumentará entre 2.3 a 6.0° C, lo que puede plantear graves riesgos de extinción de una gran parte de las especies vegetales y animales y graves problemas de salud humana (IPCC, 2007). El calentamiento de la superficie en muchas regiones puede provocar cambios incontrolados, como el crecimiento adelantado de hojas en los árboles, crecimiento más temprano de la vegetación, alteración del ciclo de puesta y eclosión de los huevos y cambios en los patrones de migración estacional de aves, peces y otros animales migratorios. En ecosistemas de alta latitud, los cambios en los patrones estacionales del hielo marino amenazan a los depredadores, como los osos polares y las morsas, ambas especies dependen de los ciclos de deshielo para sus actividades de caza.

Obedeciendo al cambio climático, las corrientes de aire y agua cambiarán, influyendo en los ecosistemas, la agricultura y provocando problemas en las infraestructuras. Los efectos del calentamiento global pueden ser contraproducentes a medida que aumenta el nivel del mar, las estaciones cambian y los ecosistemas se deterioran, produciéndose sequías más prolongadas y severas y desertificación en unas regiones y mayor frecuencia de huracanes e inundaciones en otras. Las

temperaturas pueden aumentar en invierno y llegar hasta principios de primavera afectando al retraso en la caída de las hojas y la migración de las aves.

3.3.3 Consecuencias socioeconómicas del cambio climático

Se predice que la cantidad de agua dulce almacenada en los glaciares de montaña y la nieve disminuirá, y así más del 15% de la población mundial no se beneficiará del agua dulce. Además, la temperatura tendrá un impacto negativo en la calidad del agua de lagos y ríos, variando su actividad biológica, lo que conducirá a un acceso aún menor a los recursos hídricos salubres para beber y para la agricultura. Por ejemplo, las aguas más cálidas causan floraciones de algas que pueden representar riesgos para la salud de los humanos.

3.4 Agotamiento de la capa de ozono

La presencia del ozono es abundante en la troposfera y la estratosfera de la atmósfera. El ozono estratosférico, de origen natural, está por encima de los 10-45 km de la superficie de la Tierra constituye el 90% del ozono total de la atmósfera (Figura 3.4). Es de vital importancia porque filtra la radiación ultravioleta dañina proveniente del sol. El ozono troposférico, proveniente de desechos industriales y gases de escape, es de origen humano y se encuentra a unos 10-15 km del suelo, constituye el 10% del ozono total en la atmósfera. El ozono troposférico ocupa el cuarto lugar entre los gases de efecto invernadero que afectan al cambio climático. La radiación de larga longitud de onda permanece en la atmósfera, lo que

provoca un aumento del efecto invernadero, contribuyendo con un 7% al calentamiento global. El ozono, al reaccionar con otras moléculas, provoca daños en la salud humana y en los tejidos vivos de plantas y animales. Los óxidos de nitrógeno (NO_x), una de las fuentes de ozono maligno, están compuestos predominantemente por gases de vehículos de motor (49%), plantas de energía (28%), actividades industriales (13%) y actividades comerciales (5%). El ozono en la estratosfera se produce al romper los enlaces químicos dentro de las moléculas de oxígeno (O_2) por los fotones solares de alta energía mediante un proceso llamado fotodisociación. Los átomos de oxígeno individuales liberados se unen más tarde con las moléculas de oxígeno para formar ozono.

La característica del ozono en la estratosfera es la absorción de los rayos ultravioleta (UV) que afectan negativamente a los seres vivos y la agricultura. La cantidad de ozono en la estratosfera varía de forma natural durante todo el año como resultado de procesos químicos, vientos y otros procesos de transporte que mueven las moléculas de ozono por todo el planeta. El hecho de que la densidad del ozono sea demasiado baja para contener los rayos ultravioletas se *denomina perforación de la capa de ozono* o *agotamiento del ozono*. Como resultado del adelgazamiento de la capa de ozono, la radiación UV-b está aumentando y el sistema inmunitario de las personas se puede dañar, provocando discapacidad visual y cáncer de piel.

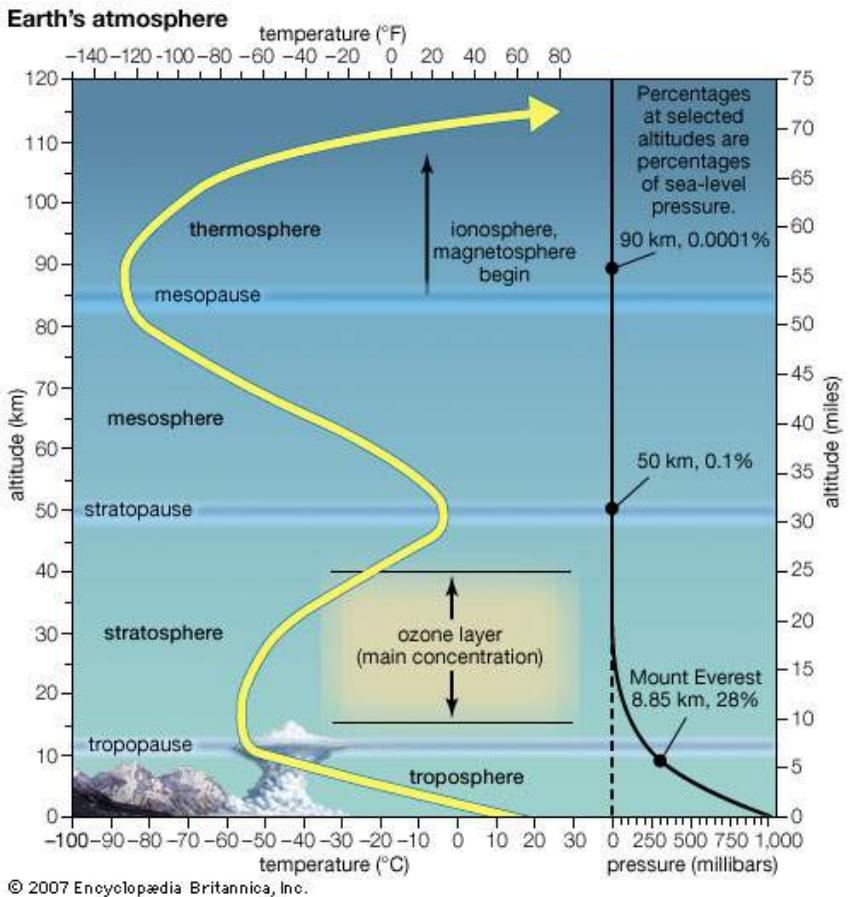


Figura 3.4. Nivel de ozono (<https://www.google.com.tr/search?q=ozone+destruction+mechanism>)

Las actividades humanas han alterado sustancialmente la capa de ozono durante varias décadas. El aumento en la cantidad de cloro y bromo en la estratosfera potencia el agotamiento de la capa de ozono, al eliminar átomos de oxígeno individuales de las moléculas de ozono después

de eliminarlos de los clorofluorocarbonos (CFC) y otros halocarbonos (compuestos de halógeno de carbono) por radiación UV. El agotamiento es tan extenso que los llamados agujeros de ozono se forman sobre los polos durante el inicio de sus respectivas temporadas de primavera. Posteriormente los átomos de cloro reaccionan con el ozono, iniciando un proceso por el cual un sólo átomo de cloro puede causar la conversión de miles de moléculas de ozono a oxígeno (Figura 3.5).

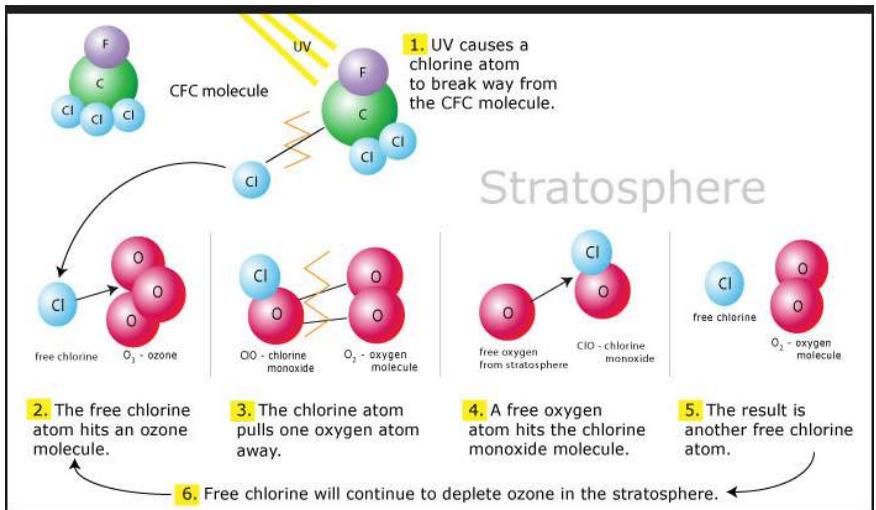
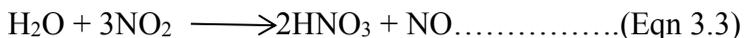
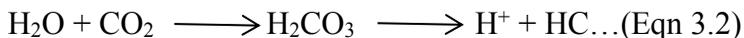


Figure 3.5. Mecanismo de agotamiento del ozono (<https://www.google.com.tr/search?q=ozone+destruction+mechanism>)

3.5 Lluvia ácida

El carbón que se utiliza en las centrales térmicas, los establecimientos de calefacción e industriales emite cenizas atmosféricas (cadmio, acero, plomo), CO_2 y SO_2 . El consumo de carbón y petróleo está aumentando en todo el mundo. El mayor número de vehículos también aumenta el gas de monóxido de carbono en la atmósfera debido al consumo de petróleo. Asimismo, los volcanes aumentan la cantidad de gases como CO_2 y SO_2 en la atmósfera. Estos gases, que causan la contaminación del aire, reaccionan con el agua de la atmósfera (H_2O). El resultado son compuestos ácidos tales como H_2SO_4 (ácido sulfúrico), HNO_3 y HCO_3 (ácido carbónico). (Observar las reacciones en las ecuaciones 1 y 2 respectivamente). El óxido nítrico (NO), que también aumenta la acidez natural del agua de lluvia, se forma durante las tormentas eléctricas por la reacción de nitrógeno y oxígeno. Además de eso, la combustión de aire a alta temperatura sucede en los motores de los automóviles y las plantas de energía producen grandes cantidades de gas NO . En el aire, el NO se oxida a dióxido de nitrógeno (NO_2) y reacciona con agua para dar ácido nítrico (HNO_3) (Ecuación 3). Este tipo de gas cae sobre la tierra en forma de lluvia, nieve o niebla con propiedades ácidas y se denomina lluvia ácida.



La precipitación ácida incluye la deposición seca de partículas ácidas y gases, afectando a los paisajes durante

los períodos secos. El daño de la lluvia ácida no se limita a los bosques, sino que también afecta a los seres vivos, así como a los ferrocarriles, edificios, puentes y restos históricos. Las emisiones de CO₂ resultantes de la combustión de fósiles alcanzó los 0.6 billones de toneladas/año (1990), con un aumento muy importante en los últimos 40 años, hasta los 5.5 billones de toneladas por año (1998).

Como es sabido, las plantas consumen CO₂ durante la fotosíntesis. La lluvia ácida causa la descomposición de la clorofila en las hojas y provoca que la planta se ponga amarilla y seca, contribuyendo al aumento de CO₂ en la atmósfera.

3.5.1 Efectos medioambientales de la lluvia ácida

Los contaminantes atmosféricos se propagan fácilmente con el viento. Por eso, la lluvia ácida puede afectar regiones muy amplias incluso lejos de donde se generan los contaminantes (Figura 3.6). La lluvia ácida es un problema ambiental creciente en todo el mundo, ya que desencadena una serie de reacciones inorgánicas y bioquímicas con efectos medioambientales dañinos, viéndose más afectados los bosques y las zonas agrícolas. Estas lluvias eliminan elementos de la composición del suelo, importantes para el crecimiento de las plantas, como el magnesio y el calcio. Como resultado, los árboles y otras plantas no pueden beneficiarse de los nutrientes necesarios, siendo la pérdida de estos minerales del suelo motivo para matar árboles y dañar cultivos. También se produce la disolución del aluminio en el suelo y evita que

las raíces del árbol puedan absorberlo en la cantidad necesaria.

Otro efecto es la acidificación del citoplasma. Se rompe el equilibrio hídrico de la planta y de los fluidos que viajan desde las estomas a las hojas. En vegetales de hojas verde como las espinacas, el SO_2 forma en la hoja una cubierta fibrosa que ralentiza la fotosíntesis, provocando su muerte. En los árboles, las partes superiores de las ramas debilitadas no ejercen su función de protección de los brotes y las nuevas hojas contra el viento, por lo que no crecen o se secan, impidiendo a los frutos y flores crecer y propagarse. Cuando la lluvia ácida cae sobre el terreno rompe el equilibrio del pH y los microorganismos no pueden llevar a cabo su actividad biológica y sobrevivir (Kızıloğlu T., 1995).

La lluvia ácida que cae en los estanques y ríos, altera la composición del agua, los peces no pueden vivir en un ambiente ácido, y se ve afectada la cadena alimentaria.

La lluvia ácida se mezcla con las aguas subterráneas, superficiales y fuentes de agua potable, los metales pesados son absorbidos por peces y plantas. Como resultado de la ingesta de estos alimentos, en el ser humano surgen enfermedades como el bocio, la úlcera, la bronquitis crónica, el asma y el enfisema. (Kızıloğlu T., 1995).



Figura 3.6. Efecto de la lluvia ácida en Great Smoky Mountains Forest

<https://www.google.com.tr/search?q=Effect+of+acid+rain+on+Great+Smoky+Mountains>

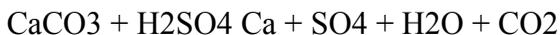
La lluvia ácida causa contaminación de nuestras fuentes de agua. En el caso concreto de lagos que no tengan grandes dimensiones, la proporción de ácido asciende rápidamente cuando caen las lluvias, volviéndose el agua potable a agua no potable. Por lo tanto, los daños ambientales de la lluvia ácida no deben ignorarse, ya que estas lluvias pueden causar la desaparición de los recursos hídricos limpios y potables en el futuro.

Los gases nocivos provenientes de la lluvia ácida causan enfermedades en el sistema respiratorio como bronquitis o asma por la presencia de sulfatos. Al contacto con la piel puede provocar como cáncer.

3.5.2 Efectos de la lluvia ácida en edificios y monumentos

La lluvia ácida tiene propiedades abrasivas. Los edificios históricos y las esculturas sufren erosión y deterioro al contacto con la lluvia. Si el contenido de ácido en la lluvia ácida es alto, incluso las rocas más duras se pueden erosionar. Las obras de piedra de mármol, la cal y el granito, que son formas de carbonato de calcio, se utilizan en la construcción de monumentos y edificios históricos. También se utiliza la arenisca calcárea. El mármol y la piedra caliza están formados por carbonato de calcio (CaCO_3) que difiere solo en su estructura cristalina. Aunque estos materiales son reconocidos como altamente duraderos, los edificios y monumentos al aire libre hechos de mármol y piedra caliza en la actualidad sufren una erosión gradual. Dado que las partículas de arena en la piedra arenisca conviven con un material calcáreo, se observa que las partículas de arena se desprenden con el tiempo debido a la lluvia ácida y al efecto de los contaminantes del aire.

Una reacción química (Ecuación 4) entre el carbonato de calcio y el ácido sulfúrico, que es el componente principal de la lluvia ácida, da como resultado la disolución de CaCO_3 para dar lugar a iones acuosos. Estos iones se eliminan en el flujo de agua (www.chemistry.wustl.edu)



(Ecuación 3.4)

El pH de la lluvia, la duración de la precipitación y la temperatura del medio ambiente son otros factores importantes para la erosión de las obras históricas.

Referencias

IPCC (2007), Climate Change 2007: Informe de síntesis. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, 4to Informe de Evaluación, ISBN 978-92-9169-143-2.

Kızıloğlu, T. (1995) Toprak Mikrobiyolojisi. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Yay. no: 180, Erzurum (en turco).

Página web (2017) recuperada de <http://www.electricaleasy.com/2015/08/thermal-power-plant.html>

Página web (2017) recuperada de www.britannica.com

Página web (2017) obtenida de www.qa-international.com, creado y producido por QA International

Página web (2017) recuperada de www.chemistry.wustl.edu

Página web (2017) recuperada de <https://www.google.com.tr/search?q=ozone+destruction+mechanism>

Página web (2017) recuperada de <https://www.google.com.tr/search?q=Effect+of+acid+rain+on+Great+Smoky+Mountains>

CAPÍTULO 4

CONSIDERACIONES ECOLÓGICAS Y AMBIENTALES DE LAS CENTRALES NUCLEARES

Autores: Feriha YILDIRIM¹ y Gamze YÜCEL İŞILDAR²

¹Gazi University, Institute of Science and Technology,
Environmental Sciences Dept, Ankara-Turkey

e-mail: ferihayildirim@gmail.com

²¹Gazi University, Institute of Science and Technology,
Environmental Sciences Dept, Ankara-Turkey

e-mail: akarakoc@gazi.edu.tr

Resumen: Hoy en día, el aumento de la demanda de energía hace que los países usen combustibles fósiles porque son baratos y de fácil acceso. Sin embargo, los gases de efecto invernadero (especialmente las emisiones de CO₂) causados por los combustibles fósiles han acelerado el cambio climático. Por lo tanto, como fuente de energía alternativa, el número de reactores nucleares (NPR) ha aumentado en los últimos años. La energía nuclear está teniendo un renacimiento como alternativa potencial para la generación de energía eléctrica ya que ha habido una mayor preocupación sobre el calentamiento global. Sin embargo, ha habido aproximadamente 100 accidentes nucleares en los últimos 60 años, y algunos de ellos han tenido un grave impacto en el medio ambiente. En esta línea, las centrales nucleares deben evaluarse con respecto a su impacto ecológico. En este capítulo se verán las ventajas y

desventajas de los NPR en sus diversas etapas: extracción de uranio, enriquecimiento, ciclo del combustible nuclear, procesos en el reactor, eliminación de desechos radiactivos y desmantelamiento del reactor. También se tratarán los conceptos de eficiencia energética, cambio climático, salud pública, la influencia en los ecosistemas y la biodiversidad, el papel de las generaciones futuras y la participación pública como criterios económicos, políticos y sociales para evaluar la viabilidad de la energía nuclear.

Objetivos pedagógicos:

Al final de este capítulo el estudiante será capaz de,

- Conocer las ventajas y desventajas de las NPR
- Conocer los posibles riesgos de las NPR
- La evaluación de los aspectos ecológicos que entrañan las NPR en términos de cambio climático, cantidad de energía obtenida, eficiencia económica, ecosistema, biodiversidad, seguridad, salud comunitaria, derechos de las generaciones futuras y participación de la comunidad.

4.1. Introducción

Hoy en día, la mayoría de la energía que se suministra se basa en combustibles fósiles. Pero los recursos fósiles desaparecerán en un futuro próximo (unos 150 años), además que provocan gases de efecto invernadero causantes del cambio climático, por estas dos razones, existe la necesidad de buscar fuentes de energía alternativas. La mayor parte de la atención se dirige a las fuentes de energía renovables, pero la energía en estas áreas no es sostenible, porque no pueden almacenarse o no son suficientes para el abastecimiento, aún no se ha podido prescindir de la energía nuclear, permaneciendo ésta como una alternativa fuerte a los combustibles fósiles.

Nuclear significa “relacionado con el núcleo”. La energía nuclear es la que sale cuando se produce la reacción en cadena de partículas atómicas. La energía sale como resultado de dos reacciones básicas, la **fusión** y la **fisión**. La energía que sale como resultado de la fisión de sustancias radioactivas pesadas (uranio), debido al bombardeo de neutrones es significativamente grande. El proceso fundamental que se usa en la reacción de fisión de uranio (Figura 4.1).

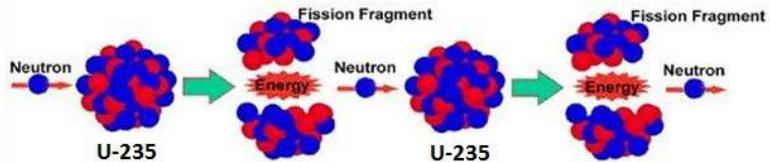


Figura 4.1. Reacción de fisión y reacción en cadena (<http://www.electricalport.com/technical-pole-section/is-nuclear-alternative-what-is-nuclear-energy-/4173#ad-image-0>)

Este término se utilizó por primera vez durante la Segunda Guerra Mundial, cuando comenzó el estudio con las bombas lanzadas sobre las ciudades japonesas de Hiroshima (1945) y Nagasaki (1945). Rutherford, Hans, Strassman, Oppenheimer y Einstein fueron los primeros científicos que estudiaron esta fuente de energía. (Karabulut Y., 1999) Hoy en día, el 10,9% de la electricidad del mundo es producida por centrales nucleares. De acuerdo con la memoria (PRIS) “Información de Reactores de Potencia” de la Agencia Internacional Atómica, 441 plantas de reactores nucleares operan actualmente en 31 países (información a 15-11-2015).

En los 25 años posteriores al accidente nuclear de Chernobyl, la construcción de estas plantas disminuyó mientras que la demanda mundial de electricidad se duplicó con creces. La proporción de energía nuclear en el suministro total de electricidad alcanzó un máximo de apenas el 18% en 1996 antes de caer al 11% en 2014 (Figura 4.2) (<https://www.carbonbrief.org/mapped-the-worlds-nuclear-plantas-de-energía>)

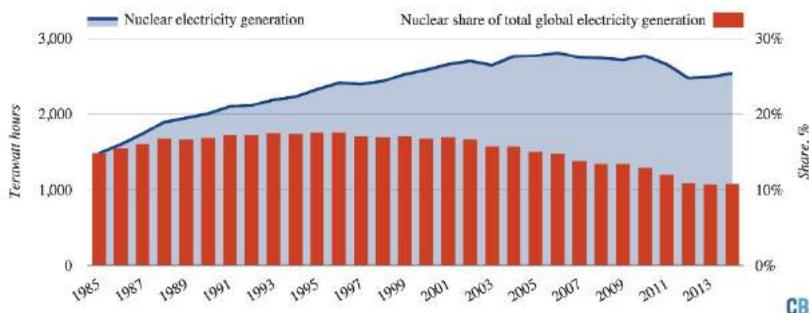


Figura 4.2. Generación de electricidad nuclear mundial (área azul, eje izquierdo) y participación de energía nuclear en la generación total mundial de energía (barras rojas, eje derecho). (BP Statistical Review of World Energy 2015 y Carbon Brief analysis. Chart by Carbon Brief)

Ventajas de la energía nuclear

-No usa combustibles fósiles y no genera gases de efecto invernadero.

-Es más eficiente en comparación con las fuentes de energía renovables

-Proporciona poder estratégico y político para los países (se usa con fines militares además de como fuente de energía)

-Es más estable económicamente hablando, ya que los precios no son tan variables como con los combustibles fósiles

Desventajas de la energía nuclear

- El alto riesgo de radiación que en caso de accidentes causa impactos negativos en seres vivos, incluyendo a los humanos, durante generaciones.

- Problemas para reciclar los residuos radiactivos

- Fuente de energía cara

- Adquiere mucha dependencia externa de la tecnología

- Impacto negativo en el medio ambiente del entorno si la ubicación elegida no es la correcta

- Requiere un largo período de tiempo para comenzar a operar y su período operativo es relativamente corto.

La elección de la energía nuclear es un tema politizado. Pero debido a tragedias humanas que han ocurrido como resultado de desastres nucleares, también se deben tener en cuenta los aspectos de éticos y morales. (Caldicott H., 2014) Por lo tanto, es importante e incluso necesario evaluar las ventajas y desventajas de la energía nuclear considerándola como una relación entre los humanos y la naturaleza, investigando desde el aspecto ecológico y teniendo un punto más holístico.

Para ello es importante examinar las diversas etapas de tratamiento de la fuente de energía: explotación del uranio, su enriquecimiento, la operativa del reactor, la eliminación de desechos y el desmontaje de la planta.

Se han investigado los aspectos arriesgados de las centrales nucleares y, además, se han puesto en tela de juicio una y otra vez los conceptos de "costes" y "seguridad", mientras que se han realizado evaluaciones ecológicas con respecto a los criterios que figuran a continuación:

- a) Eficiencia energética
- b) Cambio climático
- c) Salud humana
- d) Ecosistemas y biodiversidad
- e) Generaciones futuras
- f) Participación pública

Estas evaluaciones tienen en cuenta los requisitos para cumplir con la investigación de "políticas de producción de energía que son más racionales", tal como se especifica en el Informe Extern-E (1995) preparado por el Comité Europeo:

- Análisis de riesgos con respecto a la eliminación y el reciclaje de los desechos nucleares utilizados
- Comparación de las emisiones de dióxido de carbono

- Cálculo de los factores de riesgo de la energía nuclear para poder crear una evaluación de riesgos radiológicos y sus previsiones económicas.

4.2. Riesgos de las centrales nucleares

Cuánto de seguras son las centrales nucleares es actualmente un tema de discusión entre la comunidad científica. Para abordar el tema desde un punto de vista holístico, haciendo una evaluación ecológica de estas plantas, se deben considerar todas las etapas y se deben evaluar todos los riesgos, teniendo en cuenta no sólo los sistemas de producción de energía, sino también el procesamiento de los desechos generados por la explotación de uranio, el almacenamiento y la reutilización del combustible utilizado. Además, hay que considerar los factores de riesgo al cerrar la etapa de producción del reactor, una vez completado su ciclo de vida productivo y tiene que ser desmontado, ya que las plantas, aun siendo “ecológicas” tienen un impacto sobre el medio ambiente que las rodea.

4.2.1. Minería del uranio

Con el fin de convertir el uranio en materia prima, se extraen las rocas que contienen este elemento y se someten a diversos procesos físicos y químicos, obteniéndose una solución que contiene el uranio como elemento. Posteriormente, esta solución se precipita en forma de uranatos. Durante estos procesos, una mínima cantidad de gas sale por escape de las máquinas, produciéndose una pequeña dispersión de radioactividad y contribuyendo al efecto invernadero.

4.2.2. Enriquecimiento de uranio

Después de extraer el mineral uranio, se le somete a un proceso de "enriquecimiento" para que pueda ser utilizado en la planta. Es en esta fase donde surge el interés de algunos países en la fabricación de armas nucleares, pudiendo dar lugar a la fabricación en este tipo de armamento de guerra. En caso de que se usen armas nucleares, las partículas radiactivas se forman y se propagan no solo en esa región, sino en un área geográfica mucho más amplia, donde continúa coexistiendo durante muchos años después.

4.2.3. Operaciones en un reactor

Todas las plantas nucleares mundiales funcionan generalmente sobre la base de la fisión nuclear. El calor que se forma como resultado de esta reacción se transforma en energía. El calor liberado por el sistema hierve el agua que se convierte en vapor. El vapor que se obtiene se envía a una turbina a gran presión. Posteriormente la turbina hace que el generador eléctrico gire y, a medida que avanza, se genera energía. Todos estos procesos tienen lugar en un complejo sistema mecanizado formado por alrededor de 50.000 unidades, que tienen probabilidad de averiarse. Este es un factor de riesgo que puede aumentar la fuga de radiación. (Kurokawa G. y otros, 2011). Por ejemplo, la interrupción de los sistemas de refrigeración y el sobrecalentamiento que se produce como resultado de esto (fusión del núcleo) es una de las amenazas más graves que podrían causar la dispersión de la radiación.

En diversas investigaciones sobre plantas de energía nuclear, el "riesgo de accidente" se considera bajo debido a la alta tecnología y las medidas de seguridad que se toman. Pero se especifica que, en caso de accidente, su impacto podría ser muy grande (Erdösemeci F., 2014). Cuando se producen accidentes en plantas nucleares, se clasifican según una escala del 1 (menos influyente) a 7 (accidentes más influyentes e importantes) (OIEA y OCDE / NEA, 2008). Sin embargo, incluso si se afirma que "el riesgo es bajo", en los 60 años de historia de las centrales nucleares se han producido 99 accidentes en plantas nucleares, dos de ellos han sido "accidentes graves" que alcanzaron el nivel 7, dos de ellos fueron "accidentes graves" con nivel 6, uno de nivel 5, los que comprenden peligros fuera de la instalación (Kurokawa et al, 2011: 13). Los tres accidentes más notorios de "fusión de núcleos" fueron: un accidente a gran escala en Fukushima (Japón) en el año 2011, otro en Chernobyl (Ucrania) en el año 1986, y otro en Pensilvania en el año 1979. El gobierno japonés cerró 50 de los 54 reactores después del accidente de Fukushima, pero aún se consideran operativos por si hubiera que reactivarlos en un futuro próximo, según el OIEA). Del mismo modo, después del accidente que tuvo lugar en Fukushima, Alemania cerró 8 de sus 18 reactores y anunciaron que los restantes se cerrarán en 2022. Después del accidente en Chernobyl en el año 1986, Italia cerró 4 reactores nucleares en su país, mientras que Austria cerró su planta recién establecida sin siquiera usarla.

Además, entre los años 1952 a 2011, los accidentes de fusión nuclear a gran escala tuvieron lugar en 4 plantas nucleares y se produjeron accidentes a menor escala en 10 reactores. También en ocho submarinos propiedad del ejército soviético (1961-1985), se produjeron fugas radioactivas.

4.2.4. Eliminación de los desechos

Los desechos radiactivos se pueden clasificar como de bajo, medio o alto nivel según el grado de radiactividad que tengan (OIEA, 1995). Los de alto nivel representan el 3% del volumen total de todos los desechos radiactivos y tienen un 95% de radiactividad, además de que su vida media es muy larga; p.e. la vida media de Pu 239 es de 24.065 años. La gestión de desechos nucleares podría realizarse en dos etapas:

a) **Reducir su volumen y nivel de radioactividad reprocesándolos y posteriormente almacenándolos:** el reprocesamiento es una tecnología muy costosa y también una amenaza para la seguridad. Por ejemplo, un reactor de 1GW puede producir 240 kg de plutonio y esta cantidad es suficiente para 20 armas nucleares.

En algunos reactores nucleares, el combustible utilizado se almacena en superficie, en un sistema similar al que se muestra en la Figura 4.3. Una vez que el combustible utilizado se ha enfriado, se carga en recipientes especiales. Cada recipiente está diseñado para contener entre 2 y 6 docenas de unidades de combustible gastado, dependiendo del tipo de ensamblaje. El agua y el aire se eliminan. El

recipiente está lleno de gas inerte y sellado (soldado o atornillado).

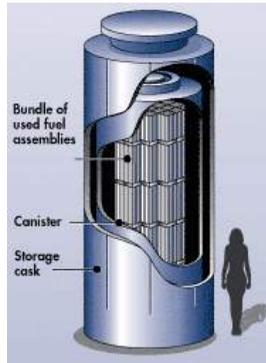


Figura 4.3. Depósitos verticales con estructuras de hormigón o acero (<https://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage/diagram-typical-dry-cask-system.html>)

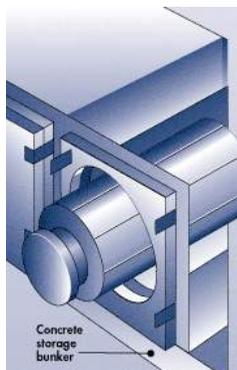


Figura 4.4. Depósitos horizontales (<https://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage/diagram-typical-dry-cask-system.html>)

Algunos depósitos están diseñados para el almacenamiento horizontal en búnkeres sobre el suelo del tamaño aproximado de una plaza de garaje para un automóvil. (Figura 4.4).

b) **Almacenamiento final:** en los países donde hay centrales nucleares, existen recomendaciones y legislación nacional e internacional para el almacenamiento final de los desechos radiactivos que se crean como resultado de la producción energética.

El tema importante con respecto a la eliminación de desechos nucleares es que no hay ninguna instalación de almacenamiento final en el mundo que pueda aceptar los desechos de alto nivel en la etapa operativa porque existe la obligación de que estén fuera de riesgo durante al menos 250.000 años (Altın S. y Kaptan H.Y., 2006). En el mundo, las instalaciones destinadas al almacenamiento de desechos finales de alto nivel están cerrando. Una de las últimas en cerrarse ha sido la que se encuentra en la montaña Yucca en Nevada, en Estados Unidos. En el año 2009 se detuvo el proceso de almacenamiento en esta región y se estableció un comité para crear una respuesta alternativa como solución temporal al problema: la condición de almacenar los desechos radiactivos dentro de la planta durante 20 años. Hoy en día, los desechos radiactivos de alto nivel se almacenan en Carlsbad-Nuevo México, mientras que los desechos radiactivos de bajo nivel se almacenan en las regiones de Barnwell-South Carolina, Richland-Washington, Clive-Utah y OakRidge-Tennessee (World Nuclear Association, 2014).

Encontrar un lugar seguro para almacenar los desechos nucleares aisladamente y de forma que no haya escapes sigue siendo un problema muy importante y no resuelto a nivel mundial, por lo que se transfiere este riesgo a las generaciones futuras.

En este entorno difícil, ha aparecido otro problema relacionado con la exportación de desechos peligrosos. Los países desarrollados entregan sus desechos radiactivos a los países del tercer mundo, donde su fin es incierto, mientras siguen siendo peligrosos tanto para el país de origen como para el país de destino.

4.2.5. Desmantelamiento

Las plantas de energía nuclear generalmente están diseñadas para operar durante 30-40 años, que puede prolongarse hasta un máximo de 60 años mediante su actualización tecnológica. El coste por desmantelar una planta nuclear que ha completado su vida útil puede alcanzar cantidades muy altas y puede aparecer el riesgo de una fuga de radiación. Cuando se completa la vida útil de la planta, el precio por desmontar sus piezas y desecharlas puede representar entre el 10 y el 15% del coste total. Por ejemplo, el coste de desmantelar una planta estándar de 1200 MW en Alemania y convertirla en una zona verde fue de alrededor de 400 millones de euros, lo que representó el 20% del primer coste de inversión. En Francia, el coste del desmantelamiento de una planta nuclear de 900 MWe tenía un 15% del primer coste de inversión. (World Nuclear Association, 2014). Lo destacable de este proceso es que este coste se refleja primero en la

empresa y posteriormente es repercutido indirectamente en la comunidad por parte de la empresa.

4.2.6. Coste

El coste de un sistema de energía nuclear siempre ha sido más alto que el que muestran los políticos e investigadores hasta ahora y "el coste que tiene sobre el impacto en la comunidad y el medio ambiente" no se ha considerado como parte de los cálculos o ha sido descuidado. Los costes de consumo de una planta nuclear que tiene un período de construcción muy largo son tales que el 60% de los mismos están relacionados con la producción, el 20% están relacionados con el combustible y otro 20% están relacionados con trabajos de mantenimiento y reparación. Dentro del coste de la electricidad generada por una planta a lo largo de su vida, salen a la luz detalles tales como la primera inversión, combustible, mantenimiento y reparación, eliminación de desechos y su desactivación a medida que completa su vida útil. Sin embargo, los costes indicados a continuación permanecen ocultos y no se consideran como parte del cálculo:

- Los costes de Investigación y Desarrollo cuando se desarrollan estudios comparativos entre energía y otros sistemas energéticos
- El coste de los problemas que pueden surgir a largo plazo relacionados con la eliminación de los desechos y la desactivación nuclear

- La pérdida del valor de la tierra donde se establecerá la planta de energía y la pérdida en los ingresos provenientes del turismo
- El coste que la radiación puede generar como resultado de un accidente nuclear en las personas, la comunidad y el entorno natural. (P.e. los gastos para el tratamiento de las enfermedades relacionadas con la radiación, la pérdida de mano de obra, la disminución de la producción, el daño que causa a los terrenos agrícolas, los ecosistemas y las fuentes de agua potable contaminadas).

Además de esto, no deben olvidarse otras circunstancias como el coste inicial de inversión que es grande durante el largo período de construcción (10-12 años), mientras que tiene una vida posterior muy corta, entre los 50 y 60 años.

Considerando los altos precios y la producción de residuos radioactivos para las generaciones venideras, se requiere que se cuestione la eficiencia y confiabilidad de una energía que tiene una vida útil tan corta (ExternE, 1995).

4.2.7. Las plantas nucleares como un objetivo en las guerras y el terrorismo

Si los países entran en guerra entre sí, pueden elegir plantas de energía nuclear (si están disponibles) como objetivo para atacar, ya que pueden desencadenar multitud de efectos negativos. Además, en caso de que se produzca un déficit de seguridad, las centrales nucleares pueden convertirse en blancos abiertos para el terrorismo nacional e internacional y el sabotaje.

Como se explicó en la sección sobre las ventajas de la energía nuclear, los reactores nucleares no producen contaminación atmosférica o dióxido de carbono ya que no funcionan a base de combustibles fósiles como otras plantas de producción de energía. Sin embargo, el proceso extracción y purificación de mineral de uranio y su preparación para convertirse en el combustible del reactor requiere una gran cantidad de energía, además las plantas de energía nuclear también requieren grandes cantidades de metal. Si los combustibles fósiles se utilizan para la extracción y purificación de mineral de uranio y también una vez que están establecidas las centrales nucleares, no se puede decir que éstas centrales no sean causantes de parte del cambio climático.

4.3. Evaluación de las centrales nucleares desde la vertiente ecológica

Por un lado, está el problema del calentamiento global y el impacto que sufren las personas y el medio ambiente y, por otro lado, la creciente demanda de energía, por lo tanto, los grandes riesgos que tienen las centrales nucleares (aunque se afirma que son menos) son parte de este dilema y es necesario discutirlo y decidir qué valores son más importantes para las personas con respecto a la ética ambiental o la demanda de energía. A partir de este análisis, se ha construido la Tabla 4.1 y se han evaluado las concepciones que se citan a continuación.

Tabla 4.1: Evaluación de las centrales nucleares desde el aspecto ecológico.

Evaluación desde el punto de vista ecológico

Cambio climático

Como no se produce la emisión de gases de efecto invernadero, estas plantas no contribuyen al cambio climático y las existentes proporcionan una reducción del 17% en las emisiones de los gases de efecto invernadero.

Sin embargo, existe una mayor demanda de energía en el mundo y para satisfacerla se necesitan más centrales nucleares, y cada una de ellas crea riesgos para los ecosistemas.

Si las plantas nucleares se sigue estableciendo, hay que tener en cuenta otros factores importantes (escape de gases, deforestación y pérdida de bienes comunes), factores que si no se eliminan o minimizan no suponen realmente una ayuda

Cantidad de energía

La eficiencia energética es alta, pero se deben tener en cuenta otros factores de riesgo

Eficiencia económica

El conflicto entre los intereses económicos y los aspectos ecológicos hace que estos últimos queden en un plano secundario, desconsiderando la importancia de los daños que se pueden causar

Ecosistema y Biodiversidad

El funcionamiento de los ecosistemas podría verse afectado (bosques, recursos hídricos, recursos alimenticios, cría de animales, etc.). En caso de accidente:

- La dispersión de partículas radiactivas a través del aire, el viento y el agua hace que lleguen a diferentes regiones y países.
- Se acumula radioactividad en la cadena alimentaria
- Se produce una deformación genética permanente en especies vivas, incluidos los humanos.

Residuos

El nivel de radiación en los desechos es significativamente alto y la radioactividad permanece durante cientos de miles de años.

El aislamiento de los desechos de alto nivel de radioactividad es costoso y las deficiencias en la seguridad del almacenamiento pueden dañar los ecosistemas.

Es complejo encontrar ubicaciones seguras e impermeables para almacenar los desechos radioactivos durante cientos de

<p>Seguridad</p>	<p>miles de años sin que dañen la vida y el entorno.</p>
	<p>Además, podría haber la posibilidad que los lugares considerados seguros actualmente sean arriesgados en el futuro debido a terremotos y movimientos tectónicos.</p>
<p>Salud comunitaria</p>	<p>Los errores humanos se pueden producir incluso en las centrales nucleares de nueva generación consideradas muy seguras.</p>
	<p>Los grandes desastres naturales pueden incluso amenazar a las plantas nucleares más seguras.</p>
<p>Generaciones futuras</p>	<p>Para las personas es importante vivir de una forma saludable, formando parte del ecosistema y del entorno en el que habita.</p>
	<p>En referencia a la genética, esto significa que existe riesgo de que los genes puedan verse afectados por la radioactividad.</p>
<p>Generaciones futuras</p>	<p>El riesgo de mutaciones genéticas podría tener un impacto en las generaciones futuras, tanto en la especie humana como en el resto de las especies vivas de la Tierra, incluyendo animales y plantas.</p>
	<p></p>

Participación pública

Las plantas nucleares tienen una influencia importante en las comunidades locales y las regiones cercanas a su ubicación, influyendo, desde un punto de vista ecológico, en los modos de vida tradicionales.

En caso de un accidente, la radiación se propaga en el suelo, el agua y la zona habitada (viviendas, parques...) de la comunidad, afectando de manera irreversible a sus habitantes.

Si bien se están tomando decisiones para establecer y operar plantas de energía nuclear, especialmente en los países en desarrollo, es muy importante tener en consideración el análisis coste-beneficio, las evidencias científicas y las investigaciones sobre el impacto potencial (desde el aspecto ecológico) de esta tecnología, ya que sería. Es mucho más difícil para los países que tienen economías frágiles recuperarse en caso de que se produjera un accidente nuclear. Las mayores ventajas para quienes defienden las centrales nucleares son dos, ya mencionadas: que las emisiones de las plantas no contribuyen positivamente al cambio climático global y que son eficientes desde el punto de vista energético. Además, estas plantas son cada vez más eficaces debido a los avances tecnológicos, reduciéndose el riesgo de accidentes significativamente. (Gamson W.A. y Modigliani A., 1989) (Yıldırım M. y Örnek İ., 2007). Cuando se considera la fuerte influencia del cambio

climático sobre las especies vivas y los ecosistemas, estas características parecen ser positivas. Según el estudio realizado por Pacala y Socolow (2004), la energía nuclear podría ser una opción para reducir la emisión de gases de efecto invernadero a fin de fijar la emisión mundial de dióxido de carbono para el año 2050 (no para reducirla); existe una necesidad de centrales nucleares que generen energía de 700 GW. Sin embargo, de acuerdo con Caldicott H., (2014) aunque existe un plan para reemplazar el 10% de la energía basada en fósiles a través de la energía nuclear en todo el mundo a partir de 2050, también reveló que para entonces se necesitarían establecer casi 100 centrales nucleares. Esto significa que, durante los próximos 36 años, se necesitarían abrir y operar 28 nuevas plantas nucleares. Si el objetivo es reducir la emisión de dióxido de carbono a la mitad utilizando energía nuclear en lugar de seguir utilizando la emisión de dióxido de carbono en el nivel actual, requeriría que el mundo aumentara el número de reactores a 1400. Sin embargo, esta cantidad de plantas de energía nuclear causaría la creación de nuevos desechos y se producirían miles de toneladas de plutonio (como materia prima para armas nucleares).

El 83% de la energía eléctrica que se utiliza durante la etapa de enriquecimiento del combustible que se va a utilizar en una planta de energía nuclear se genera con fuentes de energía no nucleares. Cuando también se considera la energía requerida para extraer y transportar el uranio de la mina, esta relación es aún mayor. Significa que mientras la planta de energía nuclear se está estableciendo para operar, requiere el uso de carbón y otras fuentes de energía no renovables. Además de esto,

mientras no se eliminan otros factores que causan el cambio climático global (especialmente los gases de escape, los incendios que ocurren en bosques y áreas de pastos, etc.), un número creciente de centrales nucleares no creará una solución a este problema. Por el contrario, creará problemas más serios.

Otro punto que se echa en falta en las discusiones sobre plantas nucleares es la dimensión "social", que no se considera suficientemente, aunque se consideran varios factores físicos mientras se toman decisiones con respecto a la eliminación de desechos radiactivos y mientras se realizan análisis de riesgo y modelos) es que la dimensión "social" no se considera suficientemente

Referencias:

Altın, S., y Kaptan, H.Y. (2006). Radyoaktif atıkların oluşumu, etkileri ve yönetimi. En los procedimientos de 12. Mühendislik Dekanlar Konseyi 2. Ulusal Mühendislik Kongresi, Zonguldak.

Caldicott, H. (2014). La energía nuclear no es la respuesta. Nueva York, EE. UU.: La nueva prensa.

Dreicer, M., Tort, V., y Manen, P. (1995). ExternE: Externalidades de la energía Vol 5 Nuclear (EUR - 16524-EN). Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Erdöşemeci, F. (2014). Nükleer güç santrallerinin çevre etiği açısından irdelenmesi (Tesis de M.Sc. inédita). Universidad Gazi, Ankara.

Gamson, W. y Modigliani, A. (1989). Discurso mediático y opinión pública sobre la energía nuclear: un enfoque constructivista. *American Journal of Sociology*. 95 (1), 1-37.

OIEA (1995). La base ambiental y ética de la eliminación geológica de los desechos radiactivos de larga vida "Anexo I.

OIEA y OCDE / NEA (2008). INES (The International Nuclear and Radiological Event Scale) Manuel del usuario.

Karabulut, Y. (1999). Enerji kaynakları, Ankara, Turquía: Ankara Üniversitesi Basımevi.

Kurokawa, G., S. Iyengar, D. Macer, K. Uejima, N. Chairaditkul, A. Dorjderem, S. Gardini, C. Liuying, C. Kuppuswamy, J. Rajan y S. Rao (2011). Ética de la tecnología de la energía nuclear (informe ECCAP WG12). Proyecto de Ética y Cambio Climático en Asia y el Pacífico (ECCAP), Borrador 6.

Pacala, S. y Socolow, R. (2004). Cuñas de estabilización: resolver el problema climático durante los próximos 50 años con las tecnologías actuales. *Ciencia*. 305 (5686), 968-972.

Yıldırım, M., y Örnek, İ. (2007). La mejor elección para la energía: la energía nuclear. *Gaziantep University Journal of Social Sciences*. 6 (1), 32-44.

Página web (2017), recuperada de [http://www.electricalport.com/technical-pole-section/is nuclear alternative-qué es la energía nuclear - / 4173 # ad-image-0](http://www.electricalport.com/technical-pole-section/is-nuclear-alternative-qué-es-la-energía-nuclear-/-/4173#ad-image-0).

Página web (2017), recuperada de [https://www.carbonbrief.org / mapped-the-worlds-nuclear-power-plants](https://www.carbonbrief.org/mapped-the-worlds-nuclear-power-plants)

Página web (2017), recuperada de <https://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage/diagram-typical-dry-cask-system.html>

Página web (2017), obtenida de <http://www.world-nuclear.org/>.

CAPÍTULO 5

LOS SISTEMAS DE ENERGÍA SOLAR Y SUS EFECTOS AMBIENTALES

Autores: Uta Zähringer¹ y Krishna Sthapit²

¹ Renewables Academy AG, Berlín, Alemania

correo electrónico: zaehringer@renac.de

² Renewables Academy AG, Berlín, Alemania

correo electrónico: sthapit@renac.de

Resumen: La energía solar es la energía térmica emitida por el sol a través de la fisión nuclear y la fusión de átomos de hidrógeno en su núcleo y superficie. El uso de energía solar puede clasificarse como directo (p.e. solar térmico o fotovoltaico) o indirecto (p.e. eólico, hidráulico o bioenergético). Este capítulo hablará sólo del uso directo: tecnología solar térmica y solar fotovoltaica. La primera parte del capítulo se centra en los aspectos tecnológicos y los componentes de las aplicaciones de energía solar. En comparación con las plantas de energía convencionales, la energía producida a partir de la tecnología de energía renovable tiene menos emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, hay algunos impactos ambientales a lo largo de las cadenas de valor o los proyectos de energía solar. Algunos de ellos se describen en la segunda parte de este capítulo.

Objetivos de aprendizaje:

Al final de este capítulo el estudiante será capaz de,

- Conocer los conceptos relacionados con la energía solar
- Evaluar los impactos ambientales de las tecnologías de energía solar a lo largo de su ciclo de vida.

5.1. Aspectos tecnológicos en los sistemas de generación de energía solar

La energía solar es la energía térmica emitida por el sol a través de la fisión nuclear y la fusión de átomos de hidrógeno en el núcleo del sol y en su superficie. El sol proporciona a la tierra una tremenda cantidad de energía que hace posible la vida tal y como la conocemos. Esta energía entrante se refleja, difunde, absorbe y se vuelve a irradiar por partículas y grupos de moléculas en la atmósfera y en la superficie de la tierra y los océanos. Esto a su vez provoca vientos, corrientes oceánicas, evaporación, condensación, lluvias y regulación de la temperatura de la superficie terrestre. Plantas y árboles convierten la energía lumínica en energía química a través del proceso de fotosíntesis, creando biomasa.

La utilización de la energía solar puede clasificarse como directa, como lo son las energías térmicas, solar o fotovoltaica e indirecta, como las energías eólicas, hidroeléctrica o la bioenergía. Este capítulo sólo tratará el uso directo.

Las tecnologías de uso directo de la energía solar son:

Sistemas solares térmicos que utilizan la energía solar para producir agua caliente destinada a una amplia gama de consumidores, como hogares particulares, hoteles,

hospitales o procesos industriales. También se pueden utilizar en aplicaciones de calefacción o refrigeración.

Plantas de energía solar por concentración (CSP): concentran la energía solar a través de espejos para generar altas temperaturas que producen vapor con el fin de impulsar turbinas para generar electricidad. Es una tecnología solar térmica para la generación de electricidad.

Sistemas fotovoltaicos (PV): convierten la energía solar directamente en electricidad mediante el efecto fotoeléctrico.

5.1.1. Energía solar térmica

La conversión de la radiación solar en calor se llama *energía solar térmica*. Esta energía tiene la más alta eficiencia de todas las provenientes de la energía solar. Se puede utilizar para el suministro de agua caliente sanitaria, la calefacción de locales, procesos térmicos o incluso para la refrigeración.

5.1.1.1. Componentes de una instalación solar térmica

Captador

El corazón de un sistema solar térmico es el captador. Está hecho de una lámina metálica altamente conductora, preferiblemente de cobre. Por razones económicas, el aluminio se utiliza cada vez más porque cuesta menos que el cobre y también es un buen conductor. La superficie se cubre con la capa captadora de la radiación que convierte la luz en calor, que es conducido a través del metal a

canales en los cuales circula un fluido de transferencia de calor, transferido por convección, el fluido caliente se transporta al lugar donde se utiliza o puede almacenarse. Este fluido es agua o una mezcla de agua y anticongelante, también se puede utilizar aire (Figura 5.1).

Colector

Si se requieren temperaturas más altas para el suministro de agua caliente sanitaria, el captador debe estar cubierto y aislado para impedir la pérdida de calor.

Hay dos tipos de colectores: placa plana y tubo de vacío. En el colector de placas planas, se coloca una tapa de vidrio a unos pocos centímetros por encima del captador que permite la radiación solar, pero reduce las pérdidas de calor por convección (efecto invernadero). La luz penetra a través de la cubierta de vidrio y se convierte en calor en el captador. El aislamiento de fibra mineral o espuma se instala en la parte posterior y en los lados del colector para minimizar las pérdidas por conducción y convección y atrapar el calor en el interior.

Los colectores de tubos de vacío tienen una alta eficiencia debido a sus propiedades aislantes. Consiste en un tubo de vidrio evacuado en el que se inserta una banda absorbente con un recubrimiento selectivo. Un tubo coaxial corre a lo largo de la parte inferior de la tira absorbente. Dentro de ese tubo, el fluido de transferencia de calor fluye a través del tubo interior y vuelve a subir por el tubo exterior donde recoge el calor de la tira absorbente. El tubo está sellado con una tapa metálica. El absorbente coaxial penetra en

esta tapa y se abre en un tubo colector, este colector es de flujo directo.

Almacenamiento térmico

Hay momentos en los que los niveles de radiación solar no son lo suficientemente altos para satisfacer la demanda, en otros hay demasiada radiación solar; ambas situaciones requieren de un acumulador térmico en el sistema. El agua se utiliza habitualmente como medio de almacenamiento térmico por varias razones: tiene una capacidad calorífica específica muy alta, no presenta riesgos para la salud y está disponible en casi todas partes. Los acumuladores de agua caliente sanitaria se utilizan para el suministro doméstico.

Los depósitos para calefacción son de almacenamiento intermedio. Contienen un circuito cerrado de circulación de agua no potable. Los depósitos combinados son intermedios y llevan un acumulador de agua caliente integrado en el depósito o bien un serpentín calefactor de agua caliente integrado.

El depósito acumulador es de acero esmaltado, acero inoxidable o cobre dependiendo de la aplicación. Los cilindros no presurizados (o con ventilación abierta) se fabrican cada vez más a partir de plástico, formando una película plástica o reforzada con fibra de vidrio.

El aislamiento térmico del depósito es muy importante para reducir las pérdidas térmicas en la medida de lo posible y para mantener la eficiencia global del sistema.

Bombas

En los sistemas de circulación forzada, las bombas se utilizan para mover el fluido de transferencia de calor alrededor del sistema. Se puede utilizar el mismo tipo de bomba que en un sistema de calefacción convencional. Sin embargo, las especificaciones de las bombas para sistemas solares térmicos es algo diferente. En los sistemas de calefacción convencionales se requiere una bomba de alto caudal y baja pérdida de presión. Para las instalaciones solares térmicas se requiere una bomba de alta presión y bajo caudal, es decir, una bomba con una curva de rendimiento diferente.

Recipiente de expansión

En los sistemas sellados, un recipiente de expansión absorbe la expansión del fluido que se produce debido al cambio de la temperatura de éste. Los recipientes de expansión para sistemas de calefacción convencionales pueden utilizarse, en principio, en instalaciones termosolares. Sin embargo, si se está usando anticongelante, la membrana del vaso de expansión debe ser resistente a esto. Además, deben tomarse medidas para evitar que la membrana se exponga a altas temperaturas durante períodos de estancamiento.

Otros componentes

El fluido se expande cuando se calienta y puede producir alta presión. Por lo tanto, debe incorporarse una válvula de seguridad en un sistema sellado para liberar presión en caso de que la del sistema aumente a niveles inseguros. Tal aumento de presión puede ocurrir cuando, por ejemplo, otro componente del sistema, como el recipiente de

expansión, falla. La válvula de seguridad está dimensionada de la misma manera que en un sistema sellado convencional.

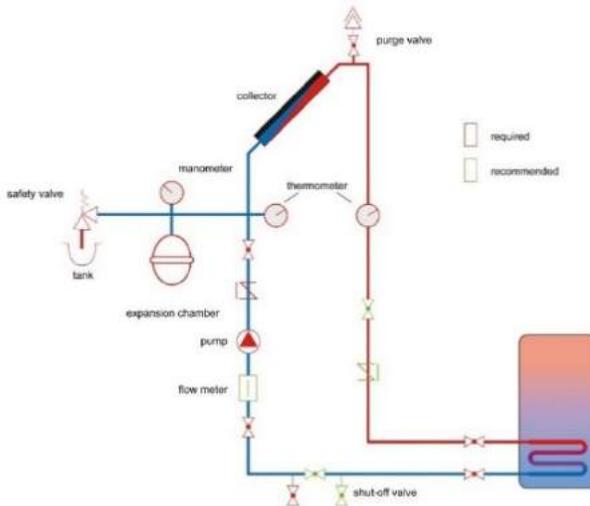


Figura 5.1. Componentes del sistema solar térmico, sistema de circulación forzada (Fuente: RENAC)

5.1.2. Energía solar de concentración (CSP)

La tecnología de energía solar concentrada (CSP) concentra la radiación solar para lograr altas temperaturas en el rango de 290 – 1000° C. Esta energía térmica se utiliza directamente en procesos de aplicación de calor solar o se convierte en electricidad a través de turbinas de vapor.

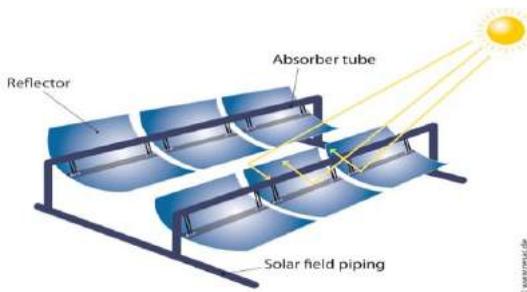
Los CSP requieren niveles muy altos de radiación solar directa, por lo que las ubicaciones geográficas para su implementación son limitadas. Los principales tipos de

CSP son: colectores cilindro-parabólicos, la torre solar, el reflector lineal Fresnel y el plato parabólico.

5.1.2.1. Componentes de un CSP solar

Colectores cilindro-parabólicos

La radiación solar se refleja desde el canal parabólico hacia un receptor de tubo de vacío que recorre la longitud del canal (Figura 5.2). Los colectores parabólicos se instalan a unos 8 m sobre el nivel del suelo, alineados de norte a sur. El receptor del tubo de vacío contiene un fluido de transferencia de calor que es calentado por la radiación solar concentrada y suministra el calor a un intercambiador en una planta de vapor convencional, el agua del otro lado del intercambiador se convierte en vapor que impulsa una turbina para generar electricidad.



Esta tecnología se denomina "centrada en puntos". Los helióstatos están equipados con un sistema de seguimiento de dos ejes con motor dual. Se disponen alrededor del receptor central configurados de manera circundante al campo de actuación (normalmente para plantas más grandes con capacidades de 100 MW) o en la configurados hacia el norte (normalmente para plantas más pequeñas con capacidades de 20 MW) (Figura 5.3). La radiación solar reflejada en el receptor central de la torre convierte el agua en vapor sobrecalentado que se utiliza para impulsar una turbina de vapor y generar electricidad.

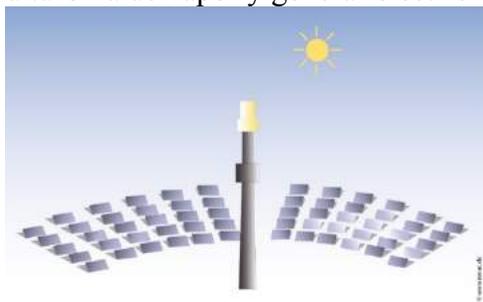


Figura 5.3. Funcionamiento de una torre solar (Fuente: RENAC)

Reflector Frensel

Es una tecnología de "enfoque lineal". Los reflectores de Fresnel lineales (RLF) se aproximan a la forma de los colectores parabólicos con tiras largas y espejadas que reflejan la radiación solar en un tubo receptor fijo orientado hacia abajo que recorre la longitud del reflector (Figura 5.4). Las tiras reflectoras siguen la trayectoria del sol de este a oeste mientras que el tubo receptor permanece en una posición fija. Un reflector secundario que rodea el

tubo receptor refleja cualquier radiación desenfocada de nuevo en el tubo.

Los sistemas LFR calientan el agua que circula a través de los receptores para generar vapor a unos 270°C (Generación Directa de Vapor - GDS), eliminando la necesidad de fluidos sintéticos de transferencia de calor e intercambiadores. Esto y el menor coste de fabricación e instalación de los espejos, hace que los sistemas RLF sean menos costosos que los sistemas cilindro-parabólicos.

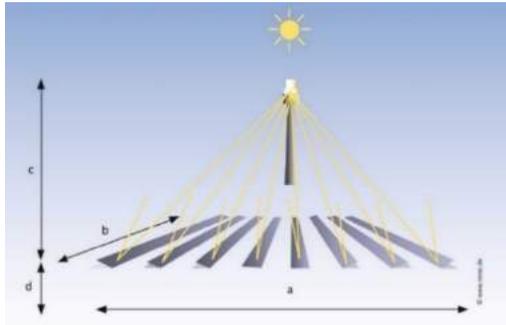


Figura 5.4. Funcionamiento de un colector lineal Fresnel (Fuente: RENAC)

Plato

El reflector de plato concentra la radiación solar en un receptor situado en el punto focal del plato: tecnología de *enfoque puntual*. El receptor se calienta a unos 750°C y acciona un pequeño pistón, un motor Stirling o una micro turbina acoplada al receptor para generar electricidad directamente en el plato (Figura 5.5). El plato sigue al sol durante todo el día. Los tamaños de platos varían entre 5 y

25 kW. La alta concentración solar y las altas temperaturas de funcionamiento han permitido a los sistemas de placas alcanzar eficiencias de conversión de energía solar a eléctrica de hasta un 30%

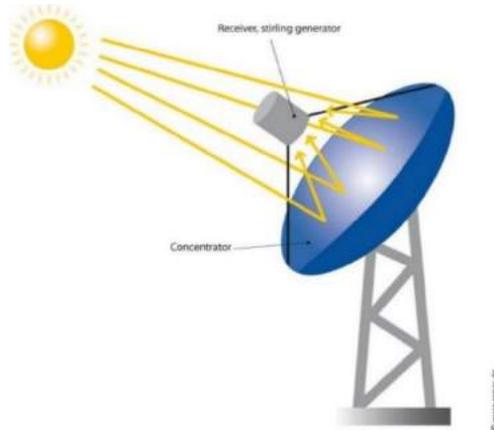


Figura 5.5. Funcionamiento de un colector de platos. El plato sigue al sol durante todo el día (Fuente: RENAC)

5.1.3. Solar PV

Existen dos topologías básicas de sistemas fotovoltaicos: sistemas conectados a la red y sistemas fuera de la red. Un sistema fotovoltaico conectado a la red consiste básicamente en un generador fotovoltaico acoplado a un inversor que opera en paralelo con la red eléctrica convencional. El concepto de inyección a la red tiene un amplio margen de aplicaciones, desde pequeños sistemas de pocos kilowatios (kWp) de potencia instalada hasta centrales de varios megawatios (MWp). Los sistemas fotovoltaicos fuera de la red pueden aplicarse en muchas áreas donde no hay conexión a la red para bombeo de agua

para riego o consumo humano, sistemas solares domésticos (SHS) para hogares de zonas rurales o países en desarrollo, antenas de comunicación y estaciones de telemetría, etc.

La Figura 5.7. muestra los componentes fundamentales de ambos sistemas.

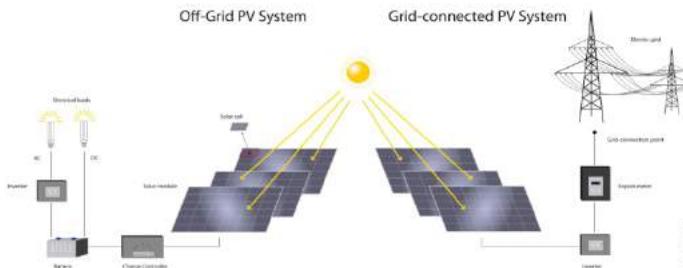


Figura 5.6. Descripción general de un sistema PV sin conexión a la red

Células solares

Las células c-Si monocristalinas y multicristalinas son dispositivos con espesores que varían entre 100 y 250 μm y tamaños de 4 a 6 pulgadas. Se obtienen a partir de fundir de silicio por diferentes métodos, se condensan en bloques y luego se cortan con una sierra de hilo. Debido a la necesidad de una pureza muy alta, se consume mucha energía durante el proceso de fabricación, ya que los procesos de alta temperatura son necesarios para eliminar los defectos. Los contactos eléctricos en ambos lados son depositados por impresión. Las células son depositadas en una porción de vidrio que se prepara previamente con un láser. La energía consumida para la fabricación de láminas delgadas es mucho menor que para las células solares c-Si

porque la deposición es un proceso a baja temperatura. El proceso de fabricación es más rápido y barato pero la eficiencia es menor.

5.1.3.1. Componentes de un sistema solar fotovoltaico

Módulos solares

Están compuestos por varias células solares conectadas en serie y en paralelo para obtener la potencia final deseada. El número de células varía entre 36 y 72. Están conectadas eléctricamente y se insertan entre dos capas transparentes muy delgadas de material de encapsulación a prueba de vapor hechas de acetato de etileno y vinilo o EVA. Se colocan sobre una lámina posterior reflectante hecha de fluoruro de polivinilo y se sellan con una cubierta de vidrio en un marco de aluminio.

Inversores

Los inversores transforman la corriente continua (DC) en corriente alterna (AC) y regulan la tensión y la frecuencia. Hay dos tipos de inversores: monofásicos y trifásicos. Los monofásicos suministran CA a una fase de una línea de transmisión de potencia, mientras que los trifásicos suministran CA a las tres fases de una línea de transmisión de potencia. Los sistemas pequeños, normalmente por debajo de 5 kWp, suelen utilizar inversores monofásicos porque una línea es suficiente para absorber la potencia suministrada por un sistema fotovoltaico.

5.2. Impactos ambientales de los sistemas de energía solar

En comparación con las centrales eléctricas convencionales, la energía producida a partir de la tecnología de energía renovable (RET) produce menos emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Por otra parte, si consideramos el ciclo de vida completo de una RET, los impactos sobre el medio ambiente no pueden ser supervisados.

La Figura 5.8 representa las entradas y salidas en el ciclo de vida de los proyectos de energía renovable.

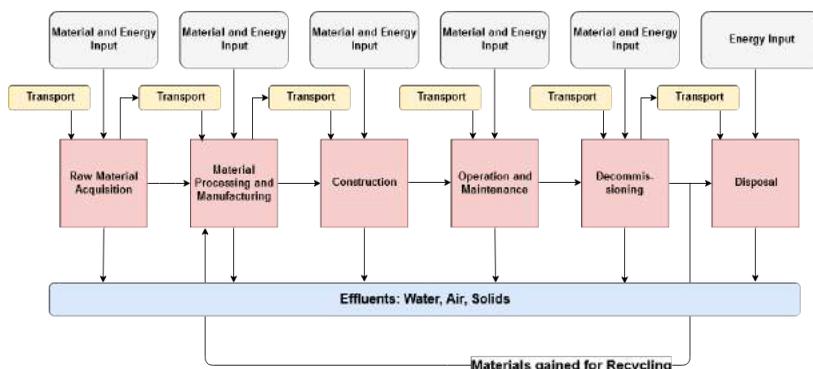


Figura 5.7. Ciclo de vida general de las tecnologías de energías renovables (Corona, Cerrajero, López, & San Miguel, 2016) (Fthenakis & Kim, 2011); representación propia.

Un método para determinar el impacto ambiental total de un producto durante todo su ciclo de vida se conoce como *Evaluación del Ciclo de Vida* (ACV) y se utiliza para representar el alcance de los impactos ambientales.

Un EIA es un Estudio de Impacto Ambiental realizado para evaluar los impactos potenciales de una planta energética. En una EIA y un ACV, los impactos se clasifican según la naturaleza y el tipo de emisiones. Las categorías también pueden variar según el país y las instituciones. En este capítulo, los impactos no están categorizados. En los capítulos 5 y 6¹ se presentan los potenciales impactos.

Las dos primeras fases de un ciclo de vida son la extracción de materia prima y la fabricación, durante las que se producen una serie de impactos sobre el medio ambiente. Los factores que influyen en la gravedad de los impactos se basan en el tipo de extracción de la materia prima y la tecnología utilizada para ello. Del mismo modo, durante la fase de transformación de los materiales se producen diversos en función de la naturaleza del material.

Por ejemplo, durante la extracción de hierro puro², se utilizan diferentes tecnologías en el proceso de separación. Dependiendo de ellas, se producen distintos tipos y cantidades de residuos que pueden dañar directa o indirectamente el medio ambiente. En el proceso de fabricación, la materia prima se utiliza para dar lugar a nuevos productos, utilizándose tecnologías energéticamente intensivas que, en última instancia,

¹ Para más información y referencias consultar estos capítulos.

² El mineral de hierro es un tipo de roca que contiene inscrustaciones de este elemento.

contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero y a la producción de residuos.

Más adelante se expone información de los diferentes impactos en diversas tablas durante las fases de construcción, operación y desmantelamiento, que son las que estudia un EIA.

5.2.1 Impactos ambientales de la energía solar

La tecnología termosolar de pequeña escala se utiliza principalmente para calentar agua para uso doméstico y se instala sobre todo en el tejado de un edificio residencial. Según el estudio "Impactos ambientales del sector energético", durante la fase de operación prevalecen dos impactos ambientales específicos:

Impacto visual: La energía solar térmica en las azoteas de los hogares residenciales podría causar impactos visuales en la estética del edificio (Tsoutsos, Frantzeskaki y Gekas, 2005). El reflejo del espejo de cristal también podría ser un posible impacto para los residentes.

Producción de residuos: Dependiendo de las instalaciones, se usan diferentes tipos de refrigerantes, a base de agua, anticongelantes o inhibidores de oxidación en los sistemas indirectos. Estos fluidos pueden contener glicol, nitratos, nitritos, cromatos, sulfitos y sulfatos o sustancias más complejas como alcoholes aromáticos, aceites, clorofluorocarburos (CFCs), etc., Estos fluidos también se utilizan en aplicaciones a temperaturas más altas y pueden contaminar el agua, por lo que deben

eliminarse adecuadamente y manipularse cuidadosamente durante el funcionamiento, para evitar cualquier fuga y, en consecuencia, causar contaminación del agua. (Tsoutsos, Frantzeskaki y Gekas, 2005). A continuación, presentamos una visión general de los posibles impactos ambientales del uso de instalaciones termosolares a pequeña escala.

Tabla 5.1. Impactos ambientales de la tecnología termosolar de pequeña escala utilizada para la calefacción.

Raw material acquisition	Manufacturing	Construction	Operation	Decommission
Biodiversity loss	Water stress	Waste production	Visual Impact	Waste production
Habitat loss	Waste Production	Air pollution	Waste production	Air pollution
Toxic-effluents				
Waste production				
Depletion of natural resources				
CO ₂ and other GHG gas emissions				
Noise Pollution (except in operation phase)				

5.2.2 Impactos ambientales de la energía solar concentrada

Los impactos ambientales de una planta termosolar están incluidos en (Wu, et al., 2014).

Tabla 5.2. Impactos ambientales de la energía solar concentrada.

Raw material acquisition	Manufacturing	Construction	Operation	Decommission
Biodiversity loss Habitat loss Toxic-effluents Waste production Depletion of natural resources	Water stress and pollution Waste production	Biodiversity loss Erosion Water and soil pollution Air pollution	Over consumption of water Visual Impact Soil Temperature decrease Waste production	Dust production Waste production
CO ₂ and other GHG gas emissions				
Noise Pollution				

- **Consumo de agua:** CSP consume la mayor cantidad de agua por unidad de electricidad en comparación con las plantas fotovoltaicas y eólicas. En una planta termosolar que utiliza la tecnología húmeda para la refrigeración de vapor del generador de electricidad, se consume más agua en comparación con la tecnología de refrigeración por aire seco. El agua no sólo se utiliza para el enfriamiento, sino también para limpiar los espejos, ya que la mayoría de las plantas termosolares se construyen en zonas semiáridas donde hay alta radiación solar y polvo en suspensión. Para reducir la

pérdida de agua se debe implementar un sistema eficiente de recogida y reutilización del agua.

- **Disminución de la temperatura del suelo:** Debido a las sombras y al flujo de aire alterado de los paneles espejo en las plantas CSP, el cambio de temperatura del suelo se midió entre 0,5 y 4°C en un estudio de Wu, Z. et al. Tales cambios de temperatura podrían afectar a las áreas de las plantas termosolares que se combinan con cultivos en crecimiento. Este cambio de temperatura podría afectar especialmente a las plantas sensibles a la temperatura del terreno. (Wu, et al., 2014).
- **Producción de residuos:** En el funcionamiento de una planta termo solar se producen diferentes residuos peligrosos y no peligrosos. En un estudio de ACWA POWER sobre el impacto ambiental y social específico de la planta CSP Plant, los residuos peligrosos producidos durante el funcionamiento son los lodos procedentes de los procesos de tratamiento de las aguas residuales y los aceites usados: lodos oleosos, trapos oleosos, productos químicos, disolventes del mantenimiento general de la maquinaria de la planta, tambores químicos y combustibles usados o terreno contaminado por vertidos y fugas. Estos residuos deben eliminarse adecuadamente, ya que de lo contrario pueden causar daños a la salud humana y al medio ambiente. (ACWA Power, 2015).

5.2.2.1. Sistemas fotovoltaicos

Durante el ciclo de vida de los sistemas fotovoltaicos se pueden observar los siguientes impactos ambientales.

Tabla 5.3. Efectos ambientales de la energía fotovoltaica en su ciclo de vida (Hernandez, et al.,2014), representación propia

Raw material acquisition	Manufacturing	Construction	Operation	Decommission
Biodiversity loss Habitat loss Waste production Depletion of natural resources	Water stress and pollution Waste production	Biodiversity loss Erosion Water and soil pollution Land use and land coverage change Earth movement by transport movements	Change in microclimate and local hydrology Visual impacts Change in land surface temperature and atmospheric boundary conditions	Dust production Waste production
CO ₂ and other GHG gas emissions from other utilities such as vehicles for transport occur				
Noise Pollution				

- **Pérdida de biodiversidad, erosión del suelo y cambios en el uso de la tierra:** Los sistemas fotovoltaicos para el servicio público requieren una zona amplia terreno, se eliminan la vegetación y se nivela el suelo para su instalación, lo que provoca pérdida de hábitat y biodiversidad y erosión del suelo.

- **Impacto ecológico de las líneas de transmisión y corredores:** Para un sistema fotovoltaico público se construyen líneas y corredores de transmisión conectados a la red, que utilizan mucha energía y materiales, que inciden en los bosques cercanos.
- **Producción de residuos:** En cada fase del ciclo de vida fotovoltaico se producen residuos. Por ejemplo, tras el cierre, es importante reciclar los sistemas fotovoltaicos cuidadosamente, ya que contienen materiales tóxicos como cadmio, arsénico y polvo de sílice, que si se inhala puede causar enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) (Hnizdo y Vallathan, 2003).
- **Emisiones de Gases de Efecto Invernadero:** En el ciclo de vida de un sistema FV las emisiones se dan tanto durante la adquisición de la materia prima como durante las fases operativas y de mantenimiento.
- **Consumo de agua:** con el fin de mantener la eficacia de los sistemas fotovoltaicos, durante la fase de operación y mantenimiento se utiliza agua para limpiar el polvo en suspensión y el depositado en los paneles. En zonas semiáridas, donde el agua escasea, un alto consumo de la misma es contraproducente para el entorno natural cercano y sus habitantes.

La Tabla 4 muestra la cantidad de agua consumida por unidad de electricidad en las dos fases. Podemos ver que la energía fotovoltaica en comparación con la CSP y el

viento consume menos agua por TJh de electricidad producida.

Tabla 5.4. Huella hídrica (WF) por unidad de electricidad de diferentes fuentes de energía. Los valores entre paréntesis representan la media (Mekonnen, Gerbens-Leenes, & Hoekstra, 2015)

Energy Source	Construction	Operation	Total
	WF (m ³ TJh ⁻¹)	WF (m ³ TJh ⁻¹)	WF (m ³ TJh ⁻¹)
Concentrated Solar Power	84 – 179 (169)	34 – 2000 (559)	118 - 2180
Photovoltaics	5.3 – 221 (86)	1.1 – 82 (19)	6.4 - 303
Wind	0.10 – 9.5(1)	0.1 – 2.1 (0.2)	0.2 - 12

Resumen

De las tres tecnologías solares vistas se han expuesto los diferentes impactos ambientales desde la fase de construcción hasta el desmantelamiento; lo que da una visión general de los factores que afectan al medio ambiente y las medidas a considerar para mitigar esos efectos durante la fase de ejecución de los proyectos de energía renovable. Existen bastantes similitudes y también diferencias en los impactos sobre el medio ambiente (Figura 5.8). Es responsabilidad del promotor del proyecto buscar un diseño tecnologías solares de bajo impacto.

En la Figura 5.8 se comparan los impactos ambientales entre las tres tecnologías generadoras de electricidad CSP, Fotovoltaica y Eólica durante su ciclo de vida, atendiendo a tres categorías que tienen en cuenta desde la adquisición de la materia prima hasta el desmantelamiento de la instalación. Esta figura proporciona una visión general de los tipos de tecnologías y, dentro de cada una, de los tipos de materiales y sistemas utilizados que tienen diferentes grados de impacto sobre el medio ambiente. Por ejemplo, las FV fabricadas con seleniuro de cobre e indio galio selenio (CIGS) montado en el techo y las FV CIGS montadas en el suelo tienen diferentes grados de impacto en todas las categorías. Comparando las tecnologías que se refieren sólo a estas tres categorías, podríamos ver que la de la energía eólica tiene el menor impacto. En el capítulo 6 se discutirá más detalladamente la tecnología eólica y sus impactos ambientales.

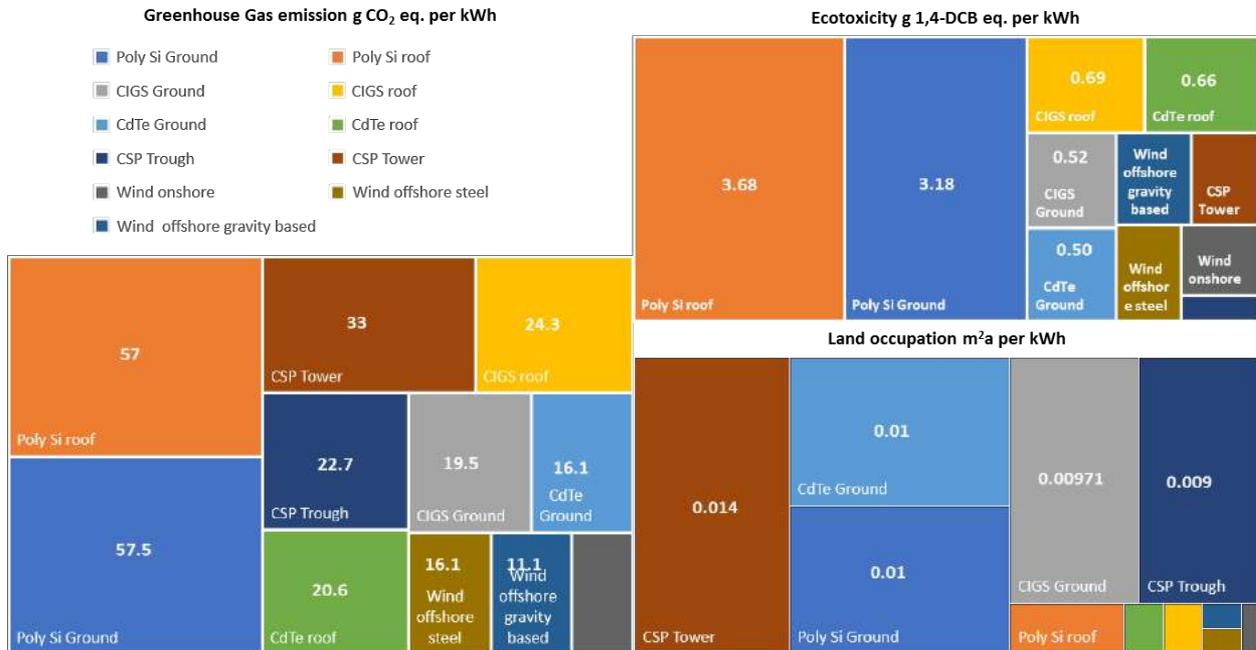


Figura 5.8. Impactos medioambientales: fotovoltaica, energía solar concentrada y energía eólica, por kWh de electricidad producida (Polycrystalline Silicon (Poly Si), Copper Indium Gallium Selenide (CIGS), Cadmium Telluride (CdTe) (Hertwich, et al., 2014) eq. = equivalent, CFC = Chlorofluorocarbon, DCB = Dichlorobenzene, m²a = square meter year

Referencias:

ACWA Power. (2015). *Specific Environment and Social Impact Assessment*. Ouarzazate Morocco. Retrieved July 14, 2017, from <http://documents.worldbank.org/curated/en/618461468274482428/pdf/E44890V90P131200Box391417B00PUBLIC0.pdf>

Corona, B., Cerrajero, E., López, D., & San Miguel, G. (2016, June 29). Full environmental life cycle cost analysis of concentrating solar power technology: Contribution of externalities to overall energy costs. *Elsevier*, 135, pp. 758 - 768. doi:10.1016/j.solener.2016.06.059

Fthenakis, V., & Kim, H. (2011, February 23). Photovoltaics: Life-cycle analyses. *Solar Energy*, 85, pp. 1609 - 1628. doi:10.1016/j.solener.2009.10.002

Hernandez, R. R., Easter, S. B., Murphy-Mariscal, M. L., Maestre, F. T., Tavassoli, M., Allen, E. B., . . . Allen, M. F. (2014, August 11). Environmental Impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, pp. 766 - 779. doi:10.1016/j.rser.2013.08.041

Hnizdo, E., & Vallathan, V. (2003, April 1). Chronic obstructive pulmonary disease due to occupational exposure to silica dust: a review of epidemiological and pathological evidence. *Occupational and Environmental Medicine*, 60, pp. 237 - 243. doi:10.1136/oem.60.4.237

Mekonnen, M., Gerbens-Leenes, P., & Hoekstra, A. (2015, March 9). The consumptive water footprint (WF) of electricity and heat: a global assessment. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 1, pp. 285 - 297. doi:10.1039/c5ew00026b

CAPÍTULO 6

ENERGÍA EÓLICA

Autor: Uta Zaehringer

Renewables Academy AG, Schönhauser Allee 10-11, 10119
Berlin-Germany

e-mail: zaehringer@renac.de

Resumen: El uso de energía solar puede clasificarse como directo (p.e. solar térmico o fotovoltaico) o indirecto (p. e. eólico, hidráulico o bioenergético). Este capítulo trata los usos indirectos de la energía solar: en la primera parte se describen los aspectos básicos físicos y tecnológicos del uso de la energía eólica. A pesar de que la huella hídrica de una planta eólica es comparativamente menor que una PV y una CSP, existen impactos ambientales durante las fases de construcción, operación y desmantelamiento de los proyectos de energía eólica, que se resumen en la segunda parte del capítulo.

Objetivos de aprendizaje:

Al final de este capítulo el estudiante será capaz de,

- Conocer los conceptos relacionados con la energía eólica
- Evaluar los impactos ambientales del uso de la energía eólica a lo largo de su ciclo de vida.

6.1 Energía eólica

El viento se utiliza como fuente de energía a través de una turbina eólica. La energía eólica se origina a partir del sol, cuya radiación llega a la Tierra, la diferencia de temperatura entre el ecuador y los polos genera corrientes térmicas (vientos) que circulan alrededor del globo. La atmósfera es una gran máquina térmica que continuamente genera viento. La masa de aire fluye entre áreas de baja y alta presión. Los vientos de hasta 200 m sobre el nivel del suelo valen para ser utilizados por la industria eólica. Las turbinas eólicas pueden generar electricidad a velocidades del viento desde 3 m/s hasta los 35 m/s. Algunas turbinas eólicas especialmente diseñadas pueden funcionar a velocidades del viento mayores o menores. Los huracanes, tifones, tornados o tormentas eléctricas no son útiles porque son muy fuertes y pueden causar daños graves a la turbina eólica. El viento a menudo cambia su velocidad y su dirección. Las fluctuaciones rápidas se llaman ráfagas y pausas. Una ráfaga es un aumento repentino en la velocidad del viento y las pausas son caídas repentinas en la velocidad del viento, son causados por las turbulencias.

6.2 Elementos de la turbina eólica

Diseño general

Las turbinas eólicas pueden construirse para resistir fuertes tormentas, operar bajo condiciones climáticas árticas o tropicales, en el mar frente a las costas o en los desiertos. Existe una amplia gama de diseños diferentes para cada fin.

Los aerogeneradores están diseñados con un eje vertical u horizontal, una pala, un conjunto de aspas, un rotor, poseen una pequeña capacidad de algunos vatios hasta algún megavatio, con o sin caja de cambios y con generador de corriente continua o alterna. No existe un diseño general, aunque las turbinas horizontales de tres palas en ceñido son las más utilizadas. Con estas turbinas, las palas del rotor se enfrentan al viento mientras que con las *turbinas downwind* la góndola es la que se enfrenta al viento.

Los componentes principales de un sistema de energía eólica son:

- Aspas y turbina
- Torre, transformador y cableado eléctrico

6.2.1 Rotor

Las palas del rotor "capturan" el viento y convierten su energía motriz en rotación (Figura 6.1). El núcleo dirige la energía de las palas del rotor al generador. Si la turbina eólica tiene una caja de engranajes, el cubo se conecta al eje de la caja de cambios que gira lentamente, convirtiendo la energía del viento en energía de rotación. Si la turbina tiene una transmisión directa, la energía pasa directamente al generador. Cada fabricante tiene sus propios diseños de palas y rotores derivados de sus propias investigaciones en este campo, pero, en general, e construyen de forma

similar a las alas de los aviones (World Wind Energy Association, 2011).

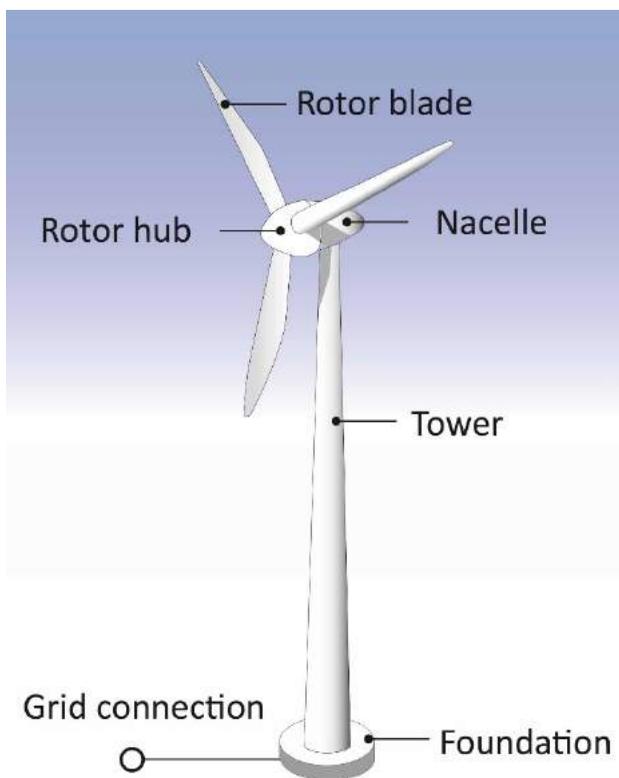


Figura 6.1. Esquema de los componentes de un aerogenerador (RENAC, 2017)

Tabla 6.1. Material utilizado en una turbina eólica

Componente	Material
Cimentación	Hormigón, acero
Torre	Hormigón, acero
Accionamiento	Fundición, acero y lubricantes
Generador	Hierro fundido, cobre, electrónica
Electrónica	Cable, cuadro eléctrico
Barquilla	Metales y fibra
Palas del rotor	Componentes de fibra

Las palas del rotor de la turbina eólica utilizan el mismo principio de elevación que los aviones o las aves: gracias a la forma del ala, la corriente de aire debajo del ala es más lenta que en la parte superior, por ello, la presión por encima del ala es menor que debajo de la misma, esta diferencia de presión produce la elevación y que el mecanismo rotor gire.

Se ha descubierto que el rotor de tres palas es el más eficiente para la generación de energía mediante grandes aerogeneradores. La mejor distribución de la masa hace que la rotación sea más suave y de apariencia más *tranquila*. El material de las palas es sintético reforzado con fibra de vidrio, fibras de carbono, madera y metal (protección contra rayos, etc.). Las capas se pegan con

resina epoxi. Las aleaciones de aluminio y acero son más pesadas y sufren fatiga del material (Asociación Mundial de Energía Eólica, 2011).

6.2.2 Góndola

La góndola o barquilla contiene toda la maquinaria de la turbina. Debido a que tiene que poder rotar para seguir la dirección del viento, está conectado a la torre a través de los cojinetes. La góndola incluye el tren de transmisión que consta de los siguientes componentes: eje del rotor, caja de cambios, frenos, acoplamiento, generador, componentes electrónicos de potencia, refrigeración o calefacción y una grúa pequeña.

Los detalles de diseño pueden variar de un fabricante a otro.

6.2.3 Torre del aerogenerador

Las torres de los aerogeneradores están hechas de hormigón, metal, madera o una combinación de estos materiales. La mayoría de las grandes turbinas eólicas están construidas con torres tubulares de acero, que se fabrican en secciones. Los tipos eólicas disponibles son las torres de acero, torres de hormigón, torres de celosía, torres híbridas y torres tubulares con guías.

Las torres de acero generalmente constan de dos a cuatro segmentos, con una longitud de 20 a 30 metros cada uno, atornillados al terreno del parque eólico.

El método de construcción de la torre de celosía se basa en el principio de utilizar el material sólo en los puntos donde las fuerzas tienen que actuar en la estructura. Con este método es posible reducir el peso de la torre.

Las torres híbridas combinan una torre prefabricada de hormigón segmentado con perfiles tubulares de acero en la parte superior. La ventaja es que los segmentos pueden ser transportados fácilmente a través de camiones ordinarios, especialmente en aquellos países donde el transporte de torres de acero con grandes diámetros es problemático y donde los segmentos de hormigón pueden ser producidos localmente.

Las torres tubulares Guyed sólo se utilizan para pequeñas turbinas eólicas. Son ligeras y se pueden montar sin grúa.

6.3 Impactos ambientales del uso de energía eólica

En una central eólica se producen diversos impactos ambientales durante las fases de construcción, operación y clausura. La Tabla 6.2 recoge estos impactos. Por ejemplo la huella de agua de una planta eólica es comparativamente menor que la de una planta fotovoltaica y de energía solar térmica.

Tabla 6.2. Impactos medioambientales de una planta de energía eólica (Hernandez, et al., 2014 and Saidur, Rahim, Islam, & Solangi, 2011).

Raw material acquisition	Manufacturing	Construction	Operation	Decommission
Biodiversity loss	Water stress and pollution	Biodiversity loss	Impacts on wildlife	Dust production
Habitat loss	Waste Production	Water and soil pollution	Visual Impact	Waste production
Toxic-effluents		Earth movements from transport movements		
Waste production				
Depletion of natural resources				
CO ₂ and other GHG gas emissions				
Noise Pollution				

6.3.1 Impactos en la vida silvestre

Hay muchos estudios que muestran los impactos en las especies de aves debido a las plantas eólicas (H Kunz, et al., 2007) (Drewitt y Langston, 2006) (Saidur, Rahim,

Islam y Solangi, 2011). En comparación con el número de aves muertas por la caza, el número de muertes debido a un campo eólico es el mismo. Esto se puede evitar con un estudio previo adecuado del lugar donde se va a ubicar para reducir el impacto. El estudio de S. Mariò et al. titulado "*Predecir las tendencias del crecimiento de las especies de vertebrados como respuesta a la instalación de parques eólicos en ecosistemas montañosos del noroeste de Portugal*" explica que cuando hay mal tiempo o niebla durante la noche, las luces emitidas por las plantas eólicas atraen a las aves y aumentan la probabilidad de choque contra las cuchillas (Santos, et al., 2010). El diseño de las torres es también uno de los factores de mortalidad de las aves. Las turbinas más antiguas con alturas del cubo más bajas y diámetros del rotor más cortos hacen que las cuchillas giren a altas RPM y, en consecuencia, aumenta la tasa de mortalidad de aves (Magoha, 2002).

6.3.2 Impactos visuales

Dependiendo del diseño de una planta eólica (color, tamaño, distancia hasta los lugares habitados, sombras producidas...) el impacto puede variar. (Ladenburg, Evaluación de impacto visual de parques eólicos marinos y experiencia previa, 2009). Para reducir dicho impacto visual, las turbinas eólicas pueden ser de color verde en la base y pintadas gradualmente en color gris claro en la parte superior. El parpadeo de las sombras se produce por el movimiento de las hojas junto con el reflejo de los rayos

del Sol, generando el denominado efecto disco (Saidur, Rahim, Islam y Solangi, 2011).

Este efecto no dura mucho y sólo se produce durante una combinación de circunstancias, por ejemplo cuando:

- el sol brilla en un ángulo bajo
- la turbina está directamente entre el sol y la zona afectado
- la velocidad del viento está por encima de la velocidad del viento de la turbina (para garantizar que las palas de la turbina se muevan). (Departamento de Medio Ambiente, Patrimonio y Gobierno Local de Irlanda, 2006)

El parpadeo producido por las sombras se puede modificar mediante una cuidadosa selección, diseño y planificación del lugar de colocación.

6.3.2 Impacto auditivo

En una turbina eólica, el ruido emitido podría clasificarse en dos tipologías. El ruido generado por los movimientos de la caja de engranajes, el generador eléctrico y los cojinetes y que es de tipo mecánico y el ruido derivado del flujo de aire sobre y más allá de las palas, que es de tipo aerodinámico. Tal ruido varía con el tamaño de la turbina, las direcciones del viento y puede molestar a los residentes cercanos. Los impactos del ruido también se consideran una de las razones de la disminución del valor de la tierra cerca de una planta eólica. Los ruidos mecánicos durante el funcionamiento podrían reducirse utilizando cortinas de aislamiento y zapatas de soporte antivibración. El ruido aerodinámico se puede minimizar diseñando las cuchillas

de tal manera que se cree un ruido mínimo durante el movimiento (Saidur, Rahim, Islam y Solangi, 2011) (Gauld, 2007). Para garantizar la aceptación del público en lugares sensibles al ruido como un albergue, hospital o una zona residencial es esencial una planificación cuidadosa del diseño del parque eólico. Por ejemplo, en un estado de Alemania conocido como Bavaria, para evitar cualquier impacto de los parques eólicos, se ha implementado una regla que establece que la distancia entre un aerogenerador y las áreas residenciales es 10 veces la altura del aerogenerador.

Referencias

Departamento de Medio Ambiente, Patrimonio y Gobierno Local de Irlanda. (2006).

Drewitt, A., y Langston, R. (2006). Evaluar los impactos de los parques eólicos en las aves. *Revista internacional de ciencia aviar*, 148, pp. 29 - 42.

Gauld, R. (2007). Evolución del viento: Consideraciones de impacto ecológico, técnico y social. Orkney Sustainable Energy Ltd.

H Kunz, T., Arnett, E. B., Erickson, W. P., Hoar, A. R., Johnson, G. D., Larkin, R. P., Tuttle, M. D. (2007). Impactos ecológicos del desarrollo de la energía eólica en murciélagos: preguntas, necesidades de investigación e hipótesis. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5 (6), pp. 315 - 324.

Ladenburg, J. (2009). Evaluación de impacto visual de parques eólicos marinos y experiencia previa. *Applied Energy*, 86, pp. 380-387.

Ladenburg, J. (2009). Evaluación de impacto visual de parques eólicos marinos y experiencia previa. *Applied Energy*, 86, pp. 380-387. doi: 10.1016 / j. apenergy. 2008.05.005

Magoha, P. W. (2002). ¿Huellas en el viento ? : Impactos medioambientales del desarrollo de la energía eólica. *Fuel and Energy Abstracts*, 3 (5), pp. 30-33. doi: 10.1016 / S1471-0846 (02) 80083-X.

Mário S, B. R. (2010). Predecir las tendencias de la riqueza de especies de vertebrados como respuesta a la instalación de parques eólicos en los ecosistemas de montaña del noroeste de Portugal. *Indicadores ecológicos*, 10, pp. 192 - 205.

Academia de Energías Renovables (RENAC) AG. (2017). *Estándares medioambientales y sociales en la financiación de proyectos de energía renovable (fotovoltaica, eólica y biomasa)*. Berlín, Alemania.

Saidur, R., Rahim, N., Islam, M., y Solangi, K. (2011). Impacto ambiental de la energía eólica. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (5), pp. 2423 - 2430. doi: 10.1016 / j.rser.2011.02.024

Asociación Mundial de Energía Eólica. (2011).

CAPÍTULO 7

ENERGÍA MAREOMOTRIZ E HIDRÓGENO

Autor: Aleksandra SRETENOVIC Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia.

e-mail: asretenovic@mas.bg.ac.rs

Resumen: Trata sobre los potenciales de las olas y las mareas para la producción de electricidad. Se discuten las posibilidades y limitaciones del uso de esta tecnología. Se presenta el desarrollo tecnológico, cubriendo turbinas mareomotrices, presas de marea y dispositivos captadores de olas. Se evalúa el impacto ambiental de las olas y la energía mareomotriz.

Se estudia la producción industrial del hidrógeno y su impacto en el medio ambiente. Una vez que se produce Hidrógeno es un excelente portador de energía. Se puede utilizar en pilas de combustible para generar electricidad y calor. Se presentan los aspectos tecnológicos del almacenamiento, transporte y utilización. Se discute la fiabilidad y los aspectos económicos de la aplicación del hidrógeno.

Objetivos de aprendizaje:

Al final de este capítulo el estudiante será capaz de,

- Entender el potencial de las mareas como fuente de energía renovable
- Conocer los posibles impactos ambientales de las mareas como fuentes de energía

- Discutir las cuestiones relacionadas con las ventajas y desventajas de la energía mareomotriz
- Comprender el potencial del hidrógeno como fuente de energía y argumentar sobre las ventajas y desventajas de la producción de hidrógeno
- Entender los impactos ambientales de la producción y uso del hidrógeno.

7.1 Potencial de las olas y mareas para la producción de electricidad

El término "energías renovables húmedas" se usa para referirse al desarrollo de la energía mareomotriz marina a través de los sistemas de presas o vallas de marea, corrientes de marea y sistemas de energía mareomotriz (Frid et al., 2012). El uso de estos recursos energéticos es especialmente importante para los países con grandes áreas de aguas costeras. El Consejo Mundial de la Energía estima que menos del 0,1% de la energía de los océanos se podría convertir en electricidad y podría satisfacer cinco veces más la actual demanda mundial de energía (Council, 2016).

Aunque se estima que casi 3000 GW de energía mareomotriz están disponibles en todo el mundo, menos del 3% se encuentra en áreas aptas para la generación de energía, según el World World Renewable Energy Report 2002-2007 (Esteban y Leary, 2012). Desafortunadamente, sólo una pequeña fracción de este recurso de energía oceánica se ubica en zonas económicamente viables con tecnología disponible. El 48% del recurso mareomotriz europeo se encuentra en el Reino Unido, el 42% en Francia y el 8% en Irlanda. La energía de las olas tiene un potencial aproximado de 1.000 a 10.000 GW, que es equivalente al

consumo mundial de energía eléctrica. La ventaja más importante de las corrientes de marea como fuente de energía es su predictibilidad, ya que las pleamares pueden predecirse con semanas o incluso años de antelación de una manera certera.

Mareas

Lo que hace tan atractiva la investigación sobre la energía mareomotriz es la regularidad de las mareas y el enorme potencial energético (Pelc & Fujita, 2002). Una marea es el ascenso y descenso regular de la superficie del océano causado por la fuerza gravitacional del Sol y la Luna sobre la tierra y la fuerza centrífuga producida por la rotación de la tierra y la luna entre sí. Teniendo en cuenta que la Luna está más cerca de la Tierra, su fuerza gravitacional es 2.2 veces mayor que la fuerza gravitacional del Sol. Las corrientes de las mareas pueden encontrarse en zonas costeras y en lugares donde el caudal de agua se ve obligado a navegar por canales estrechos. Estas corrientes fluyen en dos direcciones: el caudal orientado en la dirección de la costa se llama corriente de inundación, mientras que el que se retira de la costa se conoce como corriente de reflujó. La energía mareomotriz tiene un componente potencial y otro cinético. Por ello, las instalaciones de energía mareomotriz pueden clasificarse en dos tipos principales: presas de marea que utilizan componentes potenciales y turbinas de corriente mareomotriz que utilizan energía cinética.

Presa de marea

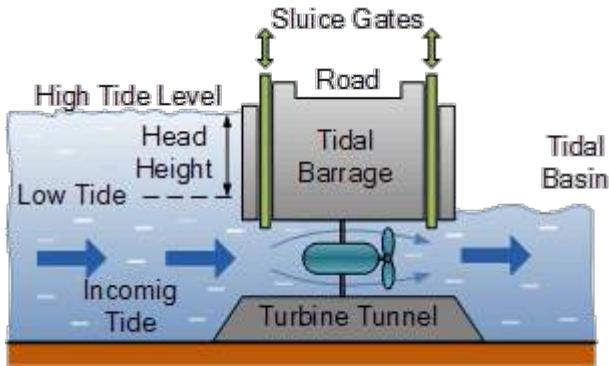
La presa mareomotriz genera energía que conlleva la construcción de una pared o presa a través de la entrada de

una ensenada mareomotriz o cuenca que crea un embalse (<http://www.alternative-energy-tutorials.com.html>).

Esta presa (Figura 7.1.) cuenta con túneles submarinos colocados a lo largo de su anchura por donde penetra el agua con compuertas de esclusa. Dentro de los túneles hay unos generadores fijos de turbinas hidráulicas que utilizan la energía cinética del agua para generar la electricidad mareomotriz. Una presa de marea funciona como la generación hidroeléctrica, a diferencia de que las mareas fluyen en dos direcciones y sus generadores están diseñados para operar con ambos flujos de agua direccionales.

El rango de marea es la diferencia vertical entre el nivel del mar de marea alta y baja. ("<http://www.alternative-energy-tutorials.com.html>"). Dado que la marea se mueve verticalmente entre el nivel bajo y el alto, en su bajada crea un diferencial de altura donde se almacena la energía potencial. Este cabezal se utiliza para crear una diferencia en los niveles de agua a los dos lados de la presa, y la electricidad se produce mientras el agua pasa a través de las turbinas. Hay tres diseños de presas de energía mareomotriz en uso:

- **Generación de crecidas:** la energía mareomotriz se genera a medida que el agua penetra en el depósito de marea en la marea entrante.
- **Generación de mareas:** la energía mareomotriz se genera a medida que el agua sale del depósito de mareas en la marea menguante.
- **Generación bidireccional:** la energía mareomotriz se genera cuando el agua fluye en ambas direcciones, durante una inundación o con la marea baja.



• **Figura 7.1.** Planta de energía mareomotriz
 ("http://www.alternative-energy-tutorials.com.html")

Para la presa de marea de la generación Ebb se abren las compuertas de esclusa para permitir que la marea inunde la cuenca mareomotriz (estuario, fiordo o bahía). En marea alta las esclusas de la presa están cerradas, capturando el agua de la cuenca. Una vez que se ha producido un diferencial de altura suficiente, las compuertas de las turbinas se abren y el agua contenida fluye a través de las turbinas. La generación de electricidad continúa hasta que el cabezal hidrostático desciende al nivel mínimo que permite el funcionamiento eficiente de las turbinas. A continuación, se abren las esclusas para permitir el relleno de la cubeta. Este método (generación ebb), genera la mayor potencia. También es posible generar energía en la marea de inundación relleno de la cuenca a través de las turbinas. Ambos flujos se pueden aprovechar en dispositivos duales. Las primeras presas de marea se construyeron en 1966, como la planta de La Rance-Francia (Figura 7.2), y todavía está en funcionamiento (Esteban & Leary, 2012). El único país que actualmente está trabajando seriamente en estos sistemas es Corea del Sur.

Otros todavía están evaluando los aspectos económicos de estas plantas, considerando las importantes inversiones en infraestructura que se requieren, así como los posibles daños ambientales. Las primeras plantas comerciales acaban de entrar en funcionamiento con el proyecto Pelamis en Portugal y SeaGen en Irlanda del Norte, creados en el verano de 2008.

La construcción de la presa de marea requiere una gran cantidad de materiales para soportar la enorme carga proveniente del agua embalsada (Rourke, Boyle, & Reynolds, 2010). La mayor desventaja de las presas de marea es su impacto ambiental negativo. La construcción de una a través de un estuario o una bahía puede influir en el flujo natural de las mareas, afectando a la vida marina dentro del estuario, así como a la calidad del agua y el transporte de sedimentos. La marea influye en los peces y otros animales marinos, pero también en el tráfico marítimo. En el caso del sistema generador de reflujos, este problema no es tan significativo, debido a que la cuenca se mantiene en un nivel de agua más alto comparado con el sistema generador de crecidas.

Turbinas mareomotrices

Las turbinas de corriente mareomotriz utilizan la energía cinética del flujo mareomotriz para generar electricidad (Rourke et al., 2010). La similitud con la energía eólica es evidente a primera vista, ya que los generadores de corriente de marea se asemejan a los parques eólicos submarinos. Sin embargo, por la densidad y velocidad entre el aire y el agua, existen varias diferencias operativas

en las condiciones de funcionamiento. Los generadores de energía eólica *off-shore* pueden ser dañados por tormentas o mareas, mientras que las turbinas de marea están ubicadas por debajo del nivel del mar, o fijados al lecho marino. Teniendo en cuenta que las turbinas están sumergidas en el agua, se encuentran expuestas a una mayor fuerza en comparación con las turbinas eólicas. Están diseñadas para soportar cargas significativas en el período en que no están generando electricidad, así como para poder producir electricidad durante ambos movimientos de marea (inundación y reflujos).

Hay dos métodos comunes de extracción de energía mareomotriz:

- Turbinas de corriente mareomotriz de eje horizontal. Las palas de la turbina giran en torno a un eje horizontal paralelo a la dirección del flujo de agua.
- Turbinas de corriente mareomotriz de eje vertical. Las palas de la turbina giran en torno a un eje vertical perpendicular a la dirección del flujo de agua.

Las principales corrientes de mareas están en el Océano Ártico, el Canal de la Mancha, el Mar de Irlanda, el Golfo de México, el Amazonas, el Estrecho de Magallanes en Gibraltar (www.alternative-energy-tutorials.com.html).

Utilización de la energía de las olas

La principal desventaja de la energía de las olas es su variabilidad, su aleatoriedad, aunque se pueden encontrar algunos patrones estacionales (Antonio, 2010). La crisis del petróleo en los setenta provocó un aumento del interés por esta energía. Aunque es un proceso hidrodinámico

complejo que implica considerables dificultades teóricas. Desde que la Comisión Europea en 1991 incluyó la energía mareomotriz en su programa de I+D, los primeros proyectos han comenzado a desarrollarse. Actualmente, existe una amplia variedad de tecnologías de captura de energía de las olas. Las tecnologías seleccionadas dependen de la profundidad del agua y de la ubicación (línea costera o mar adentro). Los primeros prototipos fueron dispositivos costeros que tienen la ventaja de facilitar su instalación y mantenimiento, y no requieren amarres en aguas profundas ni largos cables eléctricos submarinos. El dispositivo típico de primera generación es la columna de agua oscilante con turbina de aire, formada por una estructura parcialmente sumergida abierta debajo de la superficie del agua (Figura 7.2). El movimiento oscilante del agua producido por las olas fuerza al aire a fluir a través de la turbina que impulsa el generador eléctrico.

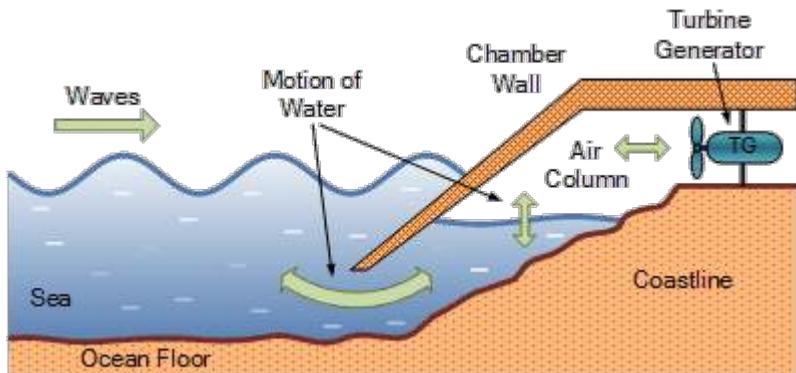


Figura 7.2. Columna de agua oscilante (["http://www.alternative-energy-tutorials.com.html"](http://www.alternative-energy-tutorials.com.html) ,)

El tipo de aerogenerador utilizado en una columna de agua oscilante es el elemento clave para su eficiencia. El aire dentro de la cámara cambia constantemente la dirección del movimiento causado por el propio movimiento vertical (arriba y abajo) del agua, originando el efecto de succión y soplado a través de la turbina. Para superar este problema, el tipo de aerogenerador utilizado en estos sistemas se llama turbina de pozos. La **turbina Wells** tiene la notable propiedad de rotar en la misma dirección independientemente de la del flujo de aire en la columna. La energía cinética se extrae del flujo de aire inverso y se utiliza para accionar un generador de inducción eléctrico. Esta tecnología no produce emisiones de GEI, lo que la convierte en una fuente de energía renovable y no contaminante, creada por la transferencia natural de energía eólica a través de una turbina de pozos. La ventaja de este esquema costero es que la parte móvil principal, la turbina, puede ser fácilmente desmontada para su reparación o mantenimiento porque se encuentra en tierra. La desventaja es que la salida de las columnas de olas oscilantes depende del nivel de energía de las olas, que varía día a día según la estación.

Los *dispositivos off-shore* (fuera de la costa) son cuerpos oscilantes que flotan en el agua capaces de explotar las olas más poderosas de aguas profundas (Figura 7.3). Los dispositivos de captura de olas más simples consisten en la reacción de la boya contra el marco fijo, es decir el fondo marino o estructura que se fija al fondo. El cabeceo y agitación de las ondas provoca un movimiento relativo entre un absorvedor y el punto de reacción. El absorvedor lineal (atenuador de ondas) flota en la superficie del agua.

Está atado al fondo del océano para que pueda balancearse perpendicularmente hacia las olas entrantes. A medida que las ondas pasan a lo largo de su longitud, hacen que el largo cuerpo cilíndrico se arquee hacia abajo y hacia arriba siguiendo el movimiento de la cresta de las olas. Las conexiones a lo largo del cuerpo del dispositivo se flexionan en las ondas ejerciendo una gran fuerza que se utiliza para accionar un ariete hidráulico en cada una de las uniones. El pistón hidráulico impulsa el aceite a través de un motor, igualmente hidráulico, que acciona un generador, produciendo la electricidad.

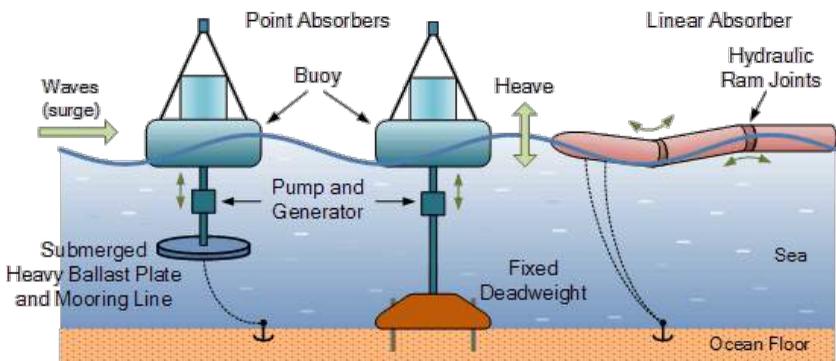


Figura 7.3. Dispositivos para captura de olas (<http://www.alternative-energy-tutorials.com.html>)

Otros potenciales de la energía marina

La conversión de la energía térmica del océano (OTEC) que se muestra en la Figura 7.4, produce electricidad a partir del nivel térmico natural del océano, utilizando el calor almacenado en las aguas superficiales cálidas para su

evaporación, mientras que el agua fría y profunda, a partir de una profundidad de 1.000 m., sirve para su refrigeración (Pelc & Fujita, 2002). En este proceso el fluido de trabajo, amoniaco, es alternativamente evaporado y condensado para alimentar un ciclo Rankin. La energía del amoniaco evaporado se captura con una turbina, que hace que un generador produzca energía eléctrica, extrayendo energía con un motor térmico. Se estima que 10TW de potencia, aproximadamente igual que la demanda energética global actual, podría ser suministrada por OTEC sin afectar la estructura térmica del océano.

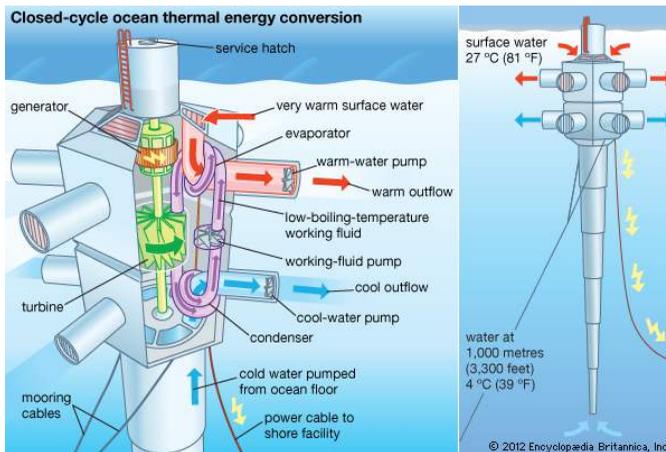


Figura 7.4. Conversión de la energía térmica oceánica ("https://www.britannica.com/technology/ocean-thermal-energy-conversion,")

Los niveles de salinidad se pueden aprovechar para la extracción de energía mediante la ósmosis. El cultivo de biomasa marina puede dar lugar a combustibles renovables para la generación de electricidad. Pero debido

a las limitaciones tecnológicas y económicas, su desarrollo es limitado.

7.2 Impacto ambiental de las olas y de la energía mareomotriz

Hasta ahora, las vallas de marea y los dispositivos de captura de energía de las olas sólo se han utilizado como modelos experimentales, por lo que la predicción de sus impactos ambientales se basa en datos empíricos muy limitados. Se ha demostrado que las presas de marea construidas en una bahía, tienen un impacto ambiental potencialmente significativo, más acusado en lugares como áreas de alimentación de aves, viveros o áreas de desove. Estos impactos pueden dividirse en tres categorías principales: 1) impactos sobre los hábitats y especies, 2) impactos directos sobre la reproducción y 3) impactos sobre los procesos de las columnas de agua e hidrología. Las mareas afectan a la reproducción y migración de las especies e influyen en los hábitats río arriba y río abajo de la instalación. El colector de energía de las olas, dependiendo de su configuración, puede alterar el hábitat marítimo causado por las partes móviles del sistema energético (Frid et al., 2012).

Teniendo en cuenta que el ciclo de vida de la presa es superior a 100 años, estos impactos son a largo plazo y deben ser investigados cuidadosamente. Los cambios en los regímenes de mareas y la retención de agua tienen un impacto en las comunidades de pájaros y la disponibilidad nutricional de su de hábitat. Si el lugar se encuentra en una ruta de migración de peces (salmónidos, anguilas) es necesario proporcionarles un paso adecuado, aunque es

inevitable un cierto grado de pérdida de la reserva regional de hábitat (Pelc & Fujita, 2002). Los cambios causados por la presa incluyen también la reducción del área intermareal, corrientes más lentas, menor rango de salinidades y cambio en las características del agua de fondo. Las innovaciones más recientes incluyen vallas de marea que consisten en turbinas que se extienden completamente a través de un canal donde el flujo de marea establece corrientes relativamente rápidas (Figura 7.5).

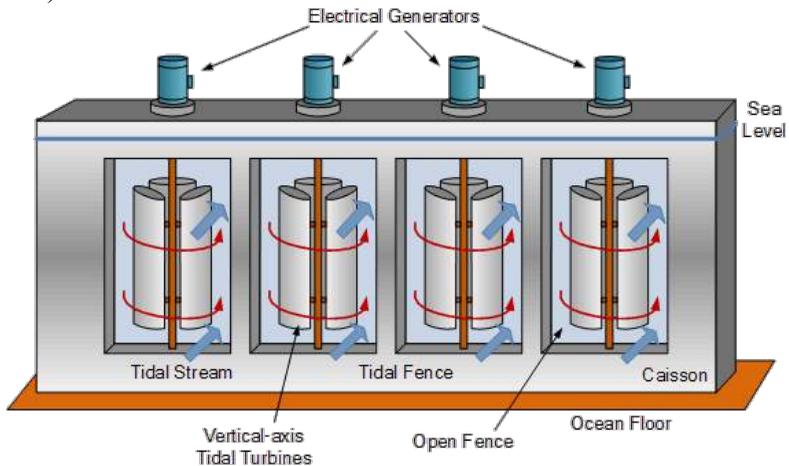


Figura 7.5 Valla de marea ("<http://www.alternative-energy-tutorials.com.html> ")

El diseño de las turbinas permite el paso de peces, agua y sedimentos por el canal. Las plantas mareomotrices ubicadas en las desembocaduras de los estuarios causan los mismos problemas ambientales que las grandes presas. Al alterar el flujo de agua salada a través de los estuarios, las plantas mareomotrices podrían afectar la hidrología y

la salinidad de estos entornos sensibles. Las desembocaduras sirven como vivero para muchos organismos marinos, así como un hábitat único e insustituible para los organismos de los estuarios, debe evitarse la alteración de este hábitat por la construcción de grandes plantas mareomotrices. Durante la fase de construcción de la central mareomotriz de La Rance, el estuario estuvo completamente aislado del océano durante 2-3 años, y se necesitó mucho tiempo para su restablecimiento. La construcción de una presa de marea nueva no debería cerrar totalmente el estuario del océano. Estas plantas no deberían construirse hasta que las evaluaciones ambientales detalladas demuestren un impacto mínimo en el ecosistema marino. Es probable que las vallas de marea y las turbinas mareomotrices sean más benignas para el medio ambiente, si bien pueden tener algunos impactos ambientales negativos, ya que bloquean los canales y dificultan la migración de peces y vida silvestre. Los mamíferos marinos podrían estar protegidos por una cerca que mantendría alejados a los animales más grandes y un conjunto de sensores sonar que apaga el sistema cuando se detectan. Las turbinas mareomotrices podrían ser la opción de energía mareomotriz más ecológica. No bloquean los canales ni las bocas de estuario, ni interrumpen la migración. Ambas, turbinas y vallas, pueden ofrecer una considerable capacidad de generación sin un impacto importante en el océano, mientras que las presas de marea probablemente son demasiado dañinas para el ecosistema marino.

7.3 Energía del hidrógeno

El hidrógeno es el tercer elemento más abundante en nuestro entorno, pero siempre está unido a otros elementos, creando compuestos como el metano (CH_4), agua (H_2O) y amoníaco (NH_3). El hecho de que no se pueda encontrar libremente, y que debe separarse antes de su uso, tiene un impacto significativo como fuente de energía, ya que el proceso de extracción requiere una cantidad significativa de energía. A menudo se hace referencia al hidrógeno como el "combustible del futuro", y hay una serie de ventajas que pueden justificar ese título (Tabak, 2009). Combustiona fácilmente y libera una cantidad importante de calor por unidad de masa. También puede ser usado para alimentar dispositivos de conversión de energía llamados celdas de combustible aplicando un proceso que es más eficiente que la combustión. Es una fuente de energía renovable, ya que el agua es una fuente de hidrógeno. Sus ventajas llevan a que muchos investigadores creen que finalmente sustituirá a los combustibles fósiles. Los inconvenientes son dos, que es caro de producir y de transportar.

- Como combustible de automoción, es difícil almacenarlo en cantidades lo suficientemente grandes como para proporcionar a los conductores eficiencia en el transporte
- Las pilas de combustible han demostrado hasta ahora ser costosas de fabricar y demasiado propensas a fallar para su uso en diversidad de aplicaciones.

Lo que hace que las tecnologías del hidrógeno sean tan interesantes es el potencial para abordar dos cuestiones muy importantes en la etapa actual del desarrollo de los sistemas energéticos: el almacenamiento de energía para fuentes de energía intermitentes, especialmente renovables, y como combustible para el transporte, en lugar de las fuentes fósiles (Leveque et al., 2010). En general, las tecnologías de producción de hidrógeno basadas en combustibles fósiles están bien desarrolladas en este momento, aunque es necesario implementar mejoras significativas para lograr una producción industrial generalizada. La producción sostenible de hidrógeno a gran escala, utilizando combustibles fósiles, requerirá tecnología de captura y almacenamiento de carbono (CCS). El uso del gas natural para la producción de hidrógeno puede causar algunos problemas en la seguridad del suministro en Europa. Estos hechos, considerando también el aspecto económico, implican que la producción de hidrógeno a partir del carbón es una mejor alternativa. Los científicos plantean ciertos temas que podrían afectar al desarrollo futuro del hidrógeno renovable. Mientras que las pérdidas de energía en una red eléctrica eficiente son de alrededor del 10%, con el hidrógeno como medio de almacenamiento y transporte, alcanzarían un 75-80%. Por lo tanto, esta vía ineficiente de electricidad-hidrógeno-electricidad parece incompatible con un futuro energético sostenible. En segundo lugar, si el hidrógeno se utiliza como medio de almacenamiento para otras fuentes de energía renovables, significa que el hidrógeno sólo debe producirse en caso de exceso de producción de electricidad. Esto implica que las implantaciones de fuentes de energía renovables deben ser

considerables antes de que el hidrógeno pueda ser efectivamente producido. Sin embargo, este tipo de producción muy baja y altamente irregular de hidrógeno tiene un efecto perjudicial en la eficacia de los electrolizadores. En tercer lugar, las fuentes de energía renovables no intermitentes también pueden no estar disponibles para la producción de hidrógeno. La biomasa ya tiene diferentes aplicaciones, pero una gran parte de los cultivos debe mantenerse para garantizar la fertilidad del suelo, lo que afecta a la cantidad potencial disponible. Tampoco se recomienda la electricidad proveniente de centrales hidroeléctricas a gran escala, ya que su impacto ambiental es grande y se consideran no renovables. En lugar de recurrir por completo al vínculo entre el hidrógeno y las energías renovables, se recomienda explorar otras tecnologías de producción de hidrógeno e investigar cuidadosamente la interacción entre el hidrógeno y otros portadores de energía. Los enormes costes de las tecnologías actuales de producción y transporte de hidrógeno plantean la cuestión de una posible inversión. Actualmente el uso del hidrógeno se limita a las pilas, donde se requiere una generación eléctrica fiable con un impacto medioambiental local muy bajo. Esto ha estimulado avances significativos en tecnologías de celdas de combustible. En la actualidad, las pilas de combustible de baja temperatura aptas para uso en vehículos cuestan alrededor de 8.000 €/Kw. Se estima que el coste debería reducirse en dos unidades para ser competitivo. Los motores de doble combustible (hidrógeno y gasolina), ya desarrollados por los fabricantes de automóviles, emiten niveles mucho más bajos de compuestos orgánicos y contaminantes.

7.3.1 Tecnologías de producción de hidrógeno

Pueden dividirse en tres categorías: electrolítica, termoquímica y biológica. En la Figura 7.6 se presenta una visión de las posibles fuentes y tecnologías de extracción. La extracción de hidrógeno de la materia prima es un proceso de baja eficiencia que a veces requiere aún más energía de la que puede producir.

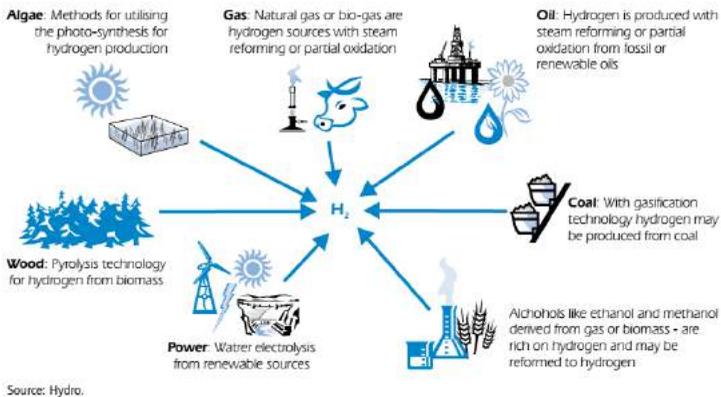


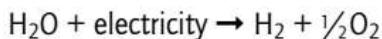
Figura 7.6. Materias primas y procesos tecnológicos en la producción de hidrógeno (AIE, 2006).

El hidrógeno se puede producir a partir de agua, biomasa, gas natural o carbón tras la gasificación (Turner, 2004). Hoy en día se produce principalmente a partir del gas natural mediante la transformación del metano en vapor.

Electrólisis de agua

Es una tecnología conocida y comercialmente disponible para una gran producción de hidrógeno. Es el proceso de

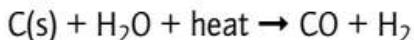
división del agua en hidrógeno y oxígeno con aplicación de energía eléctrica, como en la ecuación.



La ventaja de este proceso es que permite una operación descentralizada, lo que simplifica la infraestructura comparado con la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles o biomasa. Para que esta tecnología sea viable y eficiente, es necesario abaratar los equipos electrolíticos, y el precio de la electricidad respecto de los del gas o el carbón. Considerando que con temperaturas más altas disminuye la energía eléctrica requerida, para los lugares donde hay temperaturas elevadas los sistemas de electrólisis pueden ser preferibles.

Producción de carbón

La gasificación del carbón podría producir considerables cantidades de hidrógeno y electricidad gracias a los yacimientos de carbón disponibles. Además, debido a su costo relativamente bajo, se considera el mejor recurso económico para ello. Una reacción típica para el proceso en el que el carbono se convierte en monóxido de carbono e hidrógeno se da en la ecuación.



El CO se convierte posteriormente en CO₂ y H₂. Sin embargo, la energía necesaria para la retención de CO₂, que es el subproducto principal en todas las tecnologías de producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles, aumenta el consumo de carbón. La producción de hidrógeno utilizando energía solar, eólica, nuclear y geotérmica incluye electrólisis de agua, ciclos químicos

térmicos utilizando calor y procesamiento de biomasa. La biomasa puede convertirse fácilmente en una variedad de combustibles líquidos, incluyendo metanol, etanol, biodiesel y aceite de pirolisis, que podrían ser transportados y utilizados para generar hidrógeno en el sitio. Aunque la biomasa es claramente sostenible, no puede suministrar hidrógeno en las cantidades requeridas.

Separación termoquímica del agua

Debido a que la división térmica directa del agua requiere temperaturas superiores a los 2000°C y el producto está recombinando rápidamente la mezcla de hidrógeno y oxígeno, los científicos investigaron diferentes ciclos químicos térmicos que pueden utilizar temperaturas más bajas y producir hidrógeno y oxígeno en pasos separados. Uno de los métodos más comunes requiere el uso de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 850°C y yoduro de hidrógeno (HI) a 450°C. Sin embargo, es necesario lograr propiedades del material que puedan cumplir con la estabilidad requerida bajo las condiciones de operación de HI y H_2SO_4 . Por razones de seguridad, se requiere una larga línea de transferencia de calor para mantener esta planta lejos del reactor. Los sistemas de energía solar térmica también podrían utilizarse para impulsar tales ciclos químicos térmicos. Cualquier tecnología que produzca electricidad puede impulsar un electrolizador para producir hidrógeno. Debido al enorme potencial de la energía solar y eólica, parece posible que estas fuentes puedan ser utilizadas más ampliamente en el futuro. La eficiencia de los electrolizadores disponibles en el mercado oscila entre el 60 y el 73%, por lo que uno de los problemas más frecuentes es su baja validez. Sin embargo, aunque sin

duda es muy importante, la eficacia en sí misma no debería ser el factor determinante, especialmente para decidir sobre las nuevas tecnologías. La energía necesaria para dividir el agua puede obtenerse a partir de una combinación de calor y electricidad. La cantidad de agua necesaria para producir hidrógeno para el transporte no es grande. La conversión de los 230 millones de vehículos a vehículos con celdas de combustible requeriría alrededor de 100 mil millones de galones de agua/año para abastecer el hidrógeno necesario. Las tecnologías sostenibles de producción de hidrógeno que pueden afectar la producción de hidrógeno en el futuro incluyen enfoques fotobiológicos y fotoelectroquímicos (Figura 7.7). Estos sistemas producen hidrógeno directamente a partir de la luz solar y el agua, y ofrecen la posibilidad de aumentar la eficiencia de la vía solar-hidrógeno y reducir el costo de capital del sistema, pero aun así requieren de la superficie de tierra para recoger la luz solar. Estos métodos podrían permitir el uso del agua de mar directamente como materia prima en lugar de agua de alta pureza (Figura 7.8).

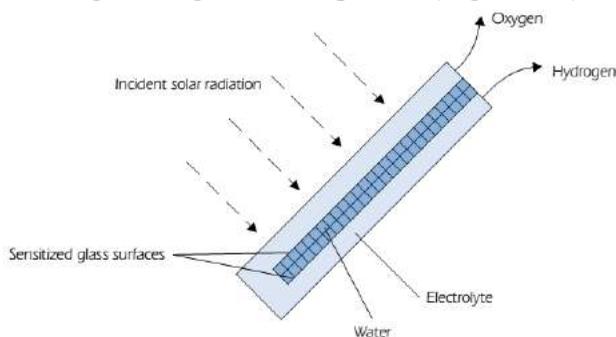


Figura 7.7. Funcionamiento de una célula fotoelectrolítica (IEA, 2006)

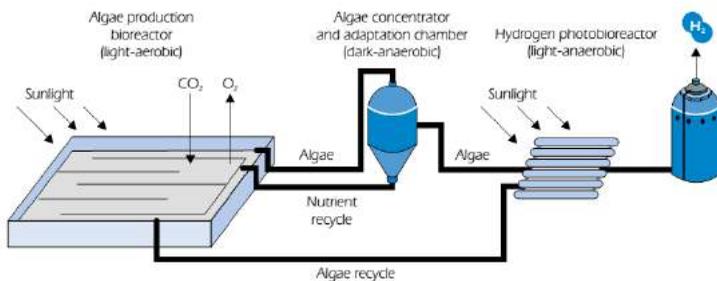


Figura 7.8. Producción fotobiológica de hidrógeno (AIE, 2006)

7.3.2 Impacto ambiental

El hidrógeno puede ayudar a reducir el CO₂ en la atmósfera, especialmente si se utiliza como fuente de energía para vehículos en lugar de los combustibles fósiles convencionales. Según el informe de la Agencia Internacional de la Energía en 2011, el sector del transporte es responsable del 23% de las emisiones mundiales de CO₂ procedentes de la combustión de fósil, mayoritariamente automóviles y camiones. Se prevé que la demanda mundial de transporte por carretera aumentará un 40% en 2035. Los vehículos impulsados por pilas de combustible de hidrógeno pueden reducir de manera importante la emisión de GEI considerando que los únicos subproductos son el calor y el agua. La Academia Nacional de Ciencias predice que 2 millones de vehículos de hidrógeno podrían estar en la carretera en 2020, creciendo a 25 millones de vehículos para 2030. Esto daría lugar a una reducción de las emisiones de GEI de los vehículos ligeros del 20 % hasta 2035 e incluso más del 60% para 2050. Aunque las pilas de combustible en sí mismas no emiten CO₂, estos vehículos no son completamente "verdes" ya que las tecnologías de

producción de hidrógeno son responsables de algunas emisiones de GEI. Dos métodos comunes, la reformación de vapor de gas natural y la gasificación del carbón, ambos liberan CO_2 durante el proceso de extracción. Sin embargo, incluso teniendo en cuenta las emisiones de la producción de combustible, el combustible de hidrógeno emite aún una cantidad bastante menor de GEI que los combustibles fósiles de los automóviles alimentados con petróleo.

Una reciente investigación muestra que los vehículos con celdas de combustible, que utilizan hidrógeno producido a partir del gas natural, reducen las emisiones totales de GEI en un 60% en comparación con los vehículos convencionales de motor de combustión interna impulsados por gasolina. Por supuesto, este porcentaje es aún mayor si se utiliza la tecnología con menor intensidad de carbono para la producción de hidrógeno. Cuando el hidrógeno se produce utilizando tecnología de electrólisis alimentada por fuentes renovables, se emiten muy poco o nada de GEI, lo que lo convierte en una de las fuentes de combustible más ecológicamente limpias. Cuando se produce con energía renovable, las emisiones totales de gases de efecto invernadero del hidrógeno, producidas por la producción para su uso en un vehículo con celda de combustible, son más bajas que las emisiones totales de gasolina tradicional, biocombustibles o vehículos híbridos. Para reducir las emisiones de CO_2 , los científicos están trabajando en la extracción del hidrógeno con tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS), que extraen, transportan y almacenan las emisiones de dióxido de carbono antes de ser liberadas al aire. Con la CAC, el CO_2 producido por la producción de hidrógeno

se transporta a un lugar de almacenamiento y luego se inyecta bajo alta presión en cavernas subterráneas profundas, donde no puede escapar a la atmósfera y contribuir al calentamiento global. El uso de estas tecnologías hace que la producción de hidrógeno sea más respetuosa con el medio ambiente. La combinación de CCS con la gasificación del carbón permite una producción de hidrógeno asequible con bajas emisiones de GEI. Durante este proceso, el carbón se convierte en gas que, entre otros elementos, contiene hidrógeno. El hidrógeno se extrae en varios pasos. Con la CAC, las emisiones de CO₂ se reducen hasta un 90% en comparación con la central eléctrica alimentada por carbón. Sin embargo, algunos científicos afirman que la energía del hidrógeno en este momento no es tan limpia como se dice. Además de la posible emisión de GEI durante la producción de hidrógeno, el propio hidrógeno puede representar un peligro para la atmósfera. Es imposible fabricar, almacenar y transportar hidrógeno sin que algunos se escapen a la atmósfera. A medida que se utiliza más hidrógeno, el hidrógeno escapado podría acumularse en la atmósfera, agotando la capa de ozono y contribuyendo al calentamiento global. Los científicos han intentado desarrollar métodos de producción de hidrógeno más respetuosos con el medio ambiente. Hasta ahora, ninguno de ellos ha ido más allá de los modelos informáticos y los laboratorios de investigación. Por ejemplo, el hidrógeno producido a través de la electrólisis que utiliza fuentes renovables de electricidad como la energía eólica o solar tiene cero o casi cero emisiones de gases de efecto invernadero y es muy atractivo en teoría. Sin embargo, menos del 5% del hidrógeno actual se

produce utilizando este método. Esto no parece probable que cambie en un futuro próximo, ya que actualmente no hay demostraciones a escala comercial de plantas de producción de hidrógeno con cero emisiones en funcionamiento.

Referencias

Antonio, F de O. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(3), 899-918.

Council, World Energy. (2016). World Energy Resources 2016.

Esteban, Miguel, & Leary, David. (2012). Current developments and future prospects of offshore wind and ocean energy. *Applied Energy*, 90(1), 128-136.

Frid, Chris, Andonegi, Eider, Depestele, Jochen, Judd, Adrian, Rihan, Dominic, Rogers, Stuart I, & Kenchington, Ellen. (2012). The environmental interactions of tidal and wave energy generation devices. *Environmental Impact Assessment Review*, 32(1), 133-139.

International Energy Agency (IEA), (2006), Hydrogen Production and Storage

Web page (2017) retrieved from <http://www.alternative-energy-tutorials.com/wave-energy/wave-energy-devices.html>

Leveque, Francois, Glachant, Jean-Michel, Barquin, Julian, von Hirschhausen, Christian, Holz, Franziska, & Nuttall,

William J. (2010). *Security of Energy Supply in Europe. Natural Gas, Nuclear and Hydrogen*: Edward Elgar.

Pelc, Robin, & Fujita, Rod M. (2002). Renewable energy from the ocean. *Marine Policy*, 26(6), 471-479.

Rourke, Fergal O, Boyle, Fergal, & Reynolds, Anthony. (2010). Tidal energy update 2009. *Applied Energy*, 87(2), 398-409.

Tabak, John. (2009). *Natural gas and hydrogen*: Infobase Publishing.

CAPÍTULO 8

ENERGÍA GEOTÉRMICA

Autor: Aleksandra SRETENOVIC

Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Faculty of Mechanical Engineering, de Belgrado, Belgrado, lSerbia.

e-mail: asretenovic@mas.bg.ac.rs

Resumen: La energía geotérmica tiene un potencial muy significativo y, considerando que la Tierra emite calor constantemente, se puede encontrar en todo el mundo. Existen diferentes niveles de temperatura. Las fuentes de calor están contenidas en el agua (niveles de temperatura bajos, moderados o altos) o en el suelo (rocas calientes). El agua a alta temperatura (o vapor) para la producción de electricidad, el agua a temperatura moderada puede aplicarse directamente para calefacción o con fines industriales, mientras que el calor del agua y el suelo a baja temperatura se utilizan principalmente para bombas de calor. Aquí se explica las soluciones técnicas utilizadas los efectos ambientales del uso de la energía geotérmica.

Objetivos de aprendizaje:

Al final de este capítulo el estudiante será capaz de,

- Comprender el potencial y la disponibilidad de la energía geotérmica
- Conocer los impactos ambientales de la aplicación de la energía geotérmica

- Discutir críticamente las posibles aplicaciones de la energía geotérmica.

La energía geotérmica representa el calor remanente derivado de la formación del planeta hace 4.500 millones de años, aproximadamente el 40%, así como el calor de la desintegración radiactiva de los isótopos radiactivos naturales, el 60% restante (Glassley, 2014). La energía térmica en la tierra está contenida en las rocas y en los fluidos naturales que emergen por las grietas y fracturas del terreno (Leveque et al., 2010). A lo largo de la historia, los fluidos geotérmicos calientes se han utilizado para cocinar y bañarse, pero a principios del siglo XX esta fuente de energía renovable encontró una aplicación industrial y comercial más amplia, como la generación de energía eléctrica. El flujo promedio de calor a través de la corteza terrestre es de casi 59 mW/m^2 . Para la mayoría de las áreas continentales, el flujo de calor es causado por dos procesos elementales: el calor de convección y conducción del manto y del núcleo de la Tierra, y el calor generado por la descomposición de elementos radiactivos (isótopos de uranio, torio y potasio) en la corteza. En regiones con actividades volcánicas o tectónicas hay un mayor flujo de calor registrado, que es la razón por la que las personas generalmente relacionan la energía geotérmica sólo con estos lugares, como Islandia, Nueva Zelanda, Japón o el Parque Nacional Yellowstone. A menudo se desconoce que en otras regiones hay oportunidades para usar fuentes de energía geotérmica.

Para generar electricidad, es necesario perforar hasta las profundidades donde se puede encontrar calor a altas temperaturas, en el rango de 150°C a 200°C. Para otras formas de calentamiento, es suficiente con alcanzar temperaturas más bajas de 100°C a 150°C. El calor geotérmico se puede usar directa e indirectamente para calentar y enfriar edificios, reduciendo la demanda eléctrica de calefacción, ventilación, aire acondicionado y refrigeración (HVAC) (Glassley, 2014). Incluso a temperaturas inferiores a 50°C, la energía geotérmica se puede utilizar para diversos fines. Las bombas de calor geotérmicas es la tecnología más utilizada que utiliza energía de baja temperatura que se puede alcanzar fácilmente a profundidades de entre 2 y 200 metros para calentar edificios, lo que reduce muchos los costes de electricidad. Aunque las temperaturas en el suelo cerca de la superficie de la tierra dependen de las condiciones climáticas externas, las temperaturas a profundidades de más de 3 metros son casi constantes debido al flujo constante de calor del interior de la tierra. Una de las características destacadas de las bombas de calor geotérmicas, en comparación con las bombas de calor de aire y agua, es su eficacia constante durante todo el año, ya que no varía con la temperatura del aire exterior. La energía geotérmica destaca porque no requiere infraestructura de combustible externa, teniendo en cuenta que el calor nunca deja de ser suministrado desde el interior de la tierra. Las emisiones de gases de efecto invernadero para la producción de electricidad en comparación con la planta de energía a base de combustibles fósiles se reducen en más del 90% o se eliminan por completo. Esta fuente de energía se produce

de diversas maneras, por lo que es posible utilizarla para diferentes propósitos. El calor geotérmico de temperatura media se puede utilizar directamente para el procesamiento de alimentos, desecación de materiales, actividades agrícolas e invernaderos, acuicultura y fabricación de papel. Aunque estas aplicaciones de uso directo se han desarrollado y probado para ser muy exitosas, todavía son relativamente desconocidas y muy poco utilizadas. El uso más efectivo de la energía geotérmica se puede encontrar cuando la fuente y la tecnología disponibles coinciden con las necesidades del sector energético observado. El calor y la potencia combinados en sistemas de cogeneración e híbridos, así como las aplicaciones de bombas de calor, son opciones que ofrecen ahorros energéticos mejorados (Leveque et al., 2010). Muchos de los atributos de la energía geotérmica como su distribución generalizada, cargabilidad sin almacenamiento, una huella pequeña y bajas emisiones son deseables para alcanzar un futuro energético sostenible. La geotermia es uno de los pocos recursos de energía renovable que puede proporcionar energía continua con un mínimo impacto visual y ambiental, y no está expuestos a las fluctuaciones del precio del gas y su suministro.

8.1 Producción de energía geotérmica

La característica principal de las centrales geotérmicas es que están diseñadas como centrales eléctricas de carga base. Esto las diferencia de otras fuentes renovables, como la eólica y la solar, que son muy intermitentes. En consecuencia, debido a la generación de energía

interrumpida, y a menudo impredecible, de origen solar o eólico, estas instalaciones no pueden proporcionar una capacidad de carga base sólida. La potencia de carga base que sustenta la mayoría de los sistemas necesita ser confiable, teniendo en cuenta que la energía geotérmica nunca deja de emitirse desde el interior de la tierra, es una gran elección como fuente de energía de la central eléctrica de carga base. La primera producción de electricidad a partir de vapor geotérmico se instaló en Larderello, Italia, en 1904 (Leveque et al., 2010). Desde entonces, otros desarrollos hidrotermales, como el campo de vapor en The Geysers, California, los sistemas de agua caliente en Wairakei, Nueva Zelanda, México, Reykjavik, Islandia, Indonesia y Filipinas, han contribuido a la capacidad total instalada de generación eléctrica de casi 10.000 MWt a principios del siglo XXI, mientras que la capacidad de uso directo es de más de 100.000 MWt (Glassley, 2014). Otra característica importante de la generación de energía geotérmica es que no requiere infraestructura externa para combustible. Al encontrarse cerca de la central eléctrica, no hay necesidad de transporte de combustible, lo que la hace económica y ambientalmente deseable. Estudios recientes han demostrado que la energía geotérmica también puede ser flexible. Para que un recurso sea flexible, un generador requiere que la salida de energía de la instalación generadora pueda aumentar o disminuir a medida que cambia la demanda de energía eléctrica durante el día. La generación flexible requiere componentes de diseño adicionales y estrategias operativas que aún están en proceso de implementación completa. Tal como se aplica actualmente, la generación flexible se logra variando la

cantidad de fluido geotérmico caliente que se introduce en el equipo de generación de energía, ya sea mediante la derivación del equipo de generación a través del uso de circuitos de tuberías secundarias o mediante el estrangulamiento de la velocidad a la que se extrae el fluido geotérmico del reservorio. La producción de energía a partir de energía geotérmica depende de la capacidad de convertir el calor geotérmico de profundidad en electricidad. El equipo necesario para lograr esto es un complejo de tuberías que trae los fluidos calientes desde las profundidades hasta una instalación de turbinas en la superficie donde la energía térmica se convierte en energía cinética por una turbina giratoria. La energía cinética de la turbina se convierte en energía eléctrica mediante un generador eléctrico. Para que un centro geotérmico sea útil, debe tener la capacidad de producir vapor a una velocidad lo suficientemente alta como para que la generación de electricidad sea económicamente viable. Los costes de construcción, la inversión en exploración, el acceso a la infraestructura eléctrica y otras consideraciones tienen un gran efecto en la viabilidad económica de un centro, generalmente se considera que este necesita ser capaz de generar más de un MW de energía para poder ser utilizado. Si la planta está diseñada para una pequeña comunidad, unos pocos edificios industriales o un campus universitario, unidades de pocas decenas de kW, pueden ser viables económicamente. El recurso geotérmico debe ser evaluado en términos de presión en la entrada del pozo de la fuente, así como su relación con el caudal de fluido a través de la turbina. Los sistemas de vapor seco son raramente encontrados, pero son capaces de suministrar una significativa generación de

energía. Un ejemplo exitoso es el caso de los Geysers en California (Figura 1), con una capacidad instalada actual de aproximadamente 1400 MW, de los cuales 933 MW están operativos. Esto lo convierte en el sitio de generación de energía geotérmica más grande del mundo, con capacidad de producción adicional en desarrollo. Larderello, en Italia, es la única otra instalación de vapor seco que opera en el mundo. Se utilizan pozos que penetran de cientos a miles de metros en el subsuelo mediante sistemas de inyección que reponen reciclando agua condensada, y complementándola, si es necesario, con otras fuentes de agua. Existen varios tipos de embalses. Los depósitos de vapor seco tienen suficiente entalpía para vaporizar toda el agua disponible. Estos sistemas son los más simples de diseñar y tienen la mayor disponibilidad de energía de todos los recursos geotérmicos, pero son geológicamente poco comunes (Figura 8.1).

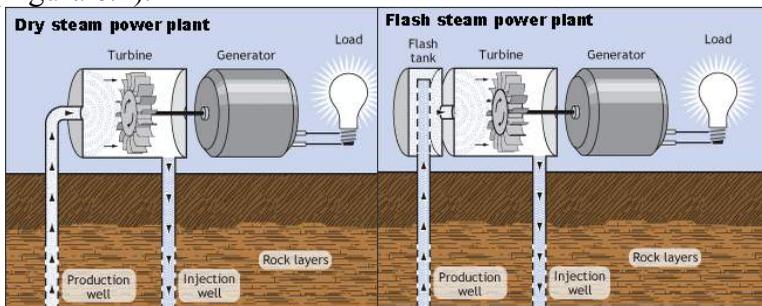


Figura 8.1. Planta de energía de vapor seco (www.energy.gov) **Figura 8.2.** Planta de energía de relámpago de vapor (www.energy.gov)

Otros sistemas hidrotermales más comunes generalmente poseen suficiente calor (temperaturas entre 160°C-250°C) a presiones elevadas para permitir que el agua se convierta en vapor cuando se acerca a la turbina (Figura 8.2). Cuando el vapor se enfría, se condensa en agua y se inyecta de nuevo en el suelo para volver a usarse. La potencia se genera en las plantas de generación de energía seca e hidrotermal mediante la expansión del vapor, que se enfría en una instalación de turbinas diseñada para extraer toda la energía que sea posible. Los recursos geotérmicos de temperatura más baja se pueden usar para generar energía utilizando plantas binarias que emplean un fluido, generalmente un compuesto orgánico como isopentano o propano o una solución de amoníaco y agua, que tiene una temperatura de ebullición significativamente inferior a la del agua. En una planta binaria, el agua geotérmica fluye a través de un intercambiador de calor, transfiriendo su calor al fluido de trabajo, y luego se reinyecta en el depósito (Figura 8.3). El uso de plantas binarias está creciendo, ya que requieren temperaturas más bajas, no emiten gases a la atmósfera y se pueden construir en forma modular (Leveque et al., 2010). Hoy en día, con casi 10.000 MWe de electricidad generada por energía geotérmica en todo el mundo, existen diversas tecnologías de conversión disponibles comercialmente (expansión directa de vapor, relámpago de vapor, ciclos orgánicos binarios Rankine, expansores de flujo de dos fases). Hay limitaciones inherentes a la conversión de la energía geotérmica en electricidad, debido a la menor temperatura de los fluidos geotérmicos en comparación con las temperaturas de combustión mucho más altas de los combustibles fósiles.

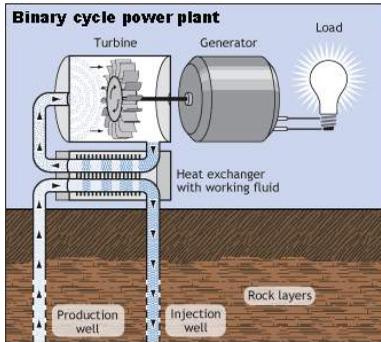


Figura 8.3. Central geotérmica de ciclo binario
(www.energy.gov)

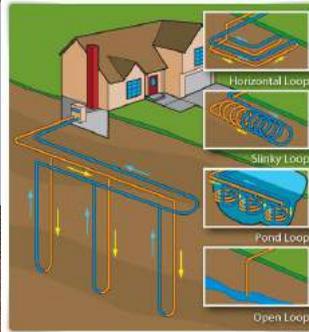


Figura 8.4. Central geotérmica de ciclo binario
(<http://www.dustymars.net/heat-pump-geothermal/>)

Las temperaturas más bajas dan un menor potencial de producción y menor eficiencia de calor como consecuencia de la Segunda Ley de la Termodinámica. El valor de la disponibilidad determina la cantidad máxima de energía eléctrica que se puede producir para un caudal determinado de geofluido producido, dada una temperatura y densidad o presión específicas. Los sistemas actuales de conversión geotérmica muestran que las eficiencias de utilización varían entre el 25% y el 50%. La futura práctica de la ingeniería iría encaminada a aumentarlas al 60% o más, lo que requiere nuevas inversiones en I+D para mejorar la transferencia de calor minimizando las diferencias de temperatura, aumentando los coeficientes de transmisión de calor y mejorando la eficacia mecánica de los convertidores como turbinas, turboexpansores y bombas.

Bombas de calor geotérmicas

Utilizan el calor de baja temperatura que se puede encontrar en el subsuelo a poca profundidad (<300 m de profundidad). El flujo de calor constante desde el interior de la tierra junto con el flujo solar hacia el suelo lo convierte en una fuente de energía con temperatura relativamente constante durante todo el año. Esto es muy importante en términos de eficiencia (la capacidad de calefacción y el COP de las bombas de calor aire/agua disminuyen mucho con temperaturas ambientales más bajas). Esta tecnología actualmente disponible proporciona los valores de COP en el rango de 3-5, lo que los convierte en la planta más eficiente en energía para los propósitos de HVAC. El tamaño y el diseño de estos sistemas son bien conocidos y desarrollados en la práctica, pero es crucial investigar adecuadamente las propiedades de la fuente geotérmica y vincularla con los requisitos de los sistemas de construcción (Figura 8.4).

Uso directo e energía geotérmica

Las aplicaciones de uso directo implican la introducción de energía térmica directamente en algunos procesos. La energía geotérmica con temperaturas en el rango 10 °C-150°C puede proporcionar el calor necesario para una amplia gama de necesidades industriales. A partir de 2010, se utilizaron aproximadamente 122 TWh/año de energía térmica para uso directo en todo el mundo, que se derivó de una capacidad instalada de 50,583 MW (Lund & Boyd, 2016). El crecimiento de las aplicaciones de uso directo refleja un rápido crecimiento internacional. En 1985, 11 países informaron de la utilización de más de 100 MW de esta energía. En 2010 aumentó a 78. El resumen del uso

directo se muestra en la Tabla 8.1 y la comparativa por años en la Figura 8.5.

Tabla 8.1. Resumen de la utilización de la geotermia en el mundo en 2015. (Lund & Boyd, 2016)

	Capacidad [MWt]	Utilización [TJ/year]
Bombas de calor geotérmicas	50,258	326,848
Calefacción de espacios	7,602	88,668
Calefacción invernadero	1,972	29,038
Calentamiento de estanques de acuicultura	696	11,953
Secado agrícola	161	2,030
Usos industriales	614	10,454
Bañarse y nadar	9,143	119,611
Enfriamiento/nieve derretida	360	2,596

Otros	79	1,440
Total	70,885	592,638

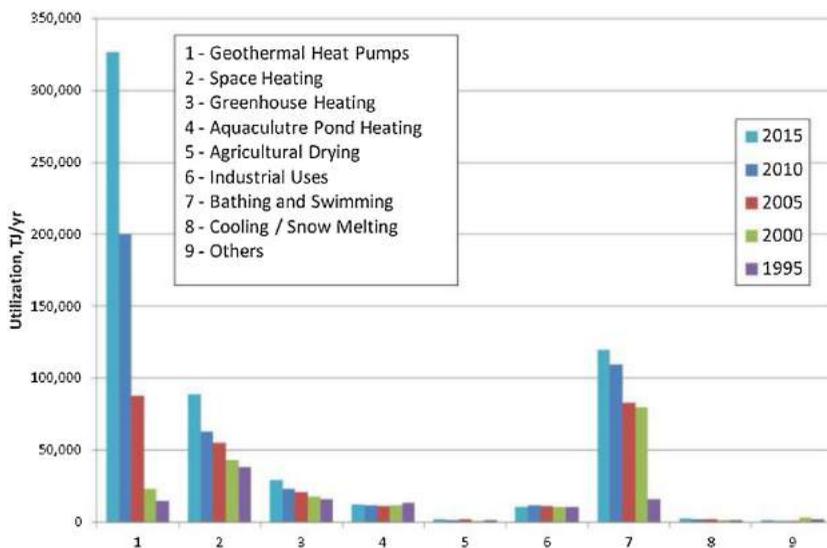


Figura 8.5. Comparación de la energía geotérmica de uso directo en todo el mundo (Lund & Boyd, 2016)

Un sistema de uso directo debe evaluarse con detalle para determinar las pérdidas de calor, la demanda y la magnitud del potencial suministro de calor geotérmico. Se puede aumentar la eficiencia de este recurso de temperatura baja a moderada combinando varias aplicaciones en forma de cascada, para utilizar la máxima cantidad de calor. Una ventaja de las aplicaciones geotérmicas de uso directo es que reducen o eliminan la energía proveniente de combustibles fósiles, las emisiones de gases de efecto

invernadero y el riesgo de incendio al eliminar la combustión, proporcionando significativos beneficios sobre las tecnologías tradicionales.

Calefacción urbana

En 2010, la calefacción ambiental representó 63.025 TJ/año del total de 423.830 TJ/año de energía consumida a través de aplicaciones de uso directo, mientras que en 2015 fue de 88.688 TJ/año del total de 592.638 TJ/año. Ese es el tercer objetivo de aplicación del uso directo de la energía geotérmica en todo el mundo (Figura 5), formando parte de la red de calefacción urbana que suministra a los edificios el calor necesario. El sistema comprende fuente de calor geotérmica, red de tuberías, sistema de control y sistema de eliminación o reinyección. Si la temperatura del fluido geotérmico es lo suficientemente alta ($> 65\text{ }^{\circ}\text{C}$), el agua caliente extraída de un pozo poco profundo o de un manantial se introduce directamente en el sistema, con la eliminación directa del fluido. Con temperaturas moderadas ($50\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $65\text{ }^{\circ}\text{C}$), el fluido de la fuente geotérmica se lleva al intercambiador de calor que permite la transferencia de calor en la red de circuito cerrado. Para sitios con bajas temperaturas disponibles, se recomienda el uso de bombas de calor, que requieren energía adicional.

Como parte de un estudio financiado con fondos europeos, se ha publicado en línea un "Atlas térmico paneuropeo" (Figura 8.6), que muestra las diferentes opciones de la calefacción urbana en Europa, demanda actual de calor, potencial de energía solar, biomasa y energía geotérmica. Esta herramienta de planificación energética proporciona una base para que los gobiernos, las empresas, los consultores, los académicos y los planificadores europeos

tomen decisiones informadas sobre las inversiones en medidas de eficiencia energética y el uso de fuentes de energía alternativas sin explotar para calefacción y refrigeración.

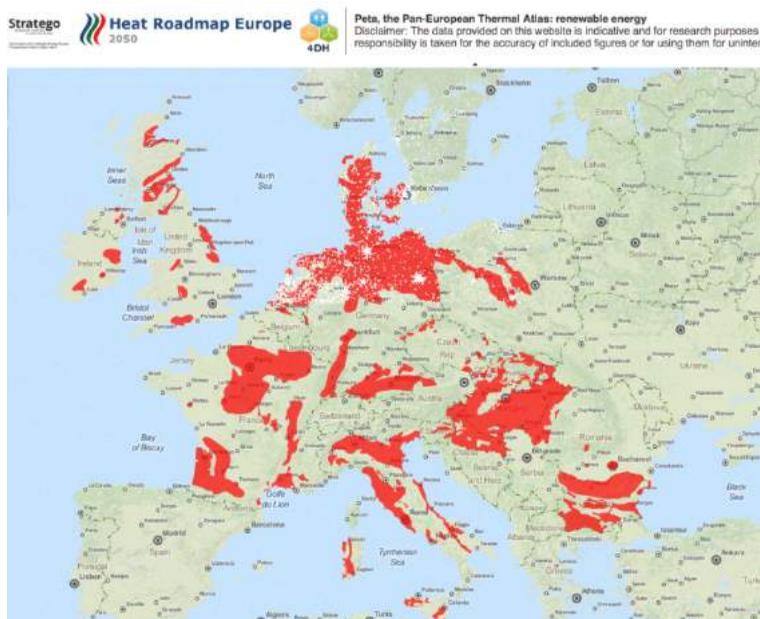


Figura 8.6. Atlas termal europeo (Fuente: heatroadmap.eu)

Acuicultura

Una de las aplicaciones más simples de los fluidos geotérmicos es la acuicultura. Los fluidos geotérmicos pueden usarse para criar diversas especies de peces como pargos, lubinas, salmonetes, anguilas, salmones, truchas, peces tropicales, langostas, algas, gambas, camarones, mejillones, vieiras, etc. El calor geotérmico es utilizado

para optimizar la temperatura de reproducción, crecimiento y salud de las especies de interés.

La desecación

El calor geotérmico se usa a menudo para desecar productos alimenticios, como cebollas, carne, frutas, patatas, especias, azúcar, pero también materiales como madera, bloques de hormigón y otros. El uso de calor geotérmico para este propósito permite ahorros en el combustible en comparación con las calderas convencionales alimentadas con combustibles fósiles. Como no hay combustión, no hay riesgos de incendio. Además, la combinación de calor y electricidad en sistemas híbridos y de cogeneración, y como fuente de calor y sumidero para aplicaciones de bombas de calor, son opciones que ofrecen ahorros de energía mejorados.

8.2 Impacto ambiental del uso de energía geotérmica

Los resultados del análisis del ciclo de vida completo de los sistemas de energía geotérmica muestran que su impacto ambiental es significativamente menor en comparación con las centrales eléctricas convencionales (Leveque et al., 2010). Teniendo en cuenta que esta fuente de energía renovable se encuentra bajo tierra, y las infraestructuras de estos sistemas es compacta, su impacto en el entorno es pequeño. Las emisiones de GEI son mínimas. La disponibilidad y la consistencia de la energía geotérmica le permiten ser una fuente confiable, por lo que no es necesario ningún sistema de almacenamiento o de reserva. No es necesario que esta fuente se produzca en un

lugar y luego se distribuya a gran distancia, de manera que, si se compara con fósiles o biomasa, se obtienen ahorros significativos. Estos ahorros se refieren no solo a los costos de transporte, sino también a los ahorros en emisiones de GEI derivadas de su transporte. Hay descargas mínimas de nitrógeno u óxidos de azufre resultantes de su uso, y no se generan materiales radiactivos. La conclusión general de todos los estudios publicados recientemente es que las emisiones y otros impactos de las plantas geotérmicas son significativamente menores que otras formas de generación eléctrica (Tester et al., 2006). El impacto ambiental de las bombas de calor es bastante limitado porque generalmente se instalan durante la construcción del edificio y normalmente utilizan un intercambiador de calor subsuperficial, enterrado muy por debajo de la línea de congelación. Sin embargo, existen algunos impactos potenciales que deberían evaluarse antes de un uso más generalizado de la energía geotérmica. Los potenciales impactos ambientales incluyen: emisiones gaseosas, uso y contaminación del agua, emisiones de sólidos, contaminación acústica, uso y subsidencia del suelo, sismicidad inducida y deslizamientos de tierra, alteración del hábitat natural de la vida silvestre y la vegetación e impacto visual. A pesar de esta larga lista, las tecnologías de energía geotérmica actuales presentan un impacto ambiental global mucho más bajo que las plantas convencionales de energía nuclear y de combustibles fósiles. Los problemas de ruido, seguridad, impactos visuales y las operaciones de perforación son importantes, pero totalmente manejables.

Emisiones gaseosas

Las plantas geotérmicas de vapor e inyección emiten mucho menos CO₂ por MWh en comparación con las plantas de energía alimentadas con combustibles fósiles, mientras que las plantas binarias prácticamente no tienen emisiones de CO₂. Las concentraciones de contaminantes como el óxido de nitrógeno (NOx) y dióxido de azufre (SO₂), en las corrientes de descarga gaseosa de vapor geotérmico y plantas de evaporación instantánea son extremadamente pequeñas. Los datos publicados recientemente indican que las plantas geotérmicas son mucho más benignas para el medio ambiente que las otras plantas convencionales.

La contaminación del agua

Los fluidos provenientes de la perforación pueden contener minerales disueltos. La cantidad aumenta con la temperatura del fluido, por lo que para la fuente de nivel de temperatura alta (>230 °C), es necesario investigarlo. Algunos elementos, como el boro y el arsénico, pueden contaminar el suelo y el agua y producir un impacto negativo en los hábitats y la vegetación locales. Si la carcasa del pozo está dañada, estos fluidos pueden penetrar en el terreno y dañar el medio ambiente. Por lo tanto, es necesario monitorear el sitio en la fase de perforación y operación para evitar fugas peligrosas. En general, existe un peligro muy pequeño de contaminación del medio ambiente ya que todo el fluido producido se reinyecta.

Emisiones sólidas

Prácticamente no hay posibilidad de contaminación de las instalaciones de la superficie o el área circundante por la descarga de sólidos del geofluido. La única situación posiblemente peligrosa podría ser un accidente asociado con un tratamiento de fluidos o un sistema de recuperación de minerales que causaría el derrame de sólidos en el medio ambiente. Para estar seguro, es aconsejable tener cuidado en los casos en que se requiera que el fluido se trate químicamente para eliminar los sólidos. Los productos químicos utilizados en este proceso pueden ser tóxicos y estar sujetos a eliminación regulada.

Contaminación acústica

El ruido causado por los sistemas geotérmicos no es significativamente diferente de otras instalaciones industriales. Los niveles más altos se dan en la fase de perforación (80 a 115 dBA). Durante el funcionamiento normal del sistema, los niveles de ruido a una distancia de 900 m no son superiores a 71-83 dBA. Estos niveles son significativamente más bajos cuando nos alejamos de la fuente, por lo que teniendo en cuenta que las plantas geotérmicas están ubicadas en una gran área de reserva geotérmica, no debería haber problemas evidentes con el ruido. En comparación, las áreas urbanas congestionadas suelen tener niveles de ruido de alrededor de 70-85 dBA, mientras que vivir cerca de una autopista importante implica 90 decibelios.

Uso del suelo

El impacto de la central geotérmica en el suelo depende de las propiedades del fluido geotérmico y de la descarga de desechos. Normalmente, estas plantas se construyen en el emplazamiento cercano al embalse, debido a las pérdidas de presión y temperatura que pueden ocasionar las tuberías. Con el fin de evitar una influencia demasiado grande en el área y permitir la agricultura u otros usos de la tierra, las tuberías se pueden recoger y montar en pilares y barandillas. Por lo tanto, la huella total de la central junto con el equipo auxiliar es relativamente pequeña (Tester et al., 2006).

Referencias

Glassley, William E. (2014). *Geothermal energy: renewable energy and the environment*. CRC Press.

Leveque, Francois, Glachant, Jean-Michel, Barquin, Julian, von Hirschhausen, Christian, Holz, Franziska, & Nuttall, William J. (2010). *Security of Energy Supply in Europe. Natural Gas, Nuclear and Hydrogen*. Edward Elgar.

Lund, John W, & Boyd, Tonya L. (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 60, 66-93.

Tester, Jefferson W, Anderson, Brian J, Batchelor, Anthony S, Blackwell, David D, DiPippo, Ronald, Drake, E, . . . Nichols, Kenneth. (2006). The future of geothermal energy: Impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century. *Massachusetts Institute of Technology*, 209.

CAPÍTULO 9

ENERGÍA HIDROELÉCTRICA

Autor: Aleksandra SRETENOVIC

Universidad de Belgrado, Belgrado, Serbia.

e-mail: asretenovic@mas.bg.ac.rs

Resumen: En este capítulo se describe el uso y la potencialidad de la energía hidroeléctrica. Hay diferentes formas de clasificar las hidroeléctricas según los tipos de embalse, sistemas fluviales, almacenamientos por bombeo y sistemas hidroeléctricos de pequeña escala. Se explican las tecnologías más utilizadas: turbina Impulse (Pelton, Cross Flow) y turbina Reaction (Propeller, Frances, Kinetic). Se describe el impacto ambiental de las plantas hidroeléctricas, destacando la diferencia entre las plantas a gran escala, que ya no se consideran hidroeléctricas "ecológicas" y las de pequeña escala.

Objetivos pedagógicos:

Al final de este capítulo el estudiante será capaz de,

- Comprender el potencial y la disponibilidad de la energía hidroeléctrica para la producción de electricidad
- Discutir las ventajas y desventajas de la producción de energía hidroeléctrica (aspecto económico, social y ambiental)

- Comprender los posibles impactos ambientales de los sistemas de energía hidroeléctrica a gran escala y a pequeña escala
- Conocer el uso de la energía hidroeléctrica (tipos de sistemas y turbinas utilizados)

9.1 Sistemas de energía hidroeléctrica

La energía hidroeléctrica es una tecnología madura que actualmente se utiliza en unos 160 países para producir electricidad. Con una capacidad total de aproximadamente 1.060 GWe (19,4% de la capacidad eléctrica mundial en 2011), la energía hidroeléctrica genera alrededor de 3.500 TWh al año, lo que equivale al 15,8% de la generación eléctrica mundial de 2011. Las centrales hidroeléctricas proporcionan al menos el 50% del suministro total de electricidad en más de 35 países. Una de sus ventajas es que proporcionan control de inundaciones e irrigación. El uso de la energía hidroeléctrica para producir electricidad es muy rentable. Ofrece alta eficiencia con bajos costos de operación y generación, aunque el costo de inversión inicial es significativo. Otra característica clave es la flexibilidad operativa. La capacidad de las centrales hidroeléctricas puede variar en un rango del 23%-95%, dependiendo de los objetivos y el servicio (es decir, carga base, carga pico) de la central eléctrica específica.

El potencial técnico mundial de la energía hidroeléctrica es muy importante, y se estima que ronda los 15.000 TWh al año. La mitad de este potencial total está disponible en Asia y el 20% en América Latina. En Europa, África, América Latina y Asia todavía existe un gran potencial técnico sin explotar. Incluso en las regiones más

desarrolladas de la hidroelectricidad, Europa, todavía queda alrededor del 50% del potencial no utilizado. En el caso de las pequeñas centrales hidroeléctricas, se estima que el potencial es de 150-200 GWe. Hasta la fecha, sólo alrededor del 20% de este potencial ha sido explotado.

Sin embargo, los grandes proyectos hidroeléctricos pueden encontrar oposición social debido a su impacto en la disponibilidad de agua, los ecosistemas y el medio ambiente, y la necesidad de reubicar a las poblaciones que pueden verse afectadas por el proyecto. Los principales problemas de las centrales hidroeléctricas incluyen la aceptación pública, los altos costos de inversión inicial y los largos períodos de amortización, los largos ciclos de aprobación y construcción y los largos plazos para obtener o renovar los derechos de concesión y las conexiones a la red eléctrica. Es probable que estos desafíos limiten el potencial hidroeléctrico implementable. Los sistemas hidroeléctricos pueden clasificarse de la siguiente manera (Egré & Milewski, 2002):

- sistemas con gran capacidad de almacenamiento
- sistemas con poca o ninguna capacidad de almacenamiento y sistemas de desviación de ríos
- almacenamiento por bombeo
- micro y mini sistemas hidroeléctricos

Tipos de estanques

Los estanques (Figura 9.1) retienen agua detrás de una presa para permitir la regulación del flujo durante todo el año. También proporciona una reserva de energía para

satisfacer la demanda de electricidad durante las estaciones secas y/o los períodos de demanda máxima.

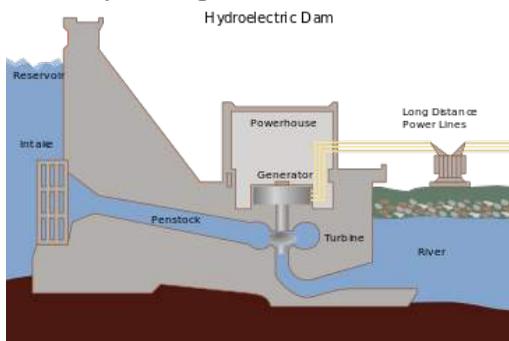


Figura 9.1. Hidroeléctrica tipo embalse
(<https://en.wikipedia.org>)

Los impactos ambientales de estos sistemas se originan en:

- las actividades de construcción de la presa, los diques, los terraplenes y la planta de energía
- las infraestructuras (vías de acceso, líneas eléctricas, subestaciones, etc.)
- los cambios en el caudal del río
- la creación de un reservorio, que genera cambios ecológicos importantes en el entorno y también transformaciones del uso de la tierra, como el reasentamiento de las comunidades y las actividades de producción.

Sistemas de energía hidroeléctrica de pasada

Se utiliza el flujo de agua natural de un río sin necesidad de una reserva o estanque. Pueden diseñarse con cabeza pequeña, generalmente en ríos grandes con gradientes suaves, o con cabeza alta, generalmente en ríos pequeños con pendientes pronunciadas. Los proyectos (Figura 9.2)

pueden usar todo el caudal del río o sólo una parte del mismo. La cantidad de energía producida por estos sistemas que utilizan todo el caudal del río puede variar considerablemente a lo largo del año, ya que depende de la descarga del río. La mayoría de las plantas fluviales están concebidas para proporcionar la misma producción de energía durante todo el año utilizando sólo una parte del caudal del río. Una estrategia común para optimizar la producción de energía de las plantas de energía hidroeléctrica en un río es construir un gran depósito de almacenamiento en la cuenca superior, que igualará el curso río abajo. En todos los proyectos de pasada, la ausencia de un reservorio considerable ayuda a limitar considerablemente los impactos sociales y ambientales, ya que el río no se transforma en un lago.

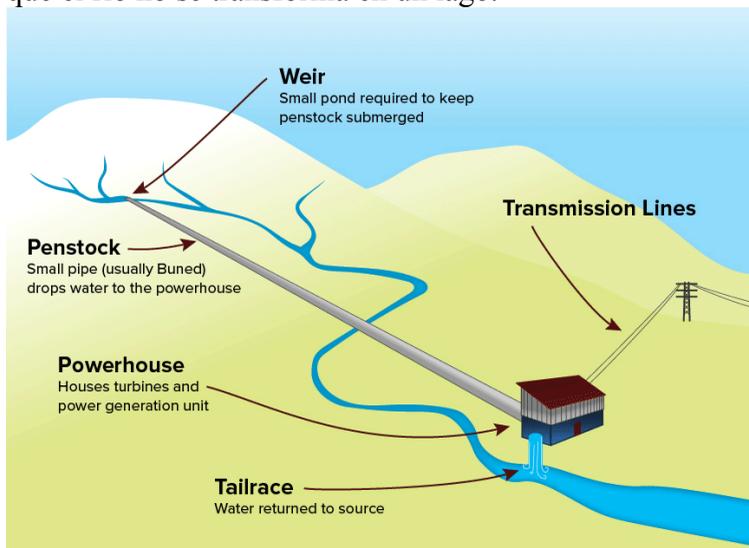


Figura 9.2. Diagrama de hidroenergía de un río
(<http://nextgenerationhydro.ca/resource-centre/hydro-basics/>)

Sistemas hidroeléctricos de desviación de ríos

La desviación del río consiste en:

- Desvío en el curso: un río se represa y el flujo de agua se desvía a través de túneles hacia la ladera de la montaña para descargar aguas abajo en su lecho.
- Desviación de cuencas cruzadas: esta estrategia aumentará el flujo del río receptor donde se encuentra la central eléctrica y disminuirá el flujo aguas abajo del río desviado.

Con las desviaciones in-stream, el objetivo es aumentar la altura de la planta de energía, aumentando así la potencia y la energía disponibles. En el caso de las desviaciones en la cuenca, el resultado es un aumento de la energía, al aumentar el caudal de la corriente donde se encuentra la planta de energía. El impacto ambiental producido por la desviación es una reducción severa o total del caudal justo después de la misma, lo que puede afectar la erosión costera aguas abajo, la temperatura y la calidad del agua. La magnitud de tales impactos se produce en la biología acuática de los ecosistemas afectados. También existe el riesgo de propagar especies, peces o plantas no deseadas, entre cuencas. En última instancia, aparece un nuevo equilibrio ecológico, con la colonización del borde del río por plantas, arbustos y fauna terrestre en ríos de poco caudal, y un aumento en los hábitats de agua en los ríos de mayor caudal. La medida más efectiva es garantizar un flujo ecológico mínimo aguas abajo, a fin de mantener un hábitat fluvial y usos de la tierra (pesca, navegación, suministro de agua urbana e industrial, etc.). El flujo de la mayoría de los ríos naturales varía significativamente de

una estación a otra, y algunos ríos se secan completamente durante la época estival. El ecosistema de cada río se ha ajustado con el tiempo al patrón de caudal del mismo. El diseño de un flujo ecológico en un río desviado puede basarse en los hábitats de las especies acuáticas más valoradas del mismo, a fin de minimizar las pérdidas, p.e., de zonas de desove. También se pueden construir pequeñas presas para asegurar un nivel de agua similar a las condiciones previas a la desviación.

Sistemas de energía hidroeléctrica de almacenamiento por bombeo

Las plantas de bombeo (Figura 9.3) bombean agua hacia un depósito de almacenamiento superior durante las horas de menor actividad utilizando electricidad excedente de las plantas de energía de carga base. Invierten el flujo para generar electricidad. Se consideran una de las tecnologías más eficientes disponibles para el almacenamiento de energía. El concepto de bombeo de agua al depósito superior durante horas de menor actividad significa que estas plantas son consumidoras netas de energía: se necesita más energía para bombear agua hacia el depósito superior que la que produce la planta cuando el agua se precipita hacia abajo. En general, del 65% al 75% de la electricidad requerida por el bombeo se recupera durante la fase de generación.

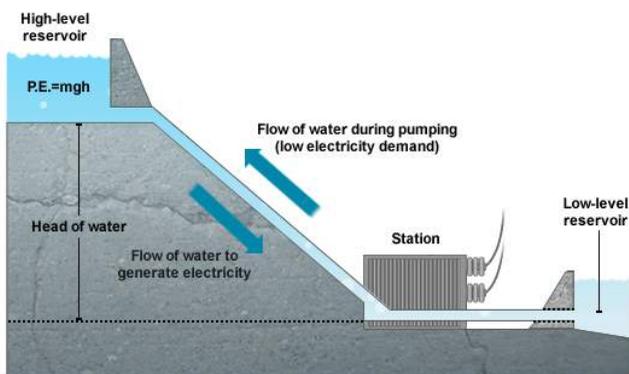


Figura 9.3. Sistema hidroeléctrico de bombeo
 (<http://energystoragesense.com/pumped-hydroelectric-storage-phs/>)

El desarrollo de estas plantas es rentable cuando hay otras plantas productoras como las centrales de carbón o las nucleares. En tales casos, el costo del pico de electricidad puede ser el doble o más que el costo de la electricidad fuera de temporada. Un pequeño pozo superior que se vacía muy rápidamente en intervalos cortos, una o dos veces por semana, caracteriza las plantas de almacenamiento bombeadas. La reducción en el depósito superior es, por lo tanto, muy significativa. Las plantas de almacenamiento a bombeo algunas veces pueden usar un río, un lago o un embalse existente. Los problemas ambientales asociados relacionan principalmente con la ubicación de la piscina superior, la central (subterránea o sobre el suelo) y el ecosistema del reservorio inferior. Estos problemas se pueden abordar durante la fase de diseño del proyecto.

Sistemas hidroeléctricos pequeños, mini y micro

En comparación con los grandes proyectos, las plantas de pequeña escala se benefician de un período de planificación y construcción más corto, una menor inversión y pequeñas áreas de terreno. La energía hidroeléctrica a pequeña escala se usa a menudo como alternativa o en combinación con generadores diésel en zonas rurales.

Los impactos ambientales son proporcionales al área inundada. Desde un punto de vista ambiental, la distinción entre represas pequeñas renovables y grandes presas no renovables es algo arbitraria. No es el tamaño el que define si un proyecto es renovable y sostenible o no, sino las características específicas del proyecto y su ubicación. La pregunta que surge es: ¿qué es menos dañino para el medioambiente? ¿Una planta de energía muy grande, en un río, con una capacidad instalada de 1000 MW, o 200 pequeñas centrales hidroeléctricas de 5 MW en 100 ríos? ¿Podría el impacto global de un solo proyecto de 1000MW ser menor que el impacto acumulativo de 200 pequeños proyectos hidroeléctricos de 5MW, debido a la cantidad de ríos y afluentes que se verán afectados? Aunque es obvio que una intervención humana más pequeña en un hábitat específico tiene menos impactos que una intervención muy grande en el mismo hábitat, uno debe comparar los proyectos hidroeléctricos basados en la energía y la energía producida. Desde este punto de vista, los impactos acumulativos de una multitud de pequeños proyectos hidroeléctricos podrían ser mayores que los de un solo proyecto, dada la diversidad de ecosistemas que podrían verse afectados y la superficie acumulada mucho mayor

que se inundaría para un volumen de almacenamiento equivalente con pequeños proyectos.

Las principales **ventajas** de la producción de energía hidroeléctrica (Okot, 2013):

- Aspectos económicos
 - Bajo coste de mantenimiento
 - Tecnología duradera: 50 años o más
 - Produce muy pocas emisiones de GEI.
 - Fuente de energía confiable
 - Promueve el desarrollo regional creando oportunidades de empleo
 - Utiliza la tecnología probada y conocida con la más alta eficiencia

- Aspectos sociales
 - Mejora el nivel de vida
 - Deja el agua disponible para otros usos
 - Proporcionar protección contra inundaciones
 - Puede mejorar las condiciones de navegación
 - Mejora la accesibilidad del territorio y sus recursos

- Aspectos económicos
 - No produce ningún contaminante atmosférico y solo muy pocas emisiones de GEI
 - No se produce ningún desperdicio
 - Evita el agotamiento de los recursos de combustible no renovables
 - Disminuye el cambio climático

Las principales **desventajas**:

- Aspectos económicos
 - Alto costo de capital
 - Requiere participación multidisciplinaria
 - Se requiere planificación a largo plazo y un acuerdo a largo plazo

- Aspecto social:
 - Puede conducir al reasentamiento
 - Las represas en una gran área reducen el acceso público, afectando a las actividades recreativas al aire libre
 - Las líneas eléctricas pueden cambiar el paisaje
 - La gestión de los usos del agua es necesaria

- Aspecto ambiental
 - Conlleva barreras para la migración y el arrastre de los peces
 - Implica la modificación de hábitats acuáticos
 - Requiere la gestión de la calidad del agua
 - Las poblaciones pueden necesitar ser monitoreadas
 - Las áreas ricas en flora y biodiversidad producen emisiones de carbono

La figura 9.4 muestra los componentes de un esquema hidroeléctrico simplificado (Okot, 2013). El principio básico de la energía hidroeléctrica se basa en la conversión de la presión del agua H_g (m) en energía mecánica que posteriormente puede utilizarse para impulsar un generador u otra máquina, ya que las turbinas hidráulicas

convierten la presión del agua en potencia mecánica del eje, de manera directamente proporcional al caudal volumétrico. Generalmente, la potencia hidráulica P_0 (kW) y la energía correspondiente E_0 (kWh) para un intervalo de tiempo dado es:

$$\Delta t(\text{h})$$

$$P_0 = \rho g Q H$$

$$E_0 = \rho g Q H \Delta t$$

Donde ρ es la densidad del agua (kg/m^3) y g la gravedad (m/s^2).

La potencia final P generada en la red viene dada por

$$P = \eta P_0$$

donde η es la eficiencia hidráulica del turbogenerador.

Esta sigue siendo la forma más eficiente de generar electricidad. Las turbinas hidráulicas modernas son capaces de convertir hasta el 90% de la energía disponible en electricidad, aunque esto se reduce con el tamaño. Los sistemas microhidroeléctricos tienden a estar en el rango de 60-80% de eficiencia.

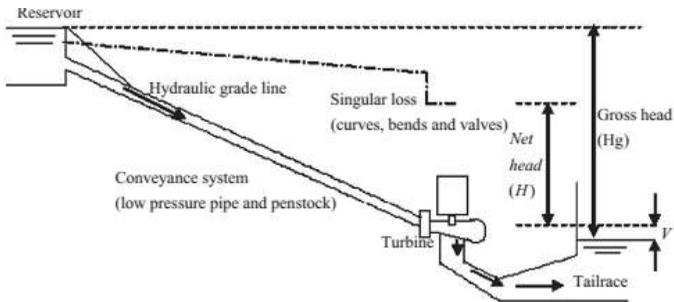


Figure 9.4. Componentes de un sistema hidroeléctrico Okot, 2013)

Turbinas de agua

Actualmente, hay varios diseños de turbinas de agua en uso, mientras que cada uno tiene sus propias ventajas y desventajas y un rango de operación óptimo. Teniendo en cuenta que la potencia de salida de la turbina depende de la combinación de cabezal, volumen de agua y presión de agua en las cuchillas, es necesario seleccionar adecuadamente el tipo de turbina más adecuado para la instalación seleccionada. Las turbinas más utilizadas se pueden dividir en:

- Diseño de una turbina de reacción: las cuchillas están metidas en una carcasa presurizada y sumergidas por completo en agua. La diferencia de presión entre las cuchillas hace que las cuchillas giren rápidamente.
- Diseño de una turbina de impulso: el flujo de agua golpea las palas de la turbina desde uno o más chorros de agua (boquillas). La salida de potencia mecánica de una turbina de impulso se deriva de la energía cinética del flujo de agua.

La potencia mecánica de una turbina de impulso se deriva de la energía cinética del flujo de agua.

Además del tipo de operación, las turbinas se pueden categorizar por el diseño, la estructura y el diseño de las palas. Las Turbinas Pelton, Turgo o Kaplan llevan el nombre de sus inventores. La diferencia entre elevaciones más altas y más bajas de agua (donde se almacena la energía potencial) es la cabeza del sistema. En general, en sistemas de energía hidroeléctrica e hidroeléctrica, una baja altura significa una distancia vertical de menos de 30 m, una mediana significa una distancia vertical de entre 30 y 150 m, mientras que una altura alta significa una distancia vertical mayor que 150 m.

La **turbina de agua Pelton (Rueda Pelton)**, que lleva el nombre de su inventor Lester Pelton, es el diseño de rueda de turbina de tipo abierto más utilizado (Figura 9.5). Es una turbina de impulso más adecuada para alta presión y bajo flujo de agua. A lo largo del perímetro de la rueda hay pequeñas copas curvas (cubos). El chorro de agua de alta velocidad inyectado a través de las boquillas golpea estas copas e induce una fuerza de impulso que hace que la turbina gire. El componente más importante de la rueda Pelton es el cucharón, que se divide en dos mitades, donde cada mitad se gira y se desvía hacia atrás. La forma especial hace que el chorro gire casi 180 grados.

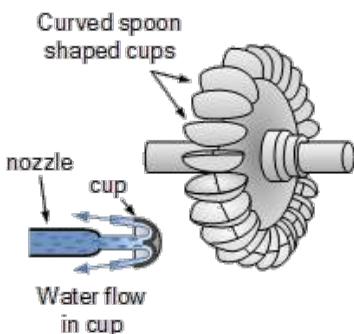


Figura 9.5. Turbina Pelton
 (http://www.alternative-energy-tutorials.com)



Figura 9.6. Turbina Turgo
 (http://www.alternative-energy-tutorials.com)

La energía potencial generada por el chorro de agua se convierte en energía cinética a través de estas boquillas y entra en la propulsión de las copas. Los chorros de agua de las boquillas empujan contra las copas de la turbina haciendo que la rueda gire, produciendo torque y potencia. La turbina Pelton gana energía mecánica puramente debido al cambio en la energía cinética del chorro. Dependiendo del cabezal de agua disponible y el número de boquillas colocadas tangencialmente alrededor de la rueda, la velocidad y dirección de los chorros de agua que provienen de estas boquillas se puede controlar para permitir una velocidad constante más baja que es ideal para la generación de energía eléctrica. La velocidad de una turbina Pelton se puede controlar ajustando el flujo de agua a las copas o cubetas a través de las boquillas.

La **Turbina de Agua Turgo** es otro diseño de turbina de agua tipo impulsión en el que el chorro de agua de alta

velocidad golpea las palas de las turbinas (Figura 9.6). La diferencia en comparación con la rueda Pelton es que el chorro golpea el plano del cubo en un ángulo de aproximadamente 20°. Las cuchillas curvas atrapan el agua y hacen que el eje de la turbina gire. Debido a la mayor velocidad de flujo, una turbina Turgo puede tener una rueda de diámetro mucho más pequeño que un Pelton equivalente para la misma cantidad de potencia de salida, lo que les permite girar a velocidades más altas. Sin embargo, la rueda Turgo es menos eficiente que la rueda Pelton.

La **Turbina de Agua Francis**, llamada así por su inventor James Francis, es un diseño con reacción de flujo radial en el que todo el conjunto de la rueda de la turbina está sumergido en agua y rodeado por una carcasa (Figura 9.7). El agua entra a la carcasa bajo presión y es guiada a través de un conjunto de ranuras fijas o ajustables llamadas paletas guía alrededor de la carcasa que dirigen el flujo de agua a las palas de las turbinas en el ángulo correcto, entrando radialmente en las palas y emergiendo axialmente, lo que hace que gire.

Una turbina Francis es similar a una turbina propulsora que utiliza presión de agua y energía cinética para girar las cuchillas. La energía del agua se transfiere al eje de salida de la turbina. Las palas internas de las turbinas son fijas y no pueden ajustarse para mantener una velocidad constante, el flujo de agua se ajusta cambiando el ángulo de las paletas. Esta turbina requiere una cantidad relativamente grande de agua.

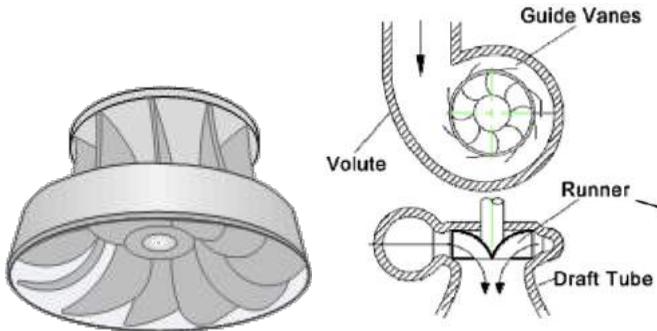


Figura 9.7. Francis Turbine Turbine (<http://www.alternative-energy-tutorials.com>), (Okot, 2013)

(<http://www.alternative-energy-tutorials.com>), (Okot, 2013)

La **turbina de agua Kaplan**, que lleva el nombre de su inventor austríaco Víctor Kaplan, es de reacción de flujo axial que se parece mucho a la hélice de un barco (Figura 9.8). También se conoce como turbina de hélice. El rotor en forma de hélice tiene dos o más cuchillas fijas o ajustables. La operación en una turbina Kaplan es inversa a la de una hélice de barco. El agua entra en el eje de la turbina en una dirección radial. El ángulo y la posición de las palas hacen que el agua gire y produzca un vórtice cerrado aplicando una fuerza angular sobre las palas. Una de las principales ventajas de la turbina Kaplan es que pueden utilizarse en aplicaciones de muy baja altura, siempre que haya velocidades de flujo de agua suficientemente grandes a través de la turbina, sin necesidad de diques y represas que causen un impacto insignificante en el medioambiente. También dependiendo de la cantidad o variabilidad en la cantidad de agua que fluye a través de la turbina, el paso (ángulo de ataque) de las palas de la hélice se puede ajustar permitiendo un

mayor control del flujo de agua y aumentando la eficiencia. Sin embargo, las palas de hélice ajustables se suman a la complejidad de la construcción del diseño de una turbina Kaplan.

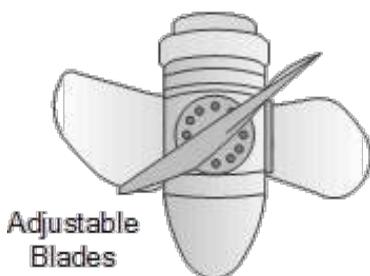


Figura 9.8. Turbina Kaplan
(<http://www.alternative-energy-tutorials.com>)

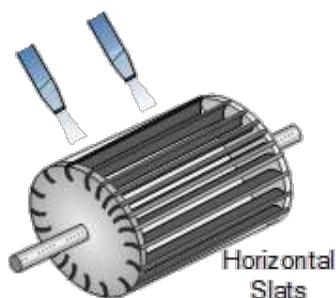


Figura 9.9. Turbina de flujo cruzado
(<http://www.alternative-energy-tutorials.com>)

La **turbina de agua de flujo cruzado**, (**turbina Michell-Banki**) es una turbina tipo impulsión que tiene un rotor en forma de tambor y utiliza una boquilla alargada de sección rectangular que está dirigida contra paletas curvas sobre un eje de forma cilíndrica (Figura 9.9). Las turbinas de flujo cruzado son menos eficientes que las turbinas Pelton, Turgo, Francis y Kaplan, pero pueden acomodar grandes flujos de agua a cabezas más bajas. El agua entra en los listones a través de una boquilla rectangular vertical simple o doble y a lo largo de toda la longitud del cilindro. Estas boquillas convierten la energía potencial del agua en energía cinética. Después de golpear la primera cuchilla, el agua cae a través del tambor y se dirige al lado opuesto. La energía del agua se utiliza dos veces, una desde arriba

y otra desde abajo para girar la rueda de la turbina alrededor de su eje central, proporcionando una eficiencia adicional. La ventaja de esta turbina es que mantiene su eficiencia bajo diferentes condiciones de carga y flujo de agua. Debido a su sencilla construcción, buena regulación y la poca cantidad de agua para operar, son ideales para su uso en sistemas de mini y microhidroeléctricas. La selección del mejor tipo de diseño de turbina de agua para la situación específica a menudo depende de la cantidad de cabeza y caudal disponible en su ubicación particular y si está en el lado de un río o arroyo, o si el agua se va a canalizar o canalizado directamente a la ubicación.

La figura 9.10 muestra los diseños de turbinas que funcionan mejor según la altura del cabezal y la presión del agua en el lugar.

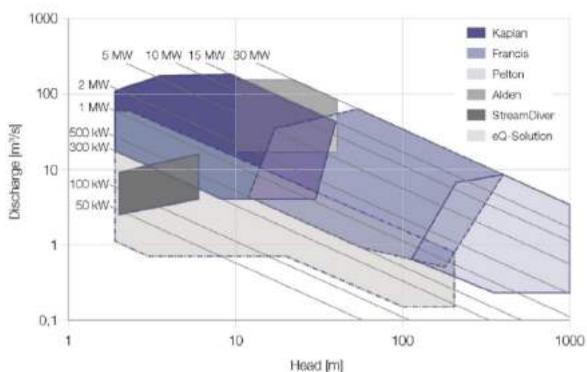


Figura 9.10. Tipología de pequeñas centrales hidroeléctricas según cabezal, capacidad y descarga (Voith, 2013)

9.2 Impactos medioambientales

Los grandes proyectos hidroeléctricos a veces son controvertidos por varias razones: pueden afectar significativamente la disponibilidad de agua en grandes regiones geográficas, perturbar los ecosistemas naturales, obligar a la reubicación de la población en contra de su voluntad y requieren una gran infraestructura. Estas son las razones principales por las que algunos ecologistas y activistas medioambientales afirman que las centrales hidroeléctricas a gran escala no son una forma deseable de producir electricidad, y tampoco son tan "ecológicas" como podrían parecer a primera vista. Es evidente que la energía hidroeléctrica genera numerosos beneficios económicos y sociales además de la electricidad producida, como el riego, el suministro de agua, el control de los alimentos y las actividades recreativas. Aunque el desarrollo hidroeléctrico ha sido tradicionalmente considerado un recurso de energía verde, los estudios publicados diferencian entre la "pequeña hidroeléctrica" como renovable y sostenible, y la "gran hidroeléctrica", que no lo es (Pang, Zhang, Ulgiati y Wang, 2015). Desde mediados de la década de 1970, se han estudiado en los grandes proyectos los factores relativo a: la interrupción del transporte de sedimentos, la migración de peces, los flujos aguas abajo y los estuarios. Existen evidencias de que las presas construidas han alterado el caudal del agua del río afectado, incidiendo en la temperatura del agua, la extensión de la inundación y la cantidad de nutrientes, lo que implica diversas consecuencias en el hábitat de del río

y en los alimentos que éste proporciona. Algunas organizaciones anti-presas afirman que las emisiones de GEI son similares a las de las centrales térmicas de una potencia equivalente. Además, hay impactos socioeconómicos inevitables como la destrucción extensiva de tierras agrícolas y forestales, daños a los recursos históricos y minerales, y la pérdida de lugares arqueológicos, paisajísticos y turísticos. Sopesar los beneficios y las desventajas es una tarea difícil para los que toman las decisiones. Los impactos ambientales asociados con el uso de la energía hidroeléctrica se pueden resumir en cuatro categorías importantes: fauna, flora, paisaje y restos históricos. La flora es la más frecuentemente mencionada en los estudios recientemente publicados, debido al evidente daño directo causado por el impacto de la construcción de represas en la vegetación, unido a las pérdidas agrícolas, forestales y la erosión. La naturaleza y el alcance del impacto depende en gran medida de las características específicas del sitio, así como del tipo y dimensión de la planta hidroeléctrica (Botelho, Ferreira, Lima, Pinto y Sousa, 2017). Esto implica que los impactos que afectan a las comunidades locales deben evaluarse caso por caso. Dado que la energía hidroeléctrica a gran escala ya no es aceptada como una fuente limpia de energía renovable, la energía hidroeléctrica a pequeña escala, cuya popularidad disminuyó desde la década de 1960, puede proporcionar una posible solución para problemas medioambientales

importantes y convertirse en un sustituto limpio de las grandes centrales hidroeléctricas. Sin embargo, las plantas hidroeléctricas a pequeña escala también afectan a los ecosistemas fluviales locales, en dos aspectos: las alteraciones del paisaje original y la degradación del ecosistema aguas abajo causada por la incautación y el desvío del caudal, lo que puede conducir a una desecación periódica del río. Aunque la energía hidroeléctrica no consume ni contamina el agua, interrumpe el flujo natural. Debido a que el flujo de agua es el principal impulsor de los procesos ecológicos del río, estos cambios influyen de manera importante en la salud de los ecosistemas fluviales.

El desvío de agua y el secado periódico provocados por la represa provocan la degradación de los servicios ecosistémicos aguas abajo. Si es posible evitar esto, entonces el impacto del ambiente es relativamente pequeño. El problema podría aumentar si las plantas de energía a pequeña escala se están instalando sin orden ni planificación en algunos países, pudiendo causar una desecación más acuciante. La construcción de pequeñas centrales hidroeléctricas en una ubicación adecuadamente elegida puede no afectar el río de manera notable. Pero la aplicación extensa de esta tecnología en varias ubicaciones posible en ríos y cascadas aumentaría drásticamente la degradación del medio ambiente. El uso demasiado intensivo de la energía hidroeléctrica a pequeña escala puede repetir la historia perjudicial para el medio ambiente de los grandes proyectos hidroeléctricos. Los avances

significativos en la tecnología hidroeléctrica prometen nuevos desarrollos más efectivos. Se están diseñando nuevas turbinas, menos intrusivas y de cabeza baja para depósitos más pequeños, lo que podría aumentar el costo de la inversión. (Pang et al., 2015). Sin embargo, la implementación de los avances necesarios a menudo es lenta y la inversión en I + D es insuficiente. Esto se debe en parte a la percepción errónea de que la energía hidroeléctrica es una tecnología madura y ofrece pocas perspectivas de mejora.

Referencias

Egré, Dominique, y Milewski, Joseph C. (2002). La diversidad de proyectos hidroeléctricos. *Energy Policy*, 30 (14), 1225-1230.

Okot, David Kilama. (2013). Review of small hydropower technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 515-520.

Pang, Mingyue, Zhang, Lixiao, Ulgiati, Sergio y Wang, Changbo. (2015). Impactos ecológicos de la pequeña central hidroeléctrica en China: información de un análisis de emergencia de una planta de casos. *Política energética*, 76, 112-122.

CAPÍTULO 10

SISTEMAS DE ENERGÍA A BIOMASA

Autor: László MAGYAR

Energiaklub Climate Policy Institute and Applied Communications, Hungría

Correo electrónico: magyar@energiaklub.hu

Resumen: La biomasa es una alternativa a los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural). En los últimos años ha resurgido el interés por esta energía, porque la biomasa se percibe como una fuente energética neutra en carbono, a diferencia de los combustibles fósiles emisores netos de carbono. La bioenergía es también una fuente versátil, ya que puede convertirse en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Puede utilizarse para calentar hogares, electrificar comunidades y alimentar el sector del transporte. En este capítulo se tratarán en detalle las diferentes fuentes de biomasa, las vías técnicas de producción de bioenergía y los impactos ambientales relacionados con los procesos.

Objetivos pedagógicos:

Al final de este capítulo el alumno será capaz de:

- Conocer las diversas fuentes de energía de la biomasa y saber distinguir las diferentes tecnologías para generar energía a partir de la biomasa.
- Evaluar los impactos ambientales del uso energético de la biomasa.

10.1 Energía de la biomasa

Biomasa es el término general que se refiere a la masa vegetal o fitomasa y a la biomasa animal. La biomasa contiene la energía acumulada del sol. Las plantas absorben la energía solar a través de la fotosíntesis y la convierten en energía química (Figura 10.1) (Abbasi et al., 2010).

Photosynthesis



In the process of photosynthesis, plants convert radiant energy from the sun into chemical energy in the form of glucose—or sugar.

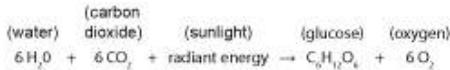


Figura 10.1. El proceso de fotosíntesis (Proyecto Nacional de Educación Energética de los Estados Unidos)

La energía solar total que incide en la superficie terrestre es de 173.000 TW (terawatios), es decir, 17.000 veces más de lo que los humanos actuales consumen mediante combustibles fósiles (Goldemberg J, Johansson TB, 2004). La energía capturada por la fotosíntesis es de unos 140 TW, porcentaje muy pequeño de la energía solar total que llega a nuestro planeta, sin embargo, el volumen total de biomasa que se crea, sigue siendo muy grande, 10 veces nuestra demanda energética actual. Alrededor de 100

billones de toneladas de carbono se convierten en biomasa cada año (Abbasi et al., 2010).

La biomasa es una alternativa a los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural). La quema de combustibles fósiles o biomasa libera dióxido de carbono. Las plantas, que son la fuente de la biomasa, capturan una cantidad casi equivalente de CO₂ a través de la fotosíntesis mientras crecen. En los últimos años ha resurgido el interés por la energía de la biomasa, porque se percibe como una fuente de energía neutra en carbono, a diferencia de los combustibles fósiles que lo emiten, y cuyo uso abundante ha llevado al calentamiento global y a la acidificación de los océanos (Proyecto Nacional de Educación Energética de los Estados Unidos).

Cuando la biomasa se quema, su energía química se libera como calor. La bioenergía es una fuente versátil. A diferencia de otras fuentes de energía, la biomasa puede convertirse en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Además, la bioenergía puede utilizarse para calentar hogares, electrificar comunidades y alimentar el sector del transporte (Consejo Mundial de la Energía, 2016).

10.1 Consumo de energía de biomasa

10.2.1 Consumo global

A nivel mundial, la bioenergía, incluidos los residuos, representó el 14% del consumo mundial de energía en 2012, equivalente 2.600 millones de personas que dependen de la biomasa para satisfacer sus necesidades

energéticas (Figura 10.2) (World Bioenergy Association, 2014)

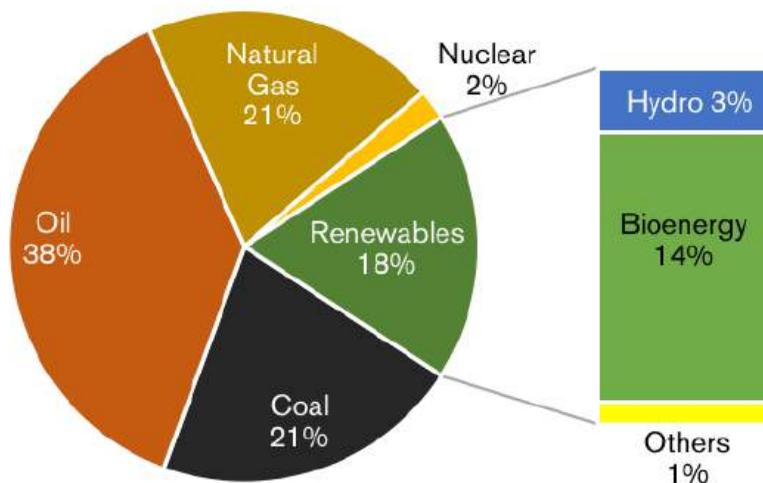


Figura 10.2. Consumo global de energía 2013 (World Bioenergy Association, 2014)

EEUU y Brasil lideran la producción y el consumo de biocombustibles líquidos para el transporte en el mundo, que representa casi el 80% de la producción. En el sector del transporte, la producción de etanol de maíz en EE. UU y etanol de caña de azúcar en Brasil ha aumentado significativamente (Consejo Mundial de la Energía, 2016).

El uso de biomasa para la electricidad es creciente en Europa y América del Norte, principalmente producido a partir de residuos forestales. El continente europeo y

americano aporta más del 70% de todo el consumo de biomasa para electricidad. En los últimos años, la biomasa está experimentando una creciente aceptación en los países en desarrollo de Asia y África, donde una importante proporción de población carece de acceso a la electricidad. (Consejo Mundial de la Energía, 2016).

Actualmente, el uso mayoritario de biomasa en países rurales y en desarrollo es para calefacción. Alrededor del 90% de todo el consumo de bioenergía se destina al uso tradicional: leña, carbón vegetal, residuos agrícolas, etc. para cocinar y calentar. Esta forma de consumo cambiará, pues la creciente urbanización, el uso ineficiente de la biomasa, que lleva a la deforestación y el aumento de la demanda de energía, obligará a una mayor eficiencia en la conversión y a otras fuentes modernas de bioenergía como el biogás, los pellets, los biocombustibles líquidos, etc. (Consejo Mundial de la Energía, 2016).

10.2.2 Consumo en la Unión Europea

En la UE se ha registrado un nuevo récord de consumo de 93,8 Mtep en 2015 (EurObserv'ER, 2016). El aumento en la producción y el consumo de biomasa sólida fue constante en las últimas dos décadas (Figura 10.3).

El consumo total de biocarburantes en el transporte en la UE en 2016 fue de 14,4 Mtep el 80,6% proveniente de biodiesel. El objetivo es reducir el impacto ambiental negativo de las emisiones de GEI generadas por la producción de biocombustibles, lo que implica un cambio indirecto en el uso de la tierra. Además, los proveedores

de combustible deben reducir el nivel de gases de efecto invernadero en un 6% para 2020 (EurObserv'ER, 2017).

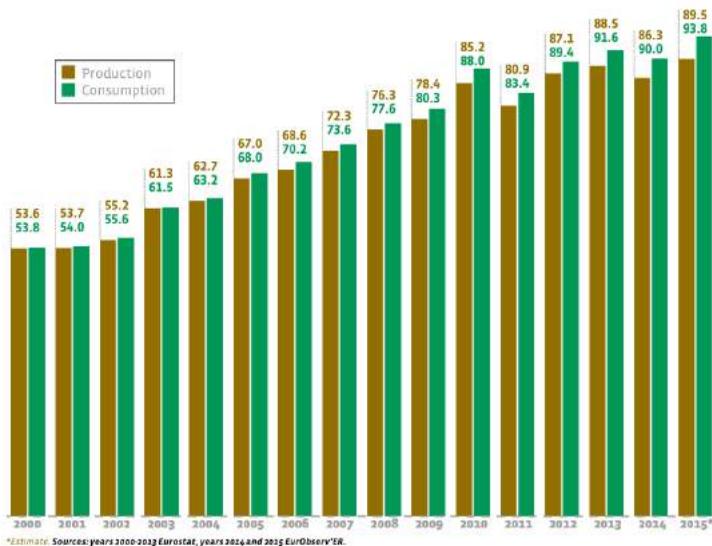


Figura 10.3. Producción de energía a partir de biomasa sólida y cifras de crecimiento del consumo en la UE desde 2000 (en Mtep) (EurObserv'ER: barómetro de biomasa sólida 2016)

10.3 Fuentes de biomasa para la generación de energía

10.3.1 Cultivos alimentarios

Los cultivos alimentarios: caña de azúcar, maíz, soja, trigo, remolacha y aceites vegetales se utilizan para producir biocombustibles como etanol, biodiesel y aditivos de gasolina o diésel (Figura 10.4) (Abbasi et al., 2010). Los proyectos de conversión de cultivos

alimentarios en energéticos son objeto de un análisis cada vez mayor, porque se establece una competencia que eleva los precios de los alimentos y amenaza la subsistencia de los seres humanos. También degradan gravemente la tierra y los embalses de agua. (Abbasi et al., 2010).

10.3.2 Plantas ricas en hidrocarburos

Un gran número de plantas contienen hidrocarburos en concentraciones suficientemente importantes como para convertirse en una fuente potencial de diésel. A pesar de que algunas personas tienen grandes esperanzas puestas en estas plantas, el impacto negativo de su uso a gran escala es similar al de los cultivos alimentarios (Abbasi et al., 2010).

10.3.3 Residuos

Los residuos incluyen la materia agrícola (paja, cáscaras de frutas y hortalizas), los restos forestales, de alimentos y los desechos sólidos urbanos. A partir de estos materiales se puede producir una energía considerable, ya que a nivel mundial representan varios miles de millones de toneladas de biomasa. Pero extraer la energía de una manera limpia y rentable es un reto importante que aún no se ha cumplido (Abbasi et al., 2010).

10.3.4 Malezas y plantas silvestres

Las plantas invasoras sin utilidad para los seres humanos se llaman malezas. Inciden sobre el desarrollo de otras especies colonizando su hábitat. Tales plantas pueden ser

utilizadas como fuente de energía, si fuera económicamente viable cosecharlas y utilizarlas periódicamente, controlando así su propagación y reduciendo el daño que causan (Ganesh et al., 2009).

10.3.5 Pastos de crecimiento rápido y especies leñosas

Incluyen:

- Especies leñosas como sauces, álamos y otras maderas duras
- Especies herbáceas como el switchgrass, el blustem grande, el canarygrass de junco y el miscanthus.

De éstos, el switchgrass resulta atractivo debido a su alto rendimiento de biomasa, amplio rango geográfico, utilización eficiente de nutrientes, bajo potencial de erosión, capacidad de secuestro de carbono y reducción de los requerimientos de entrada de combustibles fósiles en relación con los cultivos anuales (McLaughlin, Kszos, 2005). Hay que tener cuidado a la hora de seleccionar especies para su uso como cultivos biocombustibles, ya que las características que hacen que algunas especies sean ideales para este uso, como la fotosíntesis C4, la carencia de plagas y enfermedades y el rápido crecimiento de primavera, son las que también se asocian con la invasividad (Raghu et al, 2006).

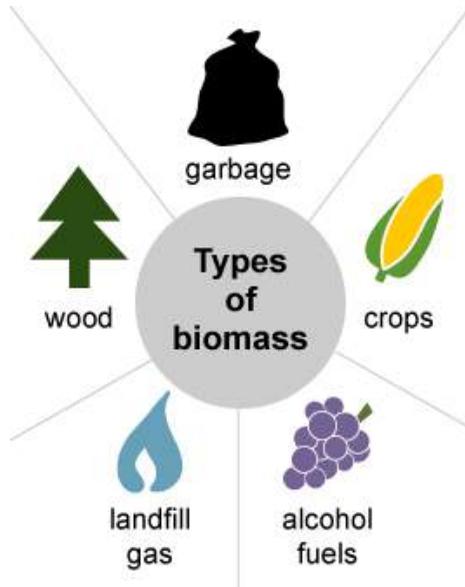


Figura 10.4. Fuentes de biomasa para la generación de energía (Proyecto nacional de educación en energía de EE. UU.)

10.4 Convertir la biomasa en otras energías

La quema es sólo una forma de liberar la energía de la biomasa. La biomasa puede convertirse en otras formas de energía utilizables, como el gas metano o los combustibles como el etanol y el biodiesel para el transporte.

El metano es un biogás que se forma cuando los desechos agrícolas y humanos se descomponen en vertederos o en contenedores especiales llamados digestores (EIA).

Cultivos de maíz y caña de azúcar son fermentados para producir etanol combustible para uso de vehículos. El

biodiesel, otro combustible para el transporte, se produce a partir de aceites vegetales y grasas animales (EIA).

En la tabla 10.1 figuran las fuentes de biomasa y sus usos para la producción de energía.

Tabla 10.1. Ejemplos de usos de biomasa para energía (www.eia.gov)

Fuente de biomasa	Uso para producción de energía
Residuos de la industria maderera	Quemado para calentar edificios, producir calor en la industria y generar electricidad.
Cultivos agrícolas y materiales de desecho	Quemado como combustible o convertido en biocombustibles líquidos
Alimentos, yarda y desechos de madera en la basura	Quemado para generar electricidad en centrales eléctricas o convertido en biogás en vertederos.
Estiércol animal y aguas residuales humanas	Biogás que puede quemarse como combustible

10.5 Técnicas para la producción de diversos tipos de biomasa

10.5.1 Conversión termoquímica de biomasa

En el procesamiento termoquímico, la biomasa se convierte en una gama de productos mediante la descomposición térmica y la descomposición química. Se trata de calentar la biomasa en presencia de diferentes

concentraciones de oxígeno. Cuando la biomasa se calienta en ausencia total de oxígeno, el proceso de pirólisis produce varios líquidos orgánicos que pueden ser refinados para producir combustibles líquidos. Alternativamente, el calentamiento con bajas concentraciones de oxígeno conduce a la gasificación y a la producción de hidrógeno y gases orgánicos que también pueden convertirse en combustibles líquidos (Abbasi et al., 2010).

Los costes de puesta en marcha y mantenimiento de las plantas de procesos termoquímicos son elevados debido a las exigencias del procesamiento a altas temperaturas. Para poder operar de manera eficiente, el procesamiento termoquímico debe realizarse a gran escala, lo que requiere el transporte de biomasa a largas distancias, repercutiendo en los costes. Además, los procesos termoquímicos consumen muchos combustibles fósiles durante el transporte de biomasa y su calentamiento (Abbasi et al., 2010).

10.5.2 Centrales eléctricas alimentadas con biomasa

La combustión directa de la biomasa para la generación de electricidad es una tecnología madura y comercialmente disponible que puede aplicarse a una amplia gama de potencias, desde unos pocos MW hasta 100 MW o más. Es la forma más común de generación de electricidad a partir de biomasa (Figura 10.5), con un 90% en todo el mundo (IRENA, 2012).

Dos son los componentes principales en una planta de biomasa basada en la combustión: la caldera que produce vapor y la turbina de vapor que se convierte en energía mecánica y genera electricidad. Las dos formas más comunes de calderas son la estufa y el lecho fluidizado. Pueden alimentarse íntegramente con biomasa o con una combinación de biomasa y carbón u otros combustibles sólidos (IRENA, 2012).



Figura 10.5. Fuentes de biomasa para generar energía (<http://www.calbiomass.org/wp-content/uploads/2013/02/biomass-fuel-sources.jpg>)

10.5.3 Cogeneración o generación combinada de electricidad (CHP)

Por cogeneración se entiende el proceso que utiliza un único combustible para producir calor y electricidad, lo que aumenta significativamente la eficiencia global. En las plantas de generación eléctrica usuales, hasta el 70% del calor del vapor es lanzado a la atmósfera. En la CHP este calor se utiliza para satisfacer las necesidades de

calentamiento del proceso (Abbasi et al., 2010). Estas operaciones combinadas de calor y electricidad representan el uso más eficiente de la biomasa, utilizando el 80% de la energía potencial (Figura 10.6) (EESI).



Figure 10.6. Cogeneración comparada con la producción de energía separada (Fuente: www.mwm.net).

La capacidad de la cogeneración oscila entre unos pocos kilovatios y varios megavatios de generación eléctrica, junto con la producción simultánea de calor que va desde menos de cien kWt (kilovatios térmicos) hasta muchos MWt (megavatios térmicos). Los sistemas de CHP ofrecen un mayor ahorro de carbón que los sistemas de energía eléctrica, pero tienen un menor rendimiento por el alto capital inicial (Figura 10.7) (Abbasi et al., 2010).

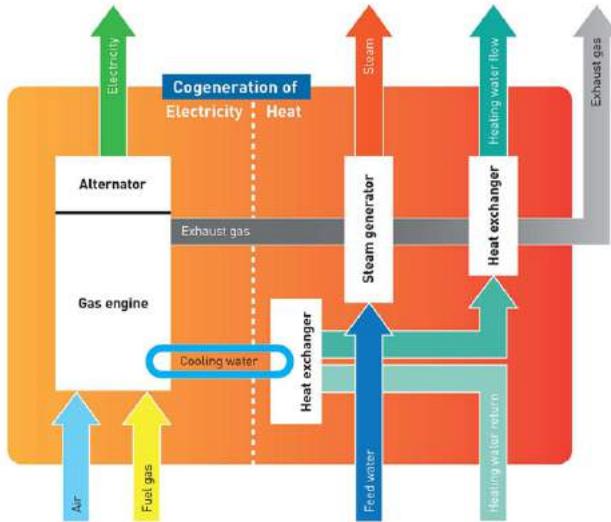


Figure 10.7. Plantas de ciclo combinado (CHP) con motores de gas (Fuente: www.mwm.net)

10.5.4 Uso de gasificadores a biomasa

Los gasificadores de biomasa pueden utilizarse para sustituir a los combustibles fósiles en industrias que consumen mucho combustible. Las tecnologías de gasificación ofrecen la posibilidad de convertir la biomasa en un gas productivo, que puede ser quemado en turbinas de gas de ciclo simple o combinado, con eficiencias más altas que la combustión de biomasa, para impulsar una turbina de vapor. Aunque las tecnologías de gasificación están disponibles comercialmente, es necesario avanzar en términos de I+D para promover su uso comercial generalizado (IRENA, 2012). Existen tres tipos de gasificadores:

- Gasificadores de lecho fijo
- Gasificadores de lecho fluidizado (de circulación o burbujeante)
- Gasificadores de flujo restringido

10.6 Procesos bioquímicos

10.6.1 Fermentación del etanol

En los cultivos alimentarios, los azúcares se presentan en forma de almidón, el cual debe convertirse en azúcares más simples antes de poder realizar la fermentación en etanol. Como la fermentación se realiza en presencia de agua, el etanol resultante es diluido. Para ser utilizable como combustible, el etanol debe ser separado del agua (Abbasi et al., 2010). La gran preocupación respecto de la fermentación es por el proceso de conversión, que está lejos de ser limpio. Algunos científicos afirman que el proceso es tan contaminante y consume tanta energía que, en última instancia, genera más emisiones de gases de efecto invernadero que la gasolina a la que reemplaza como combustible para el transporte.

10.6.2 Producción de etanol a partir de cultivo lignocelulósico

La oposición a la desviación de los cultivos alimentarios para la producción de biocombustibles, y la creciente aceptación del hecho de que no es un proceso tan limpio y ecológico como se ha proyectado en el pasado, están provocando que el enfoque se esté desplazando hacia la biomasa lignocelulósica. Las semillas ricas en almidón de

maíz constituyen sólo una pequeña parte de la biomasa de la planta en su conjunto, todas las demás partes de las plantas se componen de lignocelulosa. Por cada hectárea de tierra dedicada a la biomasa para obtener energía, se pueden producir cantidades mucho mayores de biomasa lignocelulósica que en un cultivo alimentario (Abbasi et al., 2010).

10.6.3 Digestión anaerobia

Se ha utilizado con un éxito creciente en el procesamiento de estiércol animal y aguas residuales (Ramasamy et al., 2004), pero se ha visto afectado por problemas operativos y de baja eficiencia cuando se utiliza para procesar fitomasa (Ganesh et al., 2009).

10.6.4 Esterificación del biodiesel

El principal desafío es cultivar plantas ricas en petróleo en cantidades suficientemente grandes por hectárea de tierra para maximizar el rendimiento petrolífero con un mínimo de costos ambientales (Abbasi et al., 2010).

10.6.5 Tecnologías emergentes

Las nuevas tecnologías para producir biocombustible a partir de biomasa están emergiendo rápidamente, incluyendo el desarrollo de levaduras de ingeniería para aumentar los rendimientos de etanol (Alper et al., 2006), la utilización de nuevos microorganismos para la producción de etanol (Seo et al., 2005), pretratamientos para la digestión celulósica (Mosier et al., 2005), celdas de

combustible para la conversión de azúcares directamente a electricidad (Chaudhury, Lovley, 2003) y catalizadores para una conversión más eficiente de biomasa a gas de síntesis (Salge et al., 2006).

10.7 Impactos ambientales de la energía a biomasa

10.7.1 Producción de biomasa

La energía de la biomasa puede ser neutra en carbono, pero no es neutra en nutrientes.

El argumento central en la defensa de la energía de la biomasa es que es neutral en carbono, sólo libera ese carbono a la atmósfera que antes se extraía de la fotosíntesis. El argumento es válido, incluso si consideramos el hecho de que al menos una parte del carbono fijado por la biomasa en los últimos años podría haber sido de origen fósil (Abbasi et al., 2010). Pero la biomasa no sólo contiene carbono, sino también nitrógeno y otros nutrientes esenciales. Cualquier esfuerzo para cultivar intensivamente la biomasa tiene implicaciones distintas a la captura de carbono (Miller et al., 2007).

Las actividades agrícolas generan más del 75% de los compuestos nitrogenados reactivos emitidos (Smil, 1999). Las concentraciones globales de CO₂ en la atmósfera han aumentado un tercio desde 1750 y un 15% ha aumentado las concentraciones de N₂O, cada molécula de N₂O tiene un potencial de calentamiento 300 veces mayor que una molécula de CO₂ (Fixen, West, 2002). Las alteraciones en el ciclo del nitrógeno han llevado a un aumento estimado

del 1100% del nitrógeno atmosférico no reactivo hacia compuestos reactivos (Gitay, Suárez, 2002).

Una vez convertido a un estado reactivo, el nitrógeno persiste en el medio ambiente, pasando a través de las formas de $\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}_x \rightarrow \text{NO}_3$, resultando en impactos tales como la producción de ozono a nivel del suelo, acidificación, eutrofización, hipoxia, agotamiento del ozono estratosférico y cambio climático (Galloway et al., 2003). La eutrofización de las masas de agua superficiales y la contaminación de los acuíferos subterráneos son los más generalizados de la agricultura. También el fósforo conduce a la eutrofización (Abbasi et al., 2010).

No es posible mantener la producción intensiva y repetitiva de biomasa terrestre prevista ya que las reservas de nitrógeno en el suelo son insuficientes para mantener cultivos que no lo fijan, como el maíz. El terreno tiene que ser enriquecido con nutrientes adicionales, fertilizantes sintéticos, pero la materia orgánica del suelo, la biota del suelo, la capacidad de retención de agua del suelo y numerosos micronutrientes no pueden ser reemplazados por fertilizantes (Abbasi et al., 2010).

10.7.2 Recursos de la tierra y el agua

La producción de energía de biomasa requiere grandes cantidades de recursos hídricos y de tierra. En algunas regiones, el agua subterránea se bombea 10 veces más rápido que el potencial de recarga natural de los acuíferos. Otro problema es la contaminación del agua por los

pesticidas y fertilizantes que inevitablemente se necesitan para sostener cualquier cultivo intensivo (Pimentel et al., 1992).

Las tierras utilizadas para aumentar la producción de biomasa con fines energéticos compite con los cultivos, los bosques y la urbanización (Chari, Abbasi, 2005). La eliminación de la biomasa y el agua para la producción de energía aumenta la degradación del suelo y la eliminación de nutrientes. También afecta a la vida silvestre y a la biota natural (Abbasi et al., 2010).

10.7.3 Erosión del suelo y desecación

La producción de energía de biomasa exacerba los problemas de erosión del suelo, lo que acelera significativamente la escorrentía del agua, retrasando así la recarga de las aguas subterráneas, la riqueza de en nutrientes puede dañar la calidad de los ríos y lagos causando eutrofización (Abbasi, Chari, 2008).

10.7.4 Pérdida de nutrientes

La cosecha de residuos de cultivos para obtener biomasa ocasiona una pérdida importante de nutrientes.

10.7.5 Pérdida de hábitats y vida natural

Convertir los ecosistemas naturales en plantaciones cambiaría tanto el hábitat como las fuentes de alimento de la vida silvestre (Abbasi, Chari, 2008). La alteración de los bosques y humedales reduciría muchos hábitats y zonas de

apareamiento de aves y mamíferos. Los monocultivos de árboles de crecimiento rápido reducen la diversidad de la vegetación y el valor de las áreas como hábitats para las especies silvestres. Estos monocultivos son menos estables que los bosques y requieren pesticidas y fertilizantes para mantener la productividad. Los árboles en plantaciones rentables son 2-3 veces más densos que los de los bosques naturales (Rowe et al., 2009).

10.8 Conversión de biomasa a energía utilizable

La producción de biomasa es sólo una dimensión de los sistemas energéticos basados en la biomasa, su conversión a energía utilizable es otra dimensión igualmente importante (Abbasi et al., 2010).

La biomasa es una fuente no sólo de emisiones de GEI, sino también de varios contaminantes atmosféricos altamente tóxicos (Lewtas, 2007)

10.8.1 Impactos medioambientales de los procesos térmicos

Los principales problemas ambientales son:

- a) contaminación atmosférica: emisiones de partículas, óxidos de carbono, óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno
- b) emisiones orgánicas: dioxinas, hidrocarburos, irritantes tóxicos y compuestos cancerígenos

- c) generación de cenizas de residuos sólidos, cenizas volátiles que a veces contienen sustancias tóxicas con los problemas de contaminación correspondientes
- d) contaminación del agua: demanda biológica de oxígeno, demanda química de oxígeno, sólidos en suspensión, trazas de metales...
- e) la presión sobre los recursos terrestres e hídricos
- f) riesgos domésticos: incendios accidentales
- g) riesgos profesionales: exposición prolongada a productos químicos tóxicos y corrosivos.

10.8.2 Quemar madera

El uso de leña, pellets de madera y carbón vegetal para calentar y cocinar puede reemplazar a los combustibles fósiles y así reducir las emisiones de CO₂. No obstante, el humo que desprende es contaminante por contener monóxido de carbono y partículas en suspensión. La madera y el carbón vegetal son los principales combustibles para cocinar y calentar en los países pobres, pero si la gente cosecha la madera más rápido de lo que los árboles pueden crecer, causa deforestación (EIA).

10.8.3 Uso de biomasa para energía y calor

El uso de madera para la generación de electricidad y calor ha crecido rápidamente en los últimos años, pero su impacto real en el clima y en los bosques es controvertido.

Al igual que el debate sobre los biocarburantes hace unos años, este tema es muy controvertido y no existe consenso (Chatam House).

Las políticas actuales de apoyo a la biomasa se basan en la suposición incorrecta de que su uso es inmediato y completamente neutro en cuanto al carbono, ya que, según las normas internacionales de contabilidad de los gases de efecto invernadero, sus emisiones asociadas se registran en el uso del suelo y no en el sector energético. El resultado es que el uso de la biomasa se está expandiendo, en detrimento de los intentos de limitar el cambio climático. En realidad, la biomasa emite más carbono por unidad de energía que la mayoría de los combustibles fósiles. Sólo los residuos que de otro modo se hubieran quemado o dejado en el bosque y se hubieran descompuesto rápidamente, pueden considerarse neutros en cuanto al carbono a corto y medio plazo (Chatam House). Las diferentes formas en que se contabilizan las emisiones por uso del suelo significan que una proporción de las emisiones de biomasa puede que nunca se registren (Chatam House).

10.8.4 Quema de residuos sólidos urbanos

Quemar los residuos sólidos urbanos en plantas para producir energía significa que se entierran menos residuos en los vertederos, pero produce contaminación del aire y libera los productos químicos, que pueden ser peligrosos para las personas y el medio ambiente si no se controlan adecuadamente (EIA).

Las depuradoras limpian las emisiones de las instalaciones de generación de energía mediante la pulverización de un líquido en los gases de combustión para neutralizar los ácidos presentes en el caudal de emisiones. Los filtros de tela y los precipitadores electrostáticos también eliminan partículas de los gases de combustión. Asimismo, los hornos a altas temperaturas (1000-1100 °C) descomponen los productos químicos y los residuos sólidos urbanos en compuestos más simples y menos nocivos (EIA).

10.8.5 Eliminación de las cenizas de las plantas de conversión de residuos en energía

La ceniza puede contener altas concentraciones de metales presentes en los residuos originales. Las baterías son la mayor fuente de plomo y cadmio en los residuos urbanos. Los tintes textiles, las tintas de impresión y la cerámica los contienen. Las bombillas fluorescentes contienen pequeñas cantidades de mercurio. Separar los desechos antes de quemarlos puede resolver parte del problema (EIA).

10.8.6 Captación del biogas

El biogás se forma como resultado de procesos biológicos en plantas de tratamiento de aguas residuales y sistemas de gestión de estiércol. El biogás se compone principalmente de metano y CO₂. Muchas instalaciones queman el metano para generar calor o electricidad y poder reemplazar la generación de electricidad a partir de combustibles fósiles. Pero quemar metano también produce CO₂ siendo un gas de efecto invernadero.

10.8.7 Impacto de la fermentación del etanol y el biodiesel

Los biocombustibles pueden ser neutros en carbono porque las plantas que se utilizan para producir biocombustibles, como el maíz y la caña de azúcar para el etanol y los frijoles de soja y los árboles de aceite de palma para el biodiesel, absorben CO₂ a medida que crecen y pueden compensar estas emisiones cuando los biocombustibles se producen y queman EIA.

Sin embargo, el cultivo de plantas para biocombustibles es controvertido, ya que la tierra, los fertilizantes y la energía para el cultivo de biocombustibles podrían ser utilizados en su lugar para el cultivo de alimentos. En algunas partes del mundo se han talado grandes extensiones de vegetación natural y bosques para cultivar caña de azúcar para producir etanol y soja y palma aceitera para biodiesel (EIA).

Estas actividades contribuyen mucho más al calentamiento global, tanto a corto como a largo plazo, que los ahorros logrados al reemplazar algunas partes de gasolina por etanol en el combustible para el transporte (Searchinger et al., 2008).

Existen fuentes alternativas de biomasa que no compiten con los cultivos alimentarios y que utilizan menos fertilizantes y pesticidas que el maíz y la caña de azúcar. El etanol también puede fabricarse a partir de papel usado, y el biodiesel puede fabricarse a partir de grasas y aceites usados e incluso algas (EIA). Hay una creciente promoción de la producción de biocombustibles a partir de cultivos energéticos basados en la lignocelulosa, como el

switchgrass, los sauces y los álamos, especialmente utilizando tierras agrícolas marginales (Schmer et al., 2008).

Las mezclas de etanol y gasolina-etanol son más limpias y tienen una clasificación de octanaje más alta que la gasolina pura, pero tienen mayores emisiones evaporativas de los tanques de combustible y de los equipos de dispensación. Estas emisiones evaporativas contribuyen a la formación de ozono y smog nocivos a nivel del suelo. La gasolina requiere un procesamiento adicional para reducir las emisiones evaporativas antes de su mezcla con etanol. La combustión del biodiesel produce menos óxidos de azufre, menos partículas, menos monóxido de carbono y menos hidrocarburos no quemados y otros hidrocarburos, pero sí produce más óxido de nitrógeno que el diésel de petróleo (EIA).

Aunque los estudios de evaluación del ciclo de vida muestran que los biocombustibles son favorables en el balance energético neto (NEB) en comparación con los combustibles fósiles que sustituyen (Schmer et al., 2008), los biocombustibles se ven cada vez menos atractivos si se los considera en el contexto total del balance energético, las emisiones de GEI, el impacto ambiental y el humanismo (Abbasi et al., 2008).

Referencias

Abbasi, Tasneem, Abbasi, SA: Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization; Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Issue 3, April 2010, Pages 919-937

Abbasi SA, Chari KB. Environmental management of urban lakes. New Delhi: Discovery Publishing House; 2008.

Alper H, Moxley J, Nevoigt E, Fink GR, Stephanopoulos G. Engineering yeast transcription machinery for improved ethanol tolerance and production. *Science* 2006; 314:1565–8.

Chari KB, Abbasi SA. A Study on the aquatic and amphibious weeds of Oussudu Lake. *Hydrology Journal* 2005;28(September–December):89–98F.

Chatham House (International Affairs Think Tank) (<https://www.chathamhouse.org/about/structure/energy-department/environmental-impact-use-biomass-power-and-heat-project>)

Chaudhuri SK, Lovley DR. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells. *Natural Biotechnology* 2003; 21:1229–32.

EESI: (<http://www.eesi.org/topics/bioenergy-biofuels-biomass/description>)

EIA (U.S. Energy Information Administration) www.eia.gov

Euroserv'er: Biofuels barometer 2017

Euroserv'er: Solid biomass barometer 2016

Fixen PE. West FB nitrogen fertilizers, meeting contemporary challenges. *AMBIO* 2002; 31:169–76.

Galloway JN, Aber JD, Erisman JW, Seitzinger SP, Howarth RW. The nitrogen cascade. *BioScience* 2003;53L:41–356.

Ganesh PS, Gajalakshmi S, Abbasi SA. Vermicomposting of the leaf litter of acacia (*Acacia auriculiformis*): Possible roles of reactor geometry, polyphenols, and lignin. *Bioresource Technology* 2009; 100:1819–27.

Gitay HA, Suarez T. In: Watson, Dokken DJ, editor. *Climate Change and Biodiversity*. IPCC Technical Paper V. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change; 2002.

Goldemberg J, Johansson TB. *World energy assessment overview: update*. New York: United Nations Development Programme; 2004.

IRENA: *Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series – Biomass for Power Generation*, 2012

Lewtas J. Air pollution combustion emissions: characterization of causative agents and mechanisms associated with cancer, reproductive, and cardiovascular effects. *Mutation Research—Reviews in Mutation Research* 2007; 636:95–133.

McLaughlin SB, Kszos LA. Development of switchgrass (*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstock in the United States. *Biomass and Bioenergy* 2005; 28:515–35.

Miller SA, Landis AE, Thesis TL. Environmental trade-offs of biobased production. *Environmental Science & Technology* 2007;(August):5176–82.

Mosier N, Wyman C, Dale B, Elander R, Lee YY, Holtzapple M, Ladisch M. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology* 2005; 96:673–86.

Pimentel D. Competition for land: development, food, and fuel. In: Kaliasha MA, Zcker A, Ballew KJ, editors. *Technologies for a Greenhouse-constrained Society*, Lewis, Boca Raton, FL; 1992. p. 325–48.

Raghu S, Anderson RC, Daehler CC, Davis AS, Wiedenmann RN, Simberloff D, et al. Adding biofuels to the invasive species fire? *Science* 2006; 313:1742.

Ramasamy EV, Gajalakshmi S, Sanjeevi R, Jithesh MN, Abbasi SA. Feasibility studies on the treatment of dairy wastewaters

with upflow anaerobic sludge blanket reactors. *Bioresource Technology* 2004; 93:209–12.

Rowe L, Street R, Taylor NR. Identifying potential environmental impacts of large-scale development of dedicated bioenergy crops in the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009; 13:271–90.

Salge JR, Dreyer BJ, Dauenhauer PJ, Schmidt LD. Renewable hydrogen from nonvolatile fuels by reactive flash volatilization. *Science* 2006; 314:801–5.

Scheer, Hermann: *Handbook of Renewable Energies in the European Union I-II*; Frankfurt am Main, Germany, 2002

Schmer MR, Vogel KP, Mitchell RB, Perrin RK. Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass. USA: Proceedings of the National Academy of Sciences 2008.

Searchinger T, Heimlich R, Houghton RA, Dong F, Elobeid A, Fabiosa J, et al. Use of croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change 10.1126/Science.1151861. *Science* 2008; 319:1238–40.

Seo JS, Chong H, Park HS, Yoon KO, Jung C, Kim JJ. The genome sequence of the ethanologenic bacterium *Zymomonas mobilis* ZM4. *Nature Biotechnology* 2005; 23:63–8.

Smil V. Nitrogen in crop production: an account of global flows. *Global Biogeochemical Cycles* 1999; 13:647–62.

US National Energy Education Project

World Bioenergy Association: *Global Bioenergy Statistics* 2014

World Energy Council: *World Energy Resources – Bioenergy* 2016