

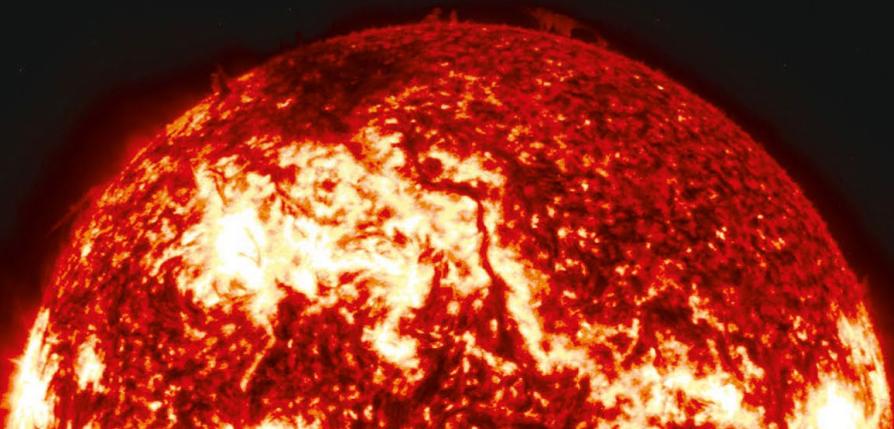


Universidad Autónoma
del Estado de México

RADIACIÓN SOLAR EN EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

Mayra Rodríguez Peña

Carlos Eduardo Barrera Díaz



**RADIACIÓN
SOLAR EN EL
TRATAMIENTO
DE AGUA
RESIDUAL**



**Universidad Autónoma
del Estado de México**

Doctor en Ciencias e Ingeniería Ambientales
Carlos Eduardo Barrera Díaz
Rector

Doctora en Ciencias Sociales
Martha Patricia Zarza Delgado
Secretaria de Investigación y Estudios Avanzados

Doctora en Ciencias Químicas
María Fernanda Ballesteros Rivas
Directora de la Facultad de Química

Maestra en Administración
Susana García Hernández
*Directora de Difusión y Promoción de la Investigación
y los Estudios Avanzados*

RADIACIÓN SOLAR EN EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

**Mayra Rodríguez Peña
Carlos Eduardo Barrera Díaz**

“2024, Conmemoración del 60 Aniversario de la Inauguración de Ciudad Universitaria”
Universidad Autónoma del Estado de México
Toluca, 2024

Rodríguez Peña, Mayra.
Radiación solar en el tratamiento de agua residual / Mayra Rodríguez
Peña, Carlos Eduardo Barrera Díaz.
1ª ed.
Toluca, Estado de México : Universidad Autónoma del Estado de
México, 2024.
100 p. : il. ; 23 cm.
ISBN 978-607-633-883-4 (impreso)
ISBN 978-607-633-884-1 (PDF)
Incluye referencias bibliográficas.
1. Aguas residuales -- Purificación.
2. Aguas residuales -- Tratamiento.
3. Aguas residuales -- Tratamiento por radiación solar.
I. Barrera Díaz, Carlos Eduardo.
TD745 .B477 2024



RADIACIÓN SOLAR EN EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

Mayra Rodríguez Peña
Carlos Eduardo Barrera Díaz

Libro sometido a sistema antiplagio y publicado con la previa revisión y aprobación de pares doble ciego externos, uno de ellos forma parte del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores, nivel I. Expediente de obra 386/11/2023, Dirección de Difusión y Promoción de la Investigación y los Estudios Avanzados, adscrita a la Secretaría de Investigación y Estudios Avanzados de la Universidad Autónoma del Estado de México.

Primera edición: 15 de julio de 2024

ISBN 978-607-633-883-4 (impreso)
ISBN 978-607-633-884-1 (PDF)

D.R. © Universidad Autónoma del Estado de México
Instituto Literario núm. 100 Ote., Col. Centro
C.P. 50000, Toluca, Estado de México
www.uaemex.mx

Imagen de portada: HE303. GOES-16: SUVI. Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT).

Esta edición y sus características son propiedad de la Universidad Autónoma del Estado de México.

El contenido de esta publicación es responsabilidad de los autores.



Esta obra queda sujeta a una licencia Creative Commons Atribución-No comercial-Sin derivadas 4.0 Internacional. Puede ser utilizada con fines educativos, informativos o culturales, ya que permite solo descargar sus obras y compartirlas, siempre y cuando den crédito, pero no pueden cambiarlas de forma alguna ni usarlas de manera comercial. Disponible para su descarga en acceso abierto en: ri.uaemex.mx

Hecho e impreso en México

ÍNDICE

Introducción	9
Capítulo 1	
La importancia del Sol	11
1.1 Características del Sol	11
1.2 Radiación solar	13
1.3 Espectro solar	15
1.3.1 Radiación visible	18
1.3.2 Radiación ultravioleta	19
1.4 La energía solar	22
Referencias	28
Capítulo 2	
Procesos fotoquímicos	35
2.1 Fotocatálisis	39
2.1.1 Fotocatálisis directa	40
2.1.2 Fotocatálisis mediada	40
2.2 Fotocatalizadores	43
2.3 Tipos de modificación de los fotocatalizadores	46
2.3.1 Dopaje	46
2.3.1.1 Dopado metálico	46
2.3.1.2 Dopado no metálico	47
2.3.2 Co-dopaje	48
2.3.3 Acoplamiento	49
2.4 Aplicaciones de la fotocatálisis en el tratamiento de agua	51
Referencias	55

Capítulo 3	
Destilación solar	63
3.1 Destilador solar pasivo	67
3.1.1 Destilador solar de cuenca	69
3.1.2 Destilador de mecha cóncava	69
3.1.3 Destilador solar de invernadero	70
3.1.4 Destilador solar esférico	71
3.1.5 Destilador solar tubular	72
3.2 Destilador solar activo	73
3.2.1 Destilación a alta temperatura	74
3.2.2 Suministro de agua precalentada	75
3.3 Destilador solar multi-etapa de vacío	76
3.4 Destilador solar integrado con un condensador externo o interno	78
3.5 Destilador solar de burbujas de aire	79
3.6 Aplicaciones de destilación solar	82
 Referencias	 87
 Conclusión	 93
 Reseñas curriculares	 97

INTRODUCCIÓN

La sociedad mexicana actualmente está experimentando una gran escasez de agua potable en todo el país y altas temperaturas, como las experimentadas en 2024. En el año 2022 la ciudad de Monterrey reportó que no había suficiente agua para las necesidades de la población y se vieron afectadas tanto las actividades cotidianas como las industriales. Hoy, el centro del país, especialmente la Ciudad de México y Toluca, experimentan una reducida disponibilidad del vital líquido.

Las causas del problema de escasez de agua potable son varias, una de ellas es el aumento creciente de la población en las ciudades, el cual no solo se debe al crecimiento natural de la población, sino también a que año con año más personas cambian su residencia a esta zona. Otra es el cambio climático, porque se extienden las épocas de sequía, ocasionando cada año menos precipitaciones y mayor evaporación de agua en las presas. Una más es el exiguo tratamiento y el limitado reúso del agua tratada, ya que la mayor parte se vierte en ríos, los cuales se vuelven a contaminar a los pocos metros de haber sido descargada.

Este libro contiene tres capítulos en los cuales se describen algunos aspectos para aprovechar la energía solar en el tratamiento de agua residual. En el capítulo uno se presentan algunas características del Sol, como propiedades fisicoquímicas y electromagnéticas. Posteriormente, en el capítulo dos se exponen algunos procesos que emplean la luz ultravioleta o la luz visible para el tratamiento de agua, por medio de fotoquímica, en donde se pueden generar radicales hidroxilos como agentes oxidantes. Finalmente, en el capítulo tres se muestra la destilación solar como un método fisicoquímico efectivo de separación de contaminantes del agua, por el que es posible tener agua de buena calidad.

Capítulo 1

LA IMPORTANCIA DEL SOL

1.1 Características del Sol

El Sol es la mayor fuente de energía y es de vital importancia para nuestro planeta en lo que respecta al balance energético, la actividad biológica, las reacciones fotoquímicas y otros fenómenos a gran escala [1]. Emite continuamente una potencia de 62 600 kilowatts (o kilovatios) por cada metro cuadrado de su superficie. Está cerca de la Tierra a una distancia de 150×10^6 km. Tiene un radio de 700 000 km, equivalente a 109 veces el de la Tierra. Posee una masa de 2×10^{33} kg, una luminosidad de 3.8×10^{26} W y una edad de 4.6×10^9 años [2].

Su composición química es mayoritariamente de elementos muy pequeños: 92.1 % es hidrógeno, 7.8 % helio (un 27.4 % de He en masa) y un 0.1 % de elementos más pesados (un 1.9 % en masa, principalmente C, N, O, Ne, Mg, Si, S, Fe) [3].

La temperatura en el centro del Sol es de unos 15 000 000 °C (igualado a un inmenso reactor nuclear). Esta temperatura desciende desde el centro del núcleo hasta su borde exterior, de 7 000 000 a 2 000 000 °C [4]. El Sol gira sobre su eje aproximadamente una vez cada 4 semanas; sin embargo, no gira como un cuerpo sólido; el ecuador tarda unos 27 días y las regiones polares tardan unos 30 días en cada rotación [5]. Su estructura básica se puede observar en la Figura 1.1.

Propiedades del sol	
Edad	4.6×10^9 años
Masa	2×10^{33} kg
Temperatura	5 526.85 °C (superficie)
Diámetro	1 390 000 km
Composición	92.1 % H, 7.8 % He y 0.1 % metales

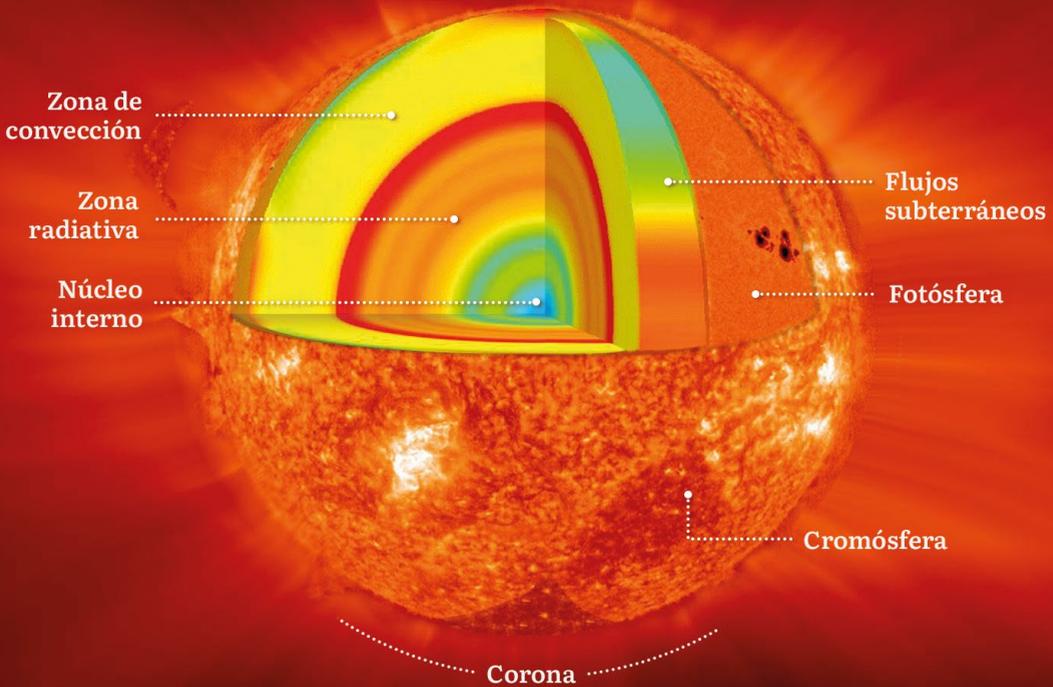


Figura 1.1
Estructura y propiedades del Sol [6].

La fotosfera es una fina capa en la superficie solar que se observa con luz blanca. Tiene una temperatura de $6\,126.85\text{ }^\circ\text{C}$ a longitudes de onda de $2\,000\text{ \AA}$. La fotosfera se define como el rango de alturas desde el que escapan directamente los fotones, abarca una profundidad óptica de $0.1 \leq \tau \leq 3$ y se traduce en una altura de 300 km para el rango de longitud de onda visible [3].

La cromósfera es la parte más baja de la atmósfera solar y se extiende hasta una altura media de $2\,000\text{ km}$ por encima de la fotosfera; es la capa irregular que se encuentra por encima de la fotosfera. En ella, la temperatura se eleva desde unos $6\,000\text{ }^\circ\text{C}$ en su base hasta $20\,000\text{ }^\circ\text{C}$ en las regiones exteriores [4]. Es habitual subdividir la corona solar

en tres zonas que varían su tamaño durante el ciclo solar: regiones activas, regiones de sol tranquilo y agujeros coronales.

Las regiones activas se sitúan en zonas de fuerte concentración de campos magnéticos, visibles como grupos de manchas solares en longitudes de onda ópticas o magnetogramas. Los procesos dinámicos en el sol tranquilo abarcan eventos como calentamiento de la red, nanoflamas, eventos explosivos, puntos brillantes y chorros de rayos X suaves, bucles transecuatoriales o arcos coronales, es decir, abarcan todas las regiones cerradas del campo magnético (excluyendo las regiones activas), lo que lo delimita de los agujeros coronales (abarcan las regiones abiertas del campo magnético) [7].

1.2 Radiación solar

La energía se transmite de tres maneras diferentes: conducción, convección y radiación. En la conducción y la convección, las moléculas funcionan como el medio necesario, ya que la energía no puede transmitirse en el vacío. Por ello, la energía solar no puede transmitirse a la Tierra por conducción y convección, pues la mayor parte de la gran distancia entre el Sol y la Tierra es vacío, por lo que la radiación es la manera en la que se transmite continuamente la energía del Sol a la Tierra [8]. La energía solar es el resultado de la radiación electromagnética liberada por el Sol y por las reacciones termonucleares que se producen en el interior de su núcleo [9].

La cantidad de luz solar que llega a la superficie de la Tierra depende de la radiación solar total, del ángulo cenital del Sol y de las variaciones cíclicas de la órbita que describe la Tierra alrededor del Sol, así como de la cantidad de luz solar que la atmósfera absorbe o irradia al espacio.

La radiación solar que no es absorbida o reflejada por la atmósfera (por ejemplo, por las nubes) llega a la superficie de la Tierra, la cual absorbe la mayor parte de esta energía, y una pequeña proporción vuelve por

reflexión al espacio. En total, sea la atmósfera o la superficie de la Tierra absorben aproximadamente el 70 % de la radiación incidente, mientras que el 30 % se refleja y vuelve al espacio, con lo cual no calienta el planeta (Figura 1.2) [10].



Figura 1.2
Absorción y reflexión de la radiación solar por la superficie terrestre.

Fuente: elaboración propia.

El balance de radiación de la Tierra (ERB) por sus siglas en inglés, es un concepto para comprender tanto la energía que la Tierra recibe del Sol como la que emite al espacio exterior. El ERB entra en desequilibrio cuando la Tierra recibe más energía del Sol. Como resultado, la Tierra emite más energía infrarroja. Si la Tierra emite más energía infrarroja de la que absorbe, se enfría. La energía recibida del Sol calienta la Tierra, mientras que la energía emitida disminuye la temperatura en la superficie [8, 11].

La radiación solar superficial muestra cierta tendencia en términos de variaciones espaciales y temporales. La radiación solar total anual absorbida por la superficie terrestre es siempre mayor en las zonas de baja latitud comparada a las de alta latitud, mientras que la variación estacional en las zonas de alta latitud es más significativa que en las de baja latitud. Teóricamente, en los equinoccios de primavera y otoño, el ecuador está expuesto a la luz solar directa y, por tanto, recibe la mayor cantidad de radiación del planeta, en tanto que el nivel de radiación disminuye progresivamente hacia las regiones polares.

La luz solar es el motor de procesos importantes en la Tierra como la fotosíntesis, mediante la cual plantas, algas y otros organismos convierten la energía solar en energía química libre para el uso de toda la vida en la Tierra. Sin embargo, también existe el “lado oscuro” del Sol, la emisión de radiación ultravioleta de onda corta que es o puede ser perjudicial para la vida en la Tierra [12].

1.3 Espectro solar

La radiación solar se origina principalmente en la fotosfera del Sol, cuya temperatura es de aproximadamente $5\,526.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ y abarca de 150 a 3 500 nm. En la propia fotosfera y en las capas superiores (cromósfera y corona) se producen procesos de emisión y absorción atómica que producen las llamadas “líneas Fraunhofer”. La potencia solar total muestra cierta variabilidad temporal, debido al periodo de rotación solar de 27 días y al ciclo de manchas solares de 11 años [13].

La medida de la energía solar disponible en la superficie terrestre procedente del Sol se denomina “irradiación solar”. Las mediciones espaciales de la irradiación solar han demostrado que la variabilidad natural del flujo solar en el rango de 280-400 nm es inferior al 1 %, a lo largo del ciclo de 11 años y 27 días de la actividad solar. Los cambios estacionales, diarios y geográficos de la iluminación en la superficie de la Tierra son causados por el cambio continuo de la elevación solar, es decir, el ángulo entre el plano horizontal y la posición aparente del Sol [12].

El espectro de radiación solar muestra su distribución según la longitud de onda. A pesar de la amplia gama de longitudes de onda de la radiación solar, se emite muy poca energía en forma de radiación de longitudes de onda muy largas o cortas; la mayor parte de la energía se concentra en el rango de longitudes de onda de 250-2 500 nm, que representa el 99 % de la radiación solar total. La longitud de onda máxima de la radiación es de aproximadamente 480 nm. A medida que la luz solar penetra en la atmósfera, la radiación solar es

atenuada mediante *absorción, dispersión y reflexión* [8], por ejemplo, si 100 unidades de energía entran en la atmósfera, 24 de ellas son reflejadas por las nubes y el suelo (20 y 4 unidades, respectivamente), 21 son dispersadas y absorbidas por la atmósfera (6 y 19 unidades, respectivamente) y las 51 unidades restantes son absorbidas por el suelo. A continuación, se muestran las bandas de frecuencia de la radiación emitida, en orden de longitud de onda creciente [13]:

- *Rayos X y UV extremo*: representa el 10^{-3} de la energía total emitida, varía con el ciclo solar.
- *UV*: un 9 % de la energía total emitida, varía con el ciclo solar.
- *Visible*: el 40 % de la producción total de energía, casi no varía con el ciclo solar.
- *Infrarrojo*: 51 % de la producción total de energía, casi no varía con el ciclo solar.
- *Radio*: una fracción ínfima de la producción total de energía (10^{-10}), pero muy sensible a los eventos solares hasta el punto de que durante algunos eventos solares el ruido radioeléctrico del Sol puede interferir en las comunicaciones.

El espectro de la radiación electromagnética solar entrante (250-2 500 nm), justo fuera de la atmósfera terrestre, muestra una forma de campana y define la temperatura del Sol ($\sim 6\,000\text{ °C}$) (Figura 1.3) [14]. Estas radiaciones solares son absorbidas por los gases atmosféricos como oxígeno (O_2), el ozono (O_3), el dióxido de carbono (CO_2) y el vapor de agua H_2O mediante un proceso selectivo, lo que significa que estos gases absorben la energía solar en determinadas bandas espectrales estrechas y no por igual en todo el espectro solar [14, 15].

La luz ultravioleta en longitudes de onda de $<0.18\ \mu\text{m}$ es fuertemente absorbida por el O_2 en altitudes superiores a los 100 km. El ozono por debajo de 60 km absorbe la mayor parte de los rayos UV entre 200-300 nm. La absorción atmosférica por encima de los 40 km da lugar a una atenuación de $\sim 5\%$ de la radiación solar entrante. En condiciones de

cielo despejado, otro 10-15 % es absorbido por la atmósfera inferior o se dispersa hacia el espacio, y entre el 80-85 % llega al suelo.

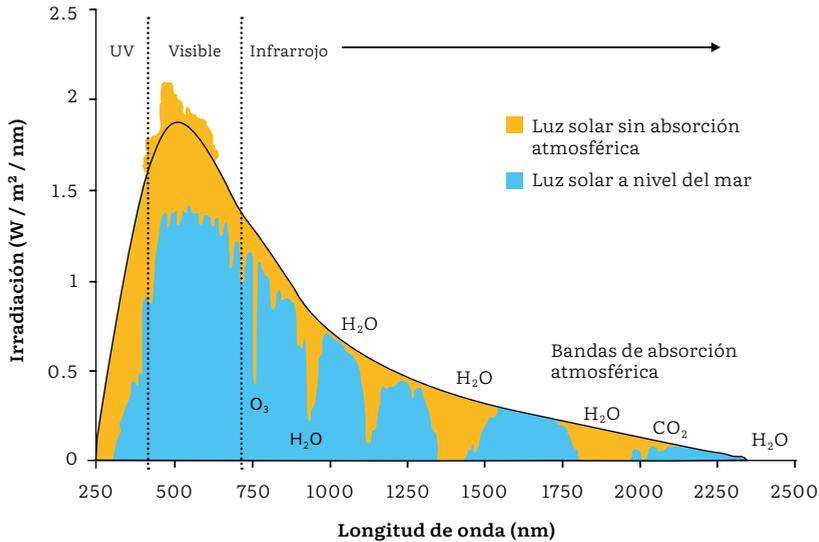


Figura 1.3
Diagrama del espectro de radiación solar.
Fuente: elaboración propia.

El equilibrio entre la radiación solar entrante y la radiación térmica saliente es la base de nuestras condiciones ambientales. La radiación electromagnética solar entrante transporta energía en pequeños paquetes que se caracterizan por su frecuencia y se denominan fotones.

La dependencia de la longitud de onda y la frecuencia de la energía del fotón es clave para determinar cómo interactuará con la materia; por ejemplo, un fotón que parte del centro del Sol tarda millones de años en llegar a la superficie, debido a la interacción de los fotones con la materia. A lo largo de su trayectoria, el fotón sufre un millón de colisiones con los átomos y iones de la materia, ganando o perdiendo energía cada vez; pero una vez que llega a la superficie, viaja en el vacío del espacio tardando solo 8.3 minutos en llegar a la Tierra [16].

La instrumentación radiométrica es fundamental en cualquier estación fija de radiación solar. Los radiómetros pueden dividirse en dos categorías principales: los que miden en una banda determinada e integran espectralmente la radiación de todas las longitudes de onda que contiene (instrumentos de banda ancha), y los que miden la radiación en longitudes de onda específicas (instrumentos espectrales). La primera categoría incluye piranómetros, pirheliómetros, pirgeómetros, UVmetros, radiómetros de banda de sombra giratoria (RSR) y albedómetros, mientras que la segunda incluye fotómetros de filtro de barrido (SFP) o escáneres de cielo, fotómetros solares, radiómetros de banda de sombra giratoria multifiltros (MFRSR), espectrómetros de banda de sombra giratoria (RSS), espectrorradiómetros, interferómetros y espectrómetros de rejilla [15].

1.3.1 Radiación visible

Casi la mitad de la radiación solar que llega a la Tierra es visible. Abarca el rango entre la radiación ultravioleta (es tan energética que a menudo es dañina) y la radiación infrarroja (no es muy energética, entre 380 nm y 700 nm). Esta ventana de radiación tiene una buena penetración en el agua. Por estas razones, muchos organismos han utilizado la radiación en este rango para la fotosíntesis, para la visión y para las señales ambientales [4].

La luz visible (VIS) (y el infrarrojo cercano) suele ser absorbida y emitida por los electrones de las moléculas y los átomos que pasan de un nivel de energía a otro. Si la radiación que tiene una frecuencia en la región visible del espectro electromagnético se refleja en un objeto y luego incide en los ojos, se produce la percepción visual de la escena [14].

En la luz blanca, el espectro visible contiene absolutamente todos los colores que somos capaces de ver los seres humanos, dependiendo de las propiedades de las ondas de luz (de sus longitudes de onda, específicamente), podemos hablar de los distintos colores (Figura 1.4),

del siguiente modo: rojo: 780-618 nm; naranja: 618-570 nm; amarillo: 581-570 nm; verde: 570-497 nm; azul: 476-427 nm; y violeta: 427-380 nm [15].

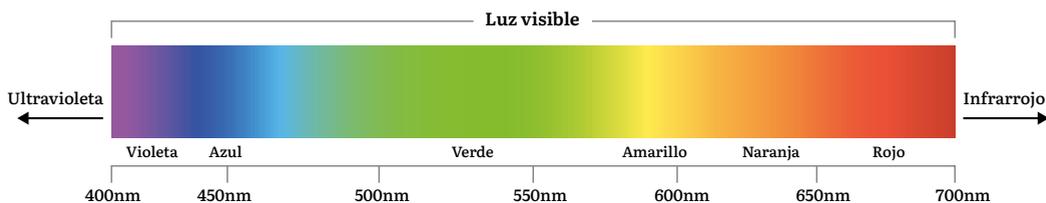


Figura 1.4
Espectro visible de la luz que puede percibir el ojo humano.
Fuente: elaboración propia.

1.3.2 Radiación ultravioleta

La radiación ultravioleta del Sol provoca importantes efectos sobre la Tierra. El término ultravioleta, a menudo abreviado como UV, se aplica a toda la gama de longitudes de onda, desde el extremo inferior del visible, a unos 0.4 m, hasta los rayos X, que comienzan a unos 0.03 m. Los límites exactos están sujetos a interpretación entre los distintos autores. Las diferentes partes del espectro UV suelen designarse como UV cercano (de 0.4 a 0.3 m), UV medio (de 0.3 a 0.2 m), UV lejano (de 0.2 a 0.1 m) y UV extremo (por debajo de 0.1 m). La radiación UV se divide, a su vez, en tres subregiones: UVA (320-400 nm), UVB (280-320 nm) y UVC (100-280 nm), donde los límites de la longitud de onda pueden tener pequeñas variaciones en la literatura, por ejemplo, 315 nm en lugar de 320 nm [17].

El espectro solar ultravioleta es muy rico en detalles, debido a las numerosas líneas de emisión y absorción de los diferentes elementos de la superficie solar y la corona. Los espectros en el extremo ultravioleta son de líneas brillantes, ya que la radiación proviene de las regiones de muy alta temperatura del Sol. Los espectros de longitudes de onda más largas, sin embargo, son de líneas oscuras, debido a la absorción

en la atmósfera solar que recubre las regiones más frías y de menor nivel, las cuales son las principales responsables de la radiación de longitudes de onda más largas [1].

La radiación ultravioleta fue importante en la creación del hábitat y la química prebiótica mucho antes de que surgiera la vida. Inició los procesos fotoquímicos que condujeron a la formación de O_2 y O_3 en la paleoatmósfera prebiológica. La formación de una capa de ozono estratosférico ha sido crítica en la evolución en el planeta Tierra, porque el ozono absorbe muy fuertemente la radiación de 220 a 330 nm, proporcionando protección contra una porción extremadamente peligrosa del espectro solar [4].

El Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT) es un laboratorio reconocido por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), que empezó a operar en 2017. En la Universidad Autónoma del Estado de México se encuentra una sede del LANOT, en donde se reciben distintas imágenes de varios satélites. Uno de esos satélites (GOES 16) monitorea constantemente al Sol, con la finalidad de ver su actividad y los efectos que puede tener en nuestro planeta [18].

El satélite GOES 16 cuenta con varios instrumentos, uno de ellos es el generador de imágenes ultravioleta solares, el cual es un telescopio que monitorea el Sol en la longitud de onda ultravioleta extrema que abarca aproximadamente el rango desde 124 nm hasta 10 nm [19, 20]. La actividad solar genera efectos en el clima espacial, lo que puede causar tormentas geomagnéticas que pueden ocasionar interrupciones en comunicación y navegación, además de causar daños por alta radiación a satélites que orbitan la Tierra [21]. El satélite GOES 16 captura una vista de la corona solar varias veces al día, al tomar imágenes del disco completo del Sol; las diferentes combinaciones de los filtros permiten identificar diferentes fenómenos solares como los agujeros coronales, morfología, energía solar por regiones, destellos, temperatura y el registro de emisiones.

A continuación, se muestran una serie de imágenes obtenidas del Sol el día 16 de mayo de 2024, empleando distintos canales [18]. Para observar la ubicación y la morfología de las llamaradas solares se emplea el SUVI 131 Å (Figura 1.5). Para observar la complejidad de la región activa, las eyecciones de masa coronal y las regiones tranquilas SUVI 195 Å (Figura 1.6). Para observar filamentos y regiones tranquilas SUVI 304 Å (Figura 1.7).

Figura 1.5
Ubicación y morfología
de las llamaradas solares [18].

LAN 
2024/05/16 19:08Z
SUVI 131



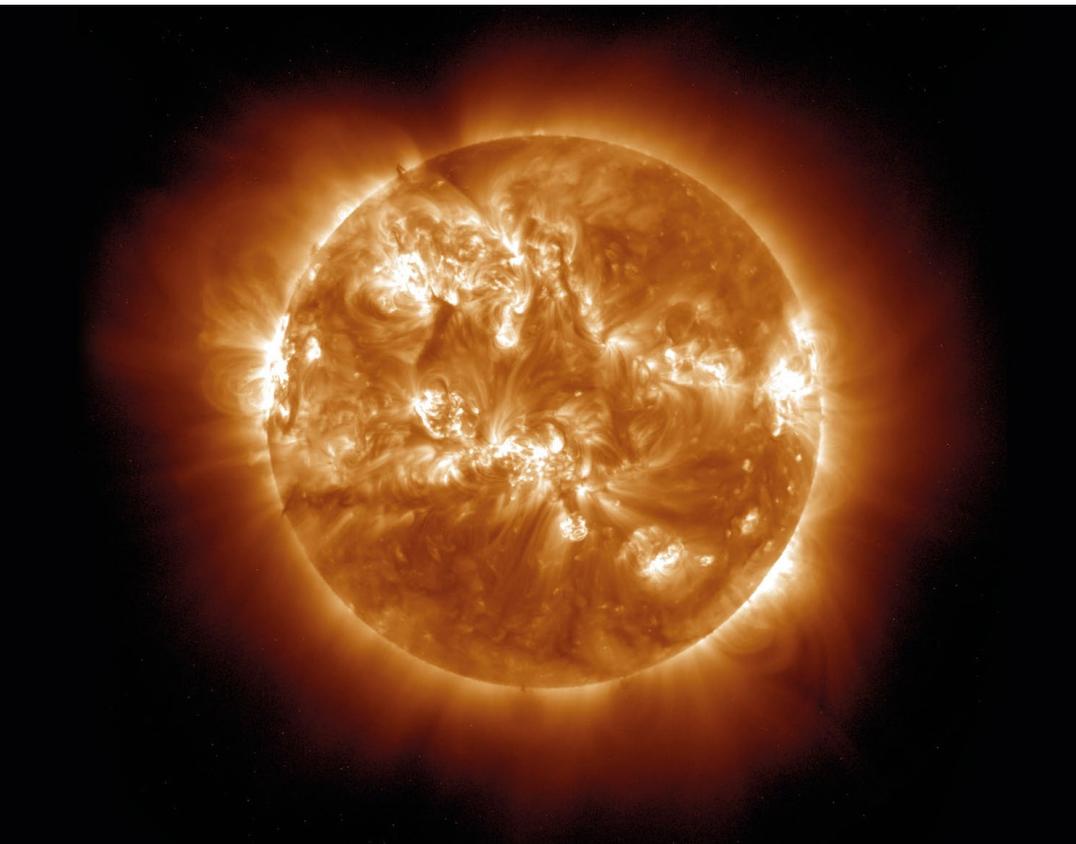


Figura 1.6
Región activa, eyecciones de masa coronal y regiones tranquilas [18].

LANO 
2024/05/16 19:08Z
SUVI195

1.4 La energía solar

La demanda mundial de energía está aumentando considerablemente, debido al crecimiento demográfico y a la evolución industrial. Por esta razón, la prevención de una crisis energética es uno de los temas más importantes del siglo XXI: cada país cuenta con sus propias estrategias, planes, políticas y medidas de control [22]. La Figura 1.8 muestra el aumento proporcional de la población mundial y el consumo de energía hasta el año 2020 [23-25].

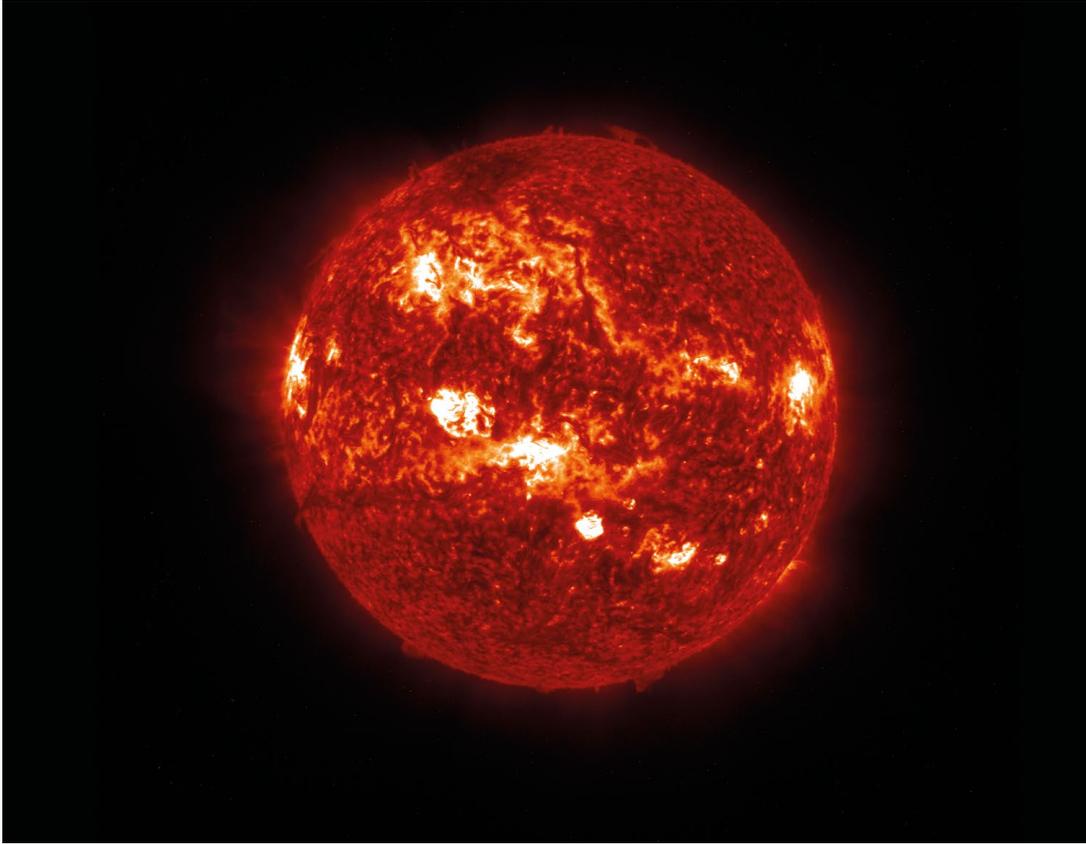


Figura 1.7
Filamentos y regiones tranquilas
[18].

LANO 
2024/05/16 18:58Z
SUVI 304

Como respuesta a esta demanda energética, los combustibles fósiles y las tecnologías tradicionales de producción de energía han dominado el suministro de energía. En consecuencia, el petróleo, el carbón y el gas natural representan más del 80 % de la producción mundial de energía primaria. Sin embargo, el uso generalizado de estos combustibles fósiles perjudica la calidad del medio ambiente en forma de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (responsables del 80 % de las emisiones de dióxido de carbono [CO₂] y del 60 % del total de las emisiones de GEI en el mundo) y fenómenos del cambio

climático (sequías, olas de calor, cambios en el nivel del mar, etc.). Debido al agotamiento de los combustibles fósiles y las consecuencias ambientales, la búsqueda de sustitutos ecológicamente seguros y sostenibles, conocidos como energías renovables (solar, eólica, hidroeléctrica, etc.), se ha vuelto necesaria y urgente [26].

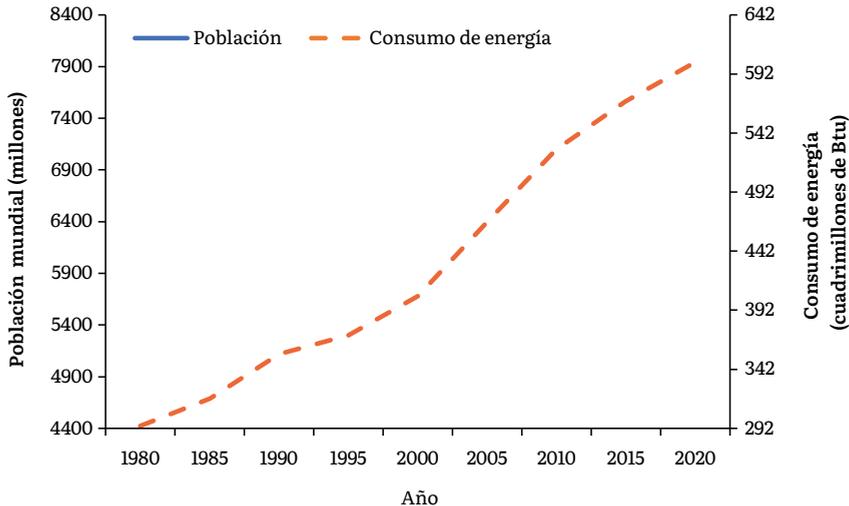


Figura 1.8
Población total vs. consumo de energía a nivel mundial.
Fuente: elaboración propia.

Se descubrió que la energía solar era más ecológica que los combustibles fósiles, ya que consumía 97 % menos agua y emitía 99 % menos emisiones que el carbón; además, es extremadamente barata y tiene un bajo mantenimiento, en comparación con otras fuentes de energía convencionales. Las desventajas más significativas de la energía solar son que solo está disponible durante horas de luz, así como su sensibilidad a las variaciones meteorológicas, por lo que esta no puede proporcionar por sí sola una fuente continua de energía eléctrica, lo que obliga a mantener el almacenamiento de energía en baterías y eleva el coste real de esta tecnología [27]. Se ha demostrado que las condiciones atmosféricas reducen la radiación solar directa en aproximadamente

un 10 % en los días claros y secos, y en un 100 % en los días con nubes, lo que provoca una disminución del flujo solar medio [28].

La medida de la energía disponible del Sol se denomina “insolación”, y puede expresarse en términos de “horas de Sol completas” (cinco horas de Sol completas = 5 h de luz solar a un nivel de irradiación de, por ejemplo, 1 000 W/m²). Está claro que algunas partes del mundo recibirán más energía y tendrán más o menos “horas de Sol completas”, ya que la producción de energía eléctrica, a partir del Sol, depende de la ubicación geográfica [29].

Nos enfrentamos a la realidad que no es una constante, ni será igual en todo el día, mucho menos los 365 días del año y no se absorbe de igual manera en toda la superficie terrestre. Para entender mejor la idea general de las “horas de Sol completas por día” para diferentes lugares, la Figura 1.9 muestra las regiones que tienen una mayor irradiación solar. Podemos observar que países como México cuenta con mayores cantidades de energía solar; si se aprovecha, el medio ambiente, el desarrollo tecnológico y la economía del país se verían afectados positivamente [30].

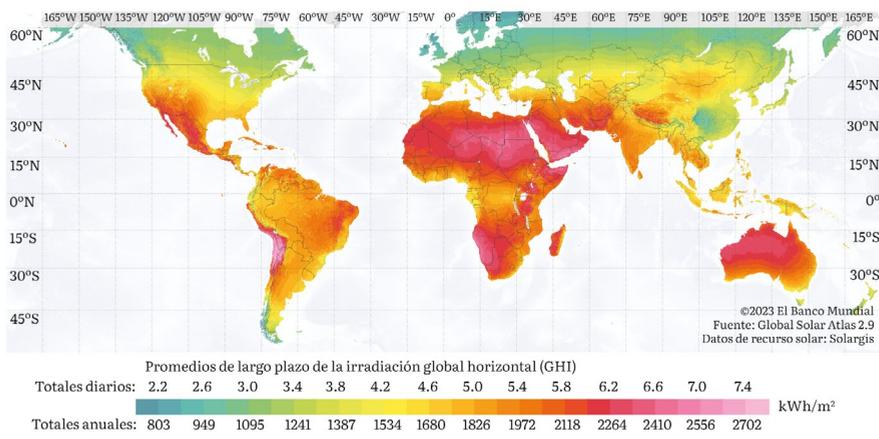


Figura 1.9
Mapa de la irradiación solar global horizontal del mundo [31].

Como se mencionó anteriormente, la medición de la energía recibida por el Sol sufre variaciones mensuales, diurnas y geográficas. Por ello, la tarea de la medición de la energía recibida del Sol es costosa tanto en superficies horizontales como en superficies planas; además, son pocos los datos fiables y de larga duración sobre la irradiación y los registros de luz diurna [32, 33]. La mayoría de los datos de radiación se obtienen a partir de la energía recibida en una superficie horizontal. Se ha creado una lista de estrategias de medición típica [28]:

- a. Radiación horizontal global registrada en una base integrada por días.
- b. Radiación horizontal global y difusa registrada en una base integrada por días.
- c. La irradiación horizontal global registrada sobre una base integrada horaria.
- d. La irradiación horizontal difusa y global registrada en una base horaria.
- e. La irradiación registrada en superficies de varias orientaciones e inclinaciones.
- f. La irradiación de incidencia normal utilizando un pirheliómetro.

La cantidad de radiación solar que incide sobre un material será transmitida, absorbida y reflejada, y dependerá de la longitud de onda (λ) de la radiación, el ángulo de incidencia y las propiedades ópticas del material. Estos tres procesos se caracterizan por la transmitancia (T), la absorbancia (A) y la reflectancia (R) del material, que denotan la fracción de la intensidad de la radiación incidente que es transmitida, absorbida o reflejada por el material [17].

El contar con datos de radiación solar fiables es de gran importancia, pues nos permite realizar un correcto uso y aplicación de la misma, por ejemplo, seleccionar los emplazamientos óptimos para grandes aplicaciones de energía solar (las centrales eléctricas), estimar el rendimiento de cualquier sistema de energía solar, diseñar sistemas

de energía solar óptimos para lugares específicos y valorar el rendimiento probable de las inversiones [34].

La radiación solar total transmitida a la Tierra es de 1.74×10^{17} W, mientras que el consumo energético global del mundo es de aproximadamente 1.84×10^{13} W [35]. El amplio potencial de suministro de energía solar hace que se considere, entre las fuentes de energía renovables, como el factor clave para la mejora energética mundial. Debido a esto, se ha desarrollado tecnología para convertir esta energía en formas útiles, principalmente calor y electricidad, como la calefacción solar, la fotovoltaica, la termosolar, la arquitectura solar y la fotosíntesis artificial [8]. La utilización de la luz solar para la generación de electricidad define la adopción de la energía solar, que puede utilizarse directamente mediante la fotovoltaica (FV), donde la energía del Sol en forma de fotones incide en las superficies para provocar el movimiento de los electrones, convirtiendo alrededor del 40.8 % de la luz solar en electricidad [30]. Según Hoeven, la energía solar contribuirá al 27 % de la generación mundial de electricidad en 2050, y los sistemas de energía solar fotovoltaica (FV) y de concentración (CSP) representarán el 60 % y el 40 %, respectivamente [36, 37].

Una gran aplicación de la energía solar es en el tratamiento de agua residual. Los tratamientos y los procesos de oxidación avanzada han mostrado una excelente respuesta para lograr la eliminación de compuestos persistentes en las aguas mediante su conversión a especies más amigables con el ambiente o, en el mejor de los casos, a la mineralización total; todo esto se ha tratado en diversos trabajos bibliográficos [38-41]. Sin embargo, uno de los principales problemas que ha impedido una aplicación real y a gran escala de esta tecnología, es su consumo energético y el costo de los materiales utilizados, como electrodos. La atención dentro de la investigación hacia el tratamiento de agua residual se ha enfocado en la utilización de energía solar como la principal fuente de energía para lograr la degradación de contaminantes presentes en el agua.

La participación de la radiación solar en la eliminación de metales pesados y productos químicos sintéticos en agua residual es una tecnología en desarrollo (la fotocatalisis solar, la desalinización solar, la desinfección solar, la desintoxicación y la pasteurización solares); por ejemplo, las aguas salobres y marinas se purifican y se convierten en agua potable portátil mediante un proceso de destilación y desalinización solar. Las radiaciones ultravioletas se utilizan en el proceso de desintoxicación solar para romper las moléculas contaminantes [42].

Los procesos fotoquímicos son de los sectores de investigación más importantes en materia de energía ecológica y con ello las tecnologías de tratamiento de agua residual que abordaremos en los siguientes capítulos enfocándonos en los procesos químicos UV y VIS; en el desarrollo histórico de catalizadores, su síntesis y propiedades; y en las aplicaciones de estos procesos dentro del tratamiento de agua residual. De igual manera, dedicaremos un capítulo a la destilación solar, ya que es uno de los tratamientos que ha vuelto a generar interés, dando a conocer sus aplicaciones más actuales en materia de aguas residuales.

Referencias

- [1] K.L. Coulson, “Ultraviolet Radiation from the Sun and Sky”, in: *Solar and Terrestrial Radiation*, K.L. Coulson ed., Academic Press, 1975, pp. 142–161. Available: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-192950-3.50009-7>
- [2] V.M. Canuto, J.S. Levine, T.R. Augustsson, C.L. Imhoff, M.S. Giampapa, “The young Sun and the atmosphere and photochemistry of the early Earth”, *Nature*, 305, pp. 281–286, 1983. Available: <https://doi.org/10.1038/305281a0>
- [3] M.J. Aschwanden, “The Sun”, in: *Encyclopedia of the Solar System (Third edition)*, T. Spohn, D. Breuer, T.V. Johnson eds., Elsevier, 2014, pp. 235–259. Available: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-415845-0.00011-6>

- [4] L.J. Rothschild, “The sun: The impetus for life”, in: *Evolution on Planet Earth*, L.J. Rothschild, A.M. Lister eds., Academic Press, 2003, pp. 87–107. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-012598655-7/50033-1>
- [5] J.A. Duffie, W.A. Beckman, *Solar engineering of Thermal Processes* (fourth edition), John Wiley & Sons, Inc., 2013. Available: <https://doi.org/10.1002/9781118671603.ch1>
- [6] Nasa/Gobbar, *The Sun*, 2013, Available: https://www3.nasa.gov/sites/default/files/images/469368main_sun_layers_unlabeled_full.jpg
- [7] I.S. Shklovskii, T. Page, “Physics of the Solar Corona”, *American Journal of Physics*, 1967.
- [8] A.C. Green, D.C. Whiteman, “Solar Radiation”, in: *Cancer Epidemiology and Prevention*. (3rd edn.), D. Schottenfeld, J.F. Fraumeni, Oxford Academic, 2009, pp. 294–305. Available: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195149616.003.0016>
- [9] J.A. Pérez-Peraza, I.Y. Libin, “Chapter 1 - Climate and Global Warming”, in *Highlights in Helioclimatology*, J.A. Pérez-Peraza, I.Y. Libin eds., Elsevier, 2012, pp. 3-31. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415977-8.00001-0>
- [10] Organización meteorológica mundial, “El sol, la Tierra y el tiempo”, pp. 1–4, 2019. Disponible en: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5762
- [11] J.L. Lean, G.J. Rottman, H.L. Kyle, T.N. Woods, J.R. Hickey, L.C. Puga, *Detection and parameterization of variations in solar mid- and near-ultraviolet radiation (200-400 nm)*, 1997, 939–956.
- [12] H.K. Seidlitz, S. Thiel, A. Krins, H. Mayer, “Chapter 36 - Solar radiation at the Earth’s surface”, in: *Comprehensive Series in Photosciences*, P.U. Giacomoni ed., Elsevier, 2001. Available: [https://doi.org/10.1016/S1568-461X\(01\)80071-5](https://doi.org/10.1016/S1568-461X(01)80071-5)
- [13] G. Lapenta, “Space weather: Variability in the Sun-Earth connection” in: *The Dynamical Ionosphere*, M. Materassi, B. Forte, A.J. Coster, S. Skone eds., Elsevier, 2020. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814782-5.00008-X>

- [14] J. Liang, “Radiation in the atmosphere”, in: Chemical Modeling for Air Resources, J. Liang ed., Academic Press, 2013, pp. 43–63. Available: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-408135-2.00003-3>
- [15] C.A. Gueymard, H.D. Kambezidis, “Solar spectral radiation”, in: Solar Radiation and Daylight Models, T. Muneer, C. Gueymard, H. Kambezidis eds., Butterworth-Heinemann, 2004, pp. 221–301. Available: <https://doi.org/10.1016/b978-075065974-1/50013-9>
- [16] V. Singh, I. Rayal, Priyanaka, H. Sharma, C. Dwivedi, B. Singh, “Solar radiation and light materials interaction”, in: Energy Saving Coating Materials, G.K. Dalapati, M. Sharma eds., Elsevier, 2020. Available: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822103-7.00001-7>
- [17] B.P. Jelle, “Solar radiation glazing factors for window panes, glass structures and electrochromic windows in buildings - Measurement and calculation”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 116, pp. 291–323, 2013. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.04.032>
- [18] Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT). Disponible en: <http://www.lanot.unam.mx/home/imagenes/goes16/>
- [19] Geostationary Operational Environmental Satellites-R Series A Collaborative NOAA - NASA program. Available: <https://www.goes-r.gov/products/baseline-solar-xray-imagery.html>
- [20] NOAA-NASA, GOES-R Series Data Book, GOES-R Ser. Progr., 2019, 240. Available: <https://www.goes-r.gov/downloads/resources/documents/GOES-RSeriesDataBook.pdf>
- [21] Space Weather Prediction Center, 2023. Available: <https://www.swpc.noaa.gov>
- [22] S. Shafiee, E. Topal, “When will fossil fuel reserves be diminished?”, *Energy Policy*, vol. 37, pp. 181–189, 2009. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.08.016>
- [23] Current world population, 2022. Available: <https://www.worldometers.info/world-population/>
- [24] Población mundial, 2022. Disponible en: https://datacommons.org/place/Earth?utm_medium=explore&mprop=count&pop-t=Person&hl=es

- [25] IEA, World Energy Outlook 2022, IEA, Paris, 2022. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>, Licence: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A).
- [26] J. Yu, H.B. Saydaliev, Z. Liu, R. Nazar, S. Ali, “The asymmetric nexus of solar energy and environmental quality: Evidence from Top-10 solar energy-consuming countries”, *Energy*, vol. 247, 2022. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123381>
- [27] R. Dutta, K. Chanda, R. Maity, “Future of solar energy potential in a changing climate across the world: A CMIP6 multi-model ensemble analysis”, *Renewable Energy*, vol. 188, pp. 819–829, 2022. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.023>
- [28] T. Muneer, “Daily Irradiation”, in: *Solar Radiation and Daylight Models*, 2004, pp. 72–96. Available: <https://doi.org/10.4324/9780080474410-14>
- [29] J.O. Oji, N. Idusuyi, T.O. Aliu, M.O. Petinrin, O.A. Odejebi, A.R. Adetunji, “Utilization of Solar Energy for Power Generation in Nigeria”, *International Journal of Energy Engineering* 2, pp. 54–59, 2012. Available: <https://doi.org/10.5923/j.ijee.20120202.07>
- [30] E.P. Agbo, C.O. Edet, T.O. Magu, A.O. Njok, C.M. Ekpo, H. Louis, “Solar energy: A panacea for the electricity generation crisis in Nigeria”, *Heliyon*, vol. 7, 2021. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07016>
- [31] The World Bank, Solar resource data: Solargis, 2017, Available: <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/world>
- [32] J. Peterson, F. Vignola, “Structure of a comprehensive solar radiation dataset”, *Solar Energy*, vol. 211, pp. 366–374, 2020. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.092>
- [33] K. Kulesza, J.S. Bojanowski, “Homogenization of incoming solar radiation measurements over Poland with satellite and climate reanalysis data”, *Solar Energy*, vol. 225, pp. 184–199, 2021. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.031>
- [34] D. Arvizu, P. Balaya LAs, L.F. Cabeza, T. Hollands, A. Jäger-Waldau, M. Kondo, C. Konseibo, V. Meleshko, W. Stein, Y. Tamaura, H. Xu, R. Zilles CAs, A. Aberle, A. Athienitis, S. Cowlin, D. Gwinner, T. Huld, T. James, L. Kazmerski, M. Mann, K. Matsubara, A. Meier, E. Morofsky, A. Mujumdar, T. Oozeki, O.

- Sanogo, M. Santamouris, M. Sterner, Chapter 3 Direct Solar Energy, in: Second Order Draft Contribution to Special Report Renewable Energy Sources, 2010. Available: <https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/drafts/Chapter%2003%20SOD.pdf>
- [35] I. Sarbu, C. Sebarchievici, “General review of solar-powered closed sorption refrigeration systems”, *Energy Conversion and Management*, vol. 105, pp. 403–422, 2015. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.084>
- [36] S. Shoeibi, H. Kargarsharifabad, S.A.A. Mirjalily, M. Sadi, A. Arabkoohsar, “A comprehensive review of nano-enhanced phase change materials on solar energy applications”, *Journal of Energy Storage*, vol. 50, 2022. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104262>
- [37] J.A. Duffie, W.A. Beckman, “Solar Heating and Cooling”, in: *Renewable Energy*, B. Sorensen ed., 2011. Available: <https://doi.org/10.4324/9781315793245-68>
- [38] C.E. Barrera Díaz, M. Rodríguez Peña, coords., *Procesos de oxidación avanzada en el tratamiento de agua*, Primera, UAEMEX, México, 2021.
- [39] A. Fujishima, Y. Einaga, T.N. Rao, D.A. Tryk, “Diamond Electrochemistry”, Elsevier Science, 2005.
- [40] C.A. Martínez-Huitle, M.A. Rodrigo, I. Sirés, O. Scialdone, “Single and Coupled Electrochemical Processes and Reactors for the Abatement of Organic Water Pollutants: A Critical Review”, *Chemical Reviews*, 115, 13362–13407, 2015. Available: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00361>
- [41] C. Barrera Díaz, P. Cañizares, F.J. Fernández, R. Natividad, M.A. Rodrigo, “Electrochemical Advanced Oxidation Processes: An Overview of the Current Applications to Actual Industrial Effluents”, *Journal of the Mexican Chemical Society*, 58, pp. 256–275, 2014. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-249X2014000300003
- [42] A.K. Pandey, R. Reji Kumar, K.B. I.A. Laghari, M. Samykan, R. Kothari, A.M. Abusorrah, K. Sharma, V.V. Tyagi, “Utilization of solar energy for wastewater treatment: Challenges and

progressive research trends”, Journal of Environmental Management, 297, 2021. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113300>

Capítulo 2

PROCESOS FOTOQUÍMICOS

Dentro del tratamiento de aguas residuales, los Procesos de Oxidación Avanzada (POAs) han demostrado ventajas sobre los tratamientos convencionales de aguas residuales, por ejemplo, biológicos, pues logran degradar compuestos orgánicos persistentes. Los POAs incluyen los procesos fotoquímicos que han ganado interés en la última década, debido a que son una alternativa de fácil operación, económica y sostenible para el tratamiento de aguas residuales, al mismo tiempo cuentan con un carácter desinfectante y logran purificar aguas destinadas al consumo humano. Estos procesos tienen como principio el uso de una fuente de luz renovable, gratuita y limpia como la radiación solar, la cual es la principal razón de estudio y escalamiento hacia aplicaciones reales.

Los procesos de oxidación avanzada fotoquímicos, basados en UV, suelen dividirse en oxidación inducida por UV y oxidación catalizada por UV (Figura 2.1). La oxidación inducida por UV incluye procesos UV/ H_2O_2 , UV/ O_3 , UV/Cloro y UV/Persulfato, donde la radiación UV activa el H_2O_2 y el O_3 para generar el radical hidroxilo $\cdot OH$ (Ec. 2.1) e induce el hipoclorito para producir especies reactivas de cloro (Ecs. (2.2-2.5) y el persulfato (incluyendo peroximonosulfato PMS y peroxodisulfato PDS) para producir (Ecs. 2.6-2.7), que a su vez generan (Ecs. 2.8-2.10), el cual aumenta la eficiencia del proceso en la degradación de contaminantes. En la oxidación catalizada por UV encontramos la fotocatalisis, donde el TiO_2 es el catalizador más utilizado, pues cuando absorbe energía ultravioleta superior a su banda de separación, los electrones se excitan desde la banda de valencia a la banda de conducción, formando electrones (e^-) con alta capacidad reductora y huecos (h^+) con alta capacidad oxidante (Ec. 2.11). Los electrones reducen el oxígeno para producir el radical, mientras que los huecos normalmente reaccionan con el H_2O para formar el $\cdot OH$, fuertemente oxidante (Ecs. 2.12-2.13) [1].

$H_2O_2 + hv \rightarrow 2 \cdot OH$	2.1
$HClO/ClO^- + hv \rightarrow 2 \cdot OH / O \cdot^- + Cl \cdot$	2.2
$\cdot OH + HClO \cdot \rightarrow ClO \cdot + H_2O$	2.3
$\cdot OH + ClO^- \rightarrow ClO \cdot + OH^-$	2.4
$Cl^- + \cdot Cl \cdot \leftrightarrow Cl_2 \cdot^-$	2.5
$S_2O_8^{2-} + hv \rightarrow 2SO_4 \cdot^-$	2.6
$HSO_5^- + hv \rightarrow SO_4 \cdot^- + \cdot OH$	2.7
$SO_4 \cdot^- + H_2O \rightarrow SO_4^{2-} + HO \cdot + H^+$	2.8
$SO_4 \cdot^- + OH^- \rightarrow SO_4^{2-} + \cdot OH$	2.9
$SO_4 \cdot^- + OH^- \rightarrow SO_4^{2-} + \cdot OH$	2.10
$TiO_2 + hv \rightarrow TiO_2 + h^+ + e^-$	2.11
$O_2 + e^- \rightarrow \cdot O_2^-$	2.12
$h^+ + H_2O \rightarrow \cdot OH + H^+$	2.13

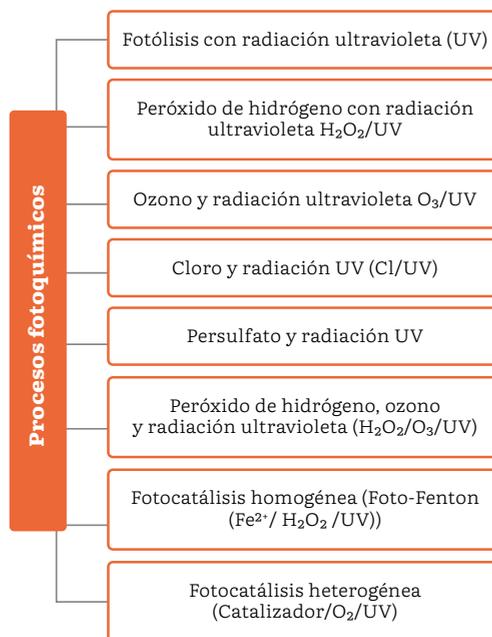


Figura 2.1
Procesos fotoquímicos empleados en el tratamiento de aguas residuales.

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 2.1 podemos observar la aplicación de estos procesos en el tratamiento de aguas residuales.

Tabla 2.1 Revisión sobre la aplicación de tratamiento fotoquímico.

Tipo de agua residual/contaminante	Tratamiento fotoquímico	Eficiencia	Observaciones
Agua residual urbana [2]	Luz solar/ H ₂ O ₂	Se logró inactivar E. coli y P. aeruginosa, incluidas las colonias de estas especies cultivables en 120-150 min y 16-20 kJ L ⁻¹ .	El proceso con luz solar requiere 142 min más que con UV artificial; además, tras 48 h de almacenamiento, posterior al tratamiento de las muestras tratadas con luz solar/H ₂ O ₂ , se produjo un nuevo crecimiento bacteriano, lo que sugiere que el tratamiento no solo fue más largo, sino que tampoco proporcionó una desinfección completa y permanente.
Aguas residuales marinas oleosas [3]	O ₃ /UV	Los resultados muestran que el proceso acoplado UV/O ₃ /PS puede mejorar significativamente la eliminación, superior al 90% en 30 min, en comparación con los procesos por separado.	Un análisis más profundo sobre la generación de radicales libres y el destino e impacto de los subproductos puede ayudar a obtener una comprensión global, así como a optimizar el diseño y funcionamiento del sistema; la toxicidad para diferentes especies, la evaluación de la toxicidad crónica de muchos organismos marinos (microbios, crustáceos, vertebrados).

Continúa

Ciprofloxacina (CIP) [4]	UV/cloro	El tratamiento acoplado UV/cloro mejora la degradación del antibiótico, logrando una eliminación total en 9 min, comparado con un 41.2 % de remoción por fotólisis UV y un 30.5 % por cloración oscura en 30 min.	La degradación de cip en el proceso UV/cloro se atribuyó principalmente al ataque de especies reactivas y a las contribuciones relativas de los electrones hidratados (e_{aq}^-), radicales hidroxilos ($\cdot OH$), átomos de cloro (Cl^-) y fotólisis UV. El CIP y las materias orgánicas naturales se eliminaron eficazmente en agua real.
Amoxicilina y ciprofloxacino de efluentes hospitalarios [5]	UV/PS	Los resultados mostraron que la mayor eliminación de ciprofloxacino y amoxicilina (99.9 % y el 99.26 %, respectivamente) se observó con un tiempo de reacción de 60 min y una concentración de persulfato de 10 mg L ⁻¹ .	El uso de persulfato no aumentó significativamente el contenido de sulfato y nitrato de las aguas residuales. Los resultados del estudio, en cuanto a la tasa de mineralización, mostraron que la tasa de mineralización era insignificante, a pesar de que el proceso aplicado tenía un buen efecto en la eliminación de los antibióticos. Parece que se requiere un tiempo de reacción largo para la mineralización completa de los antibióticos.
Aguas subterráneas y residuales (sulfametoxazol, SMX) [6]	TiO ₂ / UV	Se pudo conseguir una degradación y mineralización casi completas del smx, tras 30 y 120 min de reacción, respectivamente, a concentraciones de 10 mg/L de smx y 250 mg/L de catalizador.	El rendimiento del proceso se ve afectado por varios factores: el tiempo de irradiación; el tipo y la carga del fotocatalizador; la presencia de aceptores de electrones, y el pH de la solución.

La mayoría de estos procesos como la fotólisis UV, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, O_3/UV utilizan radiación UV artificial para lograr altas eficiencias en la degradación de contaminantes; esto puede ser una desventaja, debido al alto consumo energético de las lámparas UV, lo cual aumenta el costo de operación en el tratamiento de agua. De esta manera, los POAs que sustituyen la luz artificial por la radiación solar parecen ser una opción más viable y atractiva. En este sentido, la fotocatalisis homogénea y heterogénea se convierte en uno de los tratamientos de agua más completos y rentables, pues utiliza recursos renovables como la radiación solar y materiales semiconductores, al mismo tiempo tiene una menor aportación de elementos químicos a las aguas a tratar y utiliza oxígeno natural como oxidante, a diferencia de otros procedimientos que emplean oxidantes muy caros como el H_2O_2 y el O_3 [7].

2.1 Fotocatálisis

La fotocatalisis es el proceso de aceleración de una reacción química con la ayuda de un catalizador, mediante la absorción de la fuente de luz [8]. “Es una reacción fotoquímica que convierte la energía solar en energía química en la superficie de un catalizador. Una vez activada la superficie del fotocatalizador por la radiación, se induce la formación de dos tipos de portadores: un electrón y un hueco. Para producirlos se debe aportar energía suficiente para promover el electrón de la banda de valencia a la banda de conducción, lo que deja este hueco en la banda de valencia” [9]. “Los huecos generados en la banda de valencia pueden inducir procesos de oxidación, mientras que los electrones de la banda de conducción procesos de reducción, que interactúan con los reactivos cuando estos se adsorben en la superficie del catalizador” [10] (Figura 2.2).

De esta manera, la oxidación fotocatalítica consiste en el empleo de radiación UV o visible, y catalizadores, con el objeto de formar el radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$), uno de los oxidantes más potentes conocidos, que puede destruir rápida y eficazmente los contaminantes

contenidos en el agua en CO_2 , H_2O y sales minerales [8]. Sin embargo, la fotooxidación del contaminante puede producirse de dos maneras: fotocatalisis directa y fotocatalisis mediada.

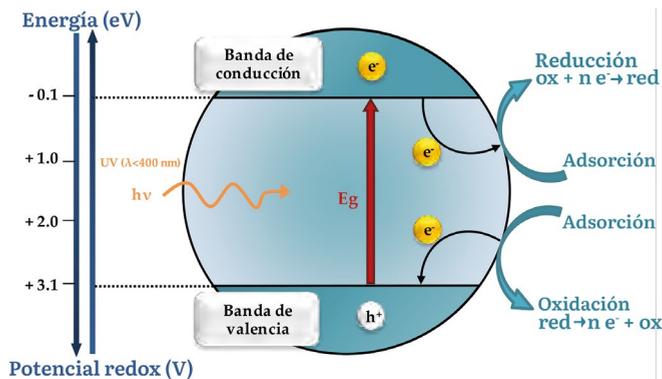


Figura 2.2
Diagrama de una reacción fotocatalítica [10].

2.1.1 Fotocatalisis directa

En este proceso los contaminantes orgánicos disueltos presentes en la solución se transferirán de la fase líquida o gaseosa a la fase sólida y se adsorberán en la superficie del catalizador. A continuación, es oxidado directamente por el hueco (h^+) formado en la banda de valencia del catalizador (Ec. 2.14).



2.1.2 Fotocatalisis mediada

En este proceso el hueco (h^+) formado en la banda de valencia del catalizador reacciona inicialmente con la molécula de agua (H_2O) para formar radicales hidroxilos ($\cdot\text{OH}$). A continuación, el $\cdot\text{OH}$ oxida el contaminante orgánico disuelto presente en la solución (con/sin adsorción en la superficie del catalizador semiconductor) y mineraliza

el contaminante a dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O) (Ecs. 2.15-2.16) [11]. Dentro del tratamiento de agua residual, muchas veces se buscan las degradaciones parciales de los contaminantes para llevar su degradación a otros tratamientos acoplados que nos ayuden a alcanzar los límites máximos para su vertido o la calidad necesaria para su reúso. En este sentido, la fotocátalisis mediada no es la mejor opción, pues el radical hidroxilo oxida prácticamente todos los compuestos orgánicos y no muestra una selectividad como en la oxidación directa. Sin embargo, la selectividad puede controlarse, mediante el catalizador y sus propiedades para favorecer la oxidación mediada o directa, o gracias al uso de foto-reactores [12].



“Cuando en el proceso fotocatalítico uno de los reactantes y el catalizador se encuentran en solución se dice que el proceso es homogéneo (foto-fenton, por ejemplo). En el proceso fotocatalítico heterogéneo el catalizador es sólido y los reactantes generalmente son líquidos, aunque también se emplea para purificar corrientes gaseosas y especialmente de aire. La fotocátalisis heterogénea ofrece excelentes ventajas, siendo la recuperación relativamente sencilla del catalizador y su re-uso [sic] una de las más prometedoras” [12]. También se compone de una serie de reacciones como el transporte de hidrógeno, la desintoxicación del agua, la deposición de metales, la eliminación de contaminantes gaseosos y acuosos, etc. Además, es una técnica ecosostenible que se ha revelado como un método viable para la degradación de una amplia gama de contaminantes orgánicos. Esta tecnología puede tratar aguas residuales con baja biodegradabilidad, alta complejidad y altas concentraciones de contaminantes. “Esta es, de hecho, la principal aplicación de la fotocátalisis heterogénea” [12].

En el proceso de fotocátalisis existen parámetros que son de suma importancia para mejorar la eficiencia del proceso dentro del tratamiento de agua residual como el fotocatalizador (sus propiedades y masa), la calidad del agua residual, el pH del medio, la temperatura

y la longitud de onda de la radiación, por lo que la radiación solar como fuente de energía resulta ser una ventaja para este proceso que añade sostenibilidad, en comparación con otros tratamientos para el agua residual [13]; por ejemplo, “cuanto mayor sea la dosis del [foto] catalizador, mayor será la velocidad de la reacción y se cree que mayor será la eficiencia obtenida” [13]. Sin embargo, una dosis superior a la óptima aumenta la turbidez del agua, debido a las partículas, lo que dificulta la difusión de la luz y disminuye la eficiencia. Por su parte, los parámetros de temperatura y pH pueden afectar el tamaño de las partículas, la carga superficial y las posiciones de los máximos y mínimos de las bandas, en el caso de usar TiO_2 como fotocatalizador, debido a su carácter anfotérico, por lo que resulta más óptimo trabajar con un pH diferente del punto isoeléctrico para el TiO_2 (pH 7), donde la superficie no esté cargada. En cuanto a la calidad del agua, el oxígeno disuelto es clave, ya que si disminuye, el proceso fotocatalítico se detiene totalmente [14].

De acuerdo con el capítulo anterior sobre radiación solar, el espectro solar está compuesto de la siguiente manera: el 9 % corresponde al rango UV, entre 300 y 400 nm longitudes de onda; el 40 % a la región visible, entre 400 y 700 nm; y el 51 % a la región del cercano infrarrojo, entre 700 y 2 500 nm [15]. Esta distribución dentro de la fotocatálisis es de suma importancia, pues determina el rango de longitud de onda en la que el proceso trabajará; de esta manera, se han estudiado dos tipos de fotocatálisis: UV y Visible.

La longitud de onda en la que se lleva a cabo la fotocatálisis depende principalmente del material que se utiliza como fotocatalizador. La mayoría de los fotocatalizadores son semiconductores de ancho *bandgap* que solo pueden utilizar la fracción UV de la luz solar para producir pares electrón-hueco, por lo que solo aprovecharían una pequeña fracción del espectro solar [16]. Esto, junto con las limitaciones horarias, hace que en fotocatálisis se utilicen habitualmente fuentes de luz UV artificiales, con el fin de obtener mayores eficiencias en su aplicación para la degradación de contaminantes, lo que lo vuelve un proceso más caro y difícil de escalar [17]. Lo anterior, da lugar a que

la investigación y esfuerzos en el estudio de la fotocatalisis se centren en el desarrollo de fotocatalizadores capaces de absorber luz visible.

Como observamos, el fotocatalizador es el componente clave en la fotocatalisis, lo que lo vuelve comparativamente una mejor técnica de tratamiento entre los diferentes métodos disponibles para la remediación de aguas residuales, ya que da lugar a un proceso de reacción rápida y suave con una buena selectividad, además de que no es peligroso. En la siguiente sección se hablará sobre los fotocatalizadores activos en la región UV ($\lambda 400$ nm) y Visible ($\lambda 400$ nm), su papel dentro del tratamiento del agua residual, su síntesis y/o elaboración, propiedades, aplicaciones y eficiencias.

2.2 Fotocatalizadores

Para que se dé la reacción fotocatalítica, es necesario contar con un fotocatalizador: un material semiconductor de banda ancha capaz de acelerar la velocidad de las reacciones de oxidación. Los semiconductores producen pares “electrón-hueco” con un buen potencial oxidante, lo que los vuelve capaces de mineralizar y neutralizar contaminantes contenidos en el agua. La actividad oxidante de los fotocatalizadores proviene de los radicales hidroxilos producidos de pares electrón-hueco (e^-/h^+), que se crean cuando la energía de los fotones supera el valor de los huecos de banda, pues el electrón (e^-) se asienta en la banda de conducción, después de abandonar su lugar en la banda de valencia, generando un hueco (h^+) en la banda de valencia [18].

Los electrones deben estar en la banda de conducción para que exista movimiento, por lo que “es necesario proporcionar energía al material para que los electrones se transfieran de la banda de valencia a la de conducción, la energía requerida debe ser al menos igual al valor de la banda prohibida” [19]. Cuando la luz irradia un semiconductor con una banda prohibida (EG) cercana o inferior a la energía de la luz, los electrones que inicialmente se encontraban en la banda de

valencia del semiconductor son excitados a la banda de conducción, lo que genera huecos libres en la banda de valencia. Los electrones y huecos excitados pueden reaccionar con moléculas de agua u oxígeno para formar sustancias químicas reactivas, denominadas radicales de especies reactivas de oxígeno, como el radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) y el superóxido ($\cdot\text{O}_2^-$), que a su vez pueden degradar moléculas contaminantes [20, 21].

Las propiedades de los semiconductores tienen mucho que ver en su actividad fotocatalítica y, por ende, en su eficiencia para degradar contaminantes contenidos en el agua, además de contar con características como robustez, rentabilidad, toxicidad y accesibilidad para lograr su aplicación exitosa en el tratamiento de agua. Dentro de las propiedades principales se encuentran [22]:

- Propiedades ópticas: coeficiente de absorción, coeficiente de extinción, coeficiente de dispersión y energía de banda prohibida.
- Propiedades estructurales: tamaño de cristal y fases cristalográficas, vibración molecular, composición química y arreglo atómico.
- Propiedades morfológicas: propiedades superficiales y espesor de la película.
- Propiedades de superficie: área superficial y tamaño de poro.

Dos parámetros principales que determinan la actividad fotocatalítica de los semiconductores y, por tanto, su capacidad para descomponer contaminantes son: (i) el *bandgap*, dado que más de la mitad de la luz solar se compone de luz visible, por lo que los materiales que poseen un *bandgap* más estrecho pueden utilizar una parte más significativa de la luz solar, lo que puede mejorar la eficiencia fotocatalítica; (ii) el tiempo de vida de los portadores de carga, ya que es probable que los electrones y los huecos fotogenerados interactúen cuando estén próximos espacialmente y esta recombinación conduce a su aniquilación antes de alcanzar la superficie del semiconductor

donde se producen las reacciones fotocatalíticas, con lo que se pierde actividad fotocatalítica. Además de estos dos parámetros, la estabilidad de los semiconductores es un factor que debe tenerse en cuenta para su uso eficiente en el tratamiento de aguas residuales. Algunos semiconductores sufren la foto-corrosión en la que electrones o huecos excitados reducen u oxidan un semiconductor por sí mismo bajo iluminación, lo que conduce a la descomposición de los semiconductores y a la subsiguiente contaminación del agua. Para evitar este proceso perjudicial, a menudo se prefieren los semiconductores de óxido por su gran estabilidad eléctrica y física [20].

Los semiconductores más utilizados en el proceso de fotocatálisis incluyen TiO_2 [23], ZnO [8], WO_3 [24], CdS [25], Fe_2O_3 [26], Cu_2O [27], CdSe [28], etc. Entre ellos, los catalizadores de TiO_2 han sido los más utilizados por sus propiedades únicas: su gran capacidad redox, bajo costo, no toxicidad y estabilidad química. Sin embargo, también tienen algunos inconvenientes, como una mayor energía de banda prohibida de 3.2 eV que requiere excitación con luz ultravioleta, lo que la hace costosa. Para excitar el TiO_2 con luz visible, es necesario reducir la banda prohibida del TiO_2 . En este sentido, se han producido avances y mejoras significativas en el rendimiento fotocatalítico de los materiales semiconductores para el tratamiento de aguas residuales y la depuración del agua. Estos avances se han centrado en la utilización de fotocatalizadores capaces de absorber la luz visible proveniente de la radiación solar y así poder aprovechar una mayor porción del espectro solar, haciendo de este proceso un tratamiento de aguas residuales sostenible y viable para su aplicación.

Se han propuesto estrategias para la modificación de estos semiconductores, por ejemplo, dopar el semiconductor con metales y no metales, y el acoplamiento de semiconductores. Los retos más importantes son la escalabilidad y la estabilidad de los fotocatalizadores para matrices prácticas de aguas residuales y subterráneas, por lo que es necesario crear materiales con una longevidad suficiente para que el proceso de fotodegradación sea económicamente viable a largo plazo.

2.3 Tipos de modificación de los fotocatalizadores

Las propiedades de los fotocatalizadores pueden ser modificadas para nuestro beneficio, a través de técnicas y métodos utilizados en la síntesis, con el fin de controlar el tamaño y forma de las partículas; reducir la energía de banda prohibida para la excitación del catalizador en el espectro visible; y aumentar la eficiencia fotocatalítica. En este sentido, se presentan las técnicas de modificación: el dopaje metálico/no metálico, el acoplamiento, la modificación estructural y la deposición de metales nobles en la superficie.

2.3.1 Dopaje

Entre las diversas técnicas de dopaje adoptadas se encuentran: dopaje metálico, dopaje no metálico y co-dopaje con diferentes elementos; por ejemplo, la adición de dopantes metálicos o no metálicos induce nuevos niveles de energía dentro de la banda prohibida del TiO_2 , lo que da como resultado que el TiO_2 pueda excitarse con una energía relativamente más baja, es decir, con luz de mayor longitud de onda; por lo tanto, en lugar de luz UV, el TiO_2 dopado puede excitarse con luz visible y aprovechar el mayor porcentaje de radiación solar.

2.3.1.1 Dopado metálico

La incorporación de metales como plata (Ag), platino (Pt), oro (Au), rutenio (Ru), iridio (Ir), escandio (Sc), cobre (Cu), hierro (Fe), níquel (Ni) se utiliza para reducir la energía de banda prohibida del semiconductor y para excitarlo/activarlo mediante luz visible, al mismo tiempo facilita la absorción del electrón fotogenerado, reduciendo la recombinación del par electrón-hueco y haciéndolo disponible para la degradación de contaminantes. De esta manera, el dopaje con un metal específico conduce: (i) a la ampliación de la absorción óptica hacia longitudes de onda más largas; (ii) a la mejora de la adsorción superficial de especies

químicas; (iii) al progreso de la conductividad eléctrica a través de la modificación de las propiedades de los portadores de carga (movilidad, difusión, concentración), y (iv) a una separación más eficiente de los portadores de carga fotogenerados [29]. Generalmente, los dopantes metálicos se añaden cerca de la banda de conducción (BC) para formar nuevos niveles de energía por debajo de la banda de conducción (Figura 2.3). En el caso del dopado metálico al TiO_2 , se entiende la sustitución del Ti^{4+} por iones metálicos adecuados [11].

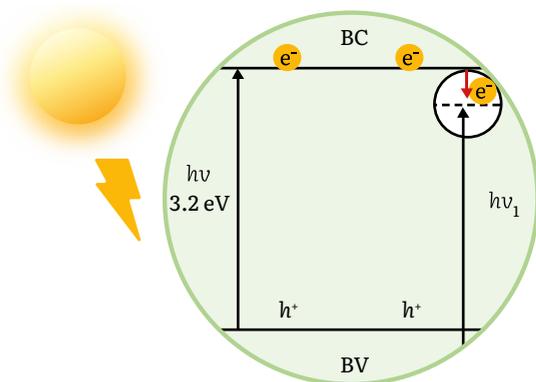


Figura 2.3
Nivel de energía del TiO_2 dopado con metales.
Fuente: elaboración propia basada en la referencia [11].

2.3.1.2 Dopado no metálico

El *bandgap* de un semiconductor puede reducirse incorporando dopantes aniónicos no metálicos como nitrógeno (N), carbono (C), azufre (S), boro (B) y flúor (F). Generalmente, los dopantes no metálicos se incorporan cerca de la banda de valencia, pero no participan en la separación del portador de carga (Figura 2.4). Los estudios han demostrado que los dopantes aniónicos no metálicos son más eficaces para ampliar el rango de absorción de luz del TiO_2 a la región de luz visible que los dopantes metálicos catiónicos. Se ha visto que los nanomateriales de TiO_2 , dopados con N y C, tienen una actividad fotocatalítica superior bajo excitación de luz visible, a diferencia de otros dopantes aniónicos no metálicos.

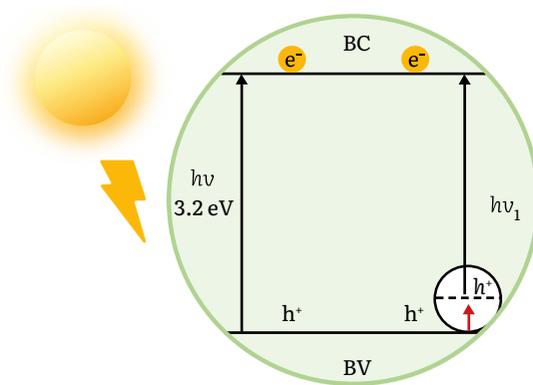


Figura 2.4
Niveles de energía del TiO_2 dopado con no metales.

Fuente: elaboración propia basada en la referencia [11].

2.3.2 Co-dopaje

El co-dopaje se refiere no solo a dopar el semiconductor con un solo material, sino con dos o más; de igual manera, puede hacerse con metales [30] y no metales [31]. Esto da lugar a la formación de nuevos niveles de energía dentro de la banda de dispersión del semiconductor y, por tanto, a aumentar la capacidad de absorción de luz visible; por ejemplo, en el caso del TiO_2 , la sustitución del Ti^{4+} , dentro del TiO_2 , por un dopante metálico crea un nuevo nivel de dopaje justo por debajo de la banda de conducción; por el contrario, el dopante no metálico creará un nuevo nivel de dopaje justo por encima de la banda de valencia (Figura 2.5).

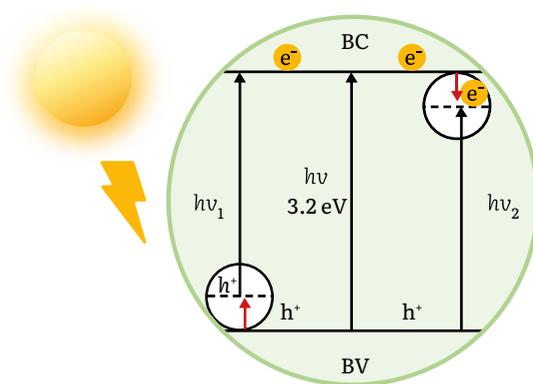


Figura 2.5
Nivel de energía del TiO_2 co-dopado con metal y sin metal.

Fuente: elaboración propia basada en la referencia [11].

2.3.3 Acoplamiento

El acoplamiento es una de las técnicas utilizadas para reducir la energía de banda prohibida de un semiconductor acoplándolo con otro semiconductor. Un semiconductor TiO_2 se acopla con otro semiconductor como WO_3 , SiO_2 , SnO_2 , MnCO_3 , CdS , Ag_3VO_4 o ZnO y un material poroso con una gran superficie (carbón activado). El acoplamiento mejora la fotodegradación por luz visible de los contaminantes, en comparación del semiconductor puro; por ejemplo, la excitación por luz visible del TiO_2 acoplado a CdS se produce de la siguiente manera: (i) excitación con luz visible del e^- desde la banda de valencia (BV) a la banda de conducción (BC) del CdS (energía de banda prohibida 2.25eV), (ii) transferencia del e^- desde la BC del CdS a la BC del TiO_2 (Figura 2.6), (iii) excitación con luz visible del e^- desde la BV del TiO_2 a la BV del CdS por la energía de la luz visible, y (iv) formación de un hueco en la BV del TiO_2 . Uno de los puntos clave que se deben recordar en el acoplamiento es que la banda de valencia y la banda de conducción del semiconductor de acoplamiento no deben encontrarse entre la banda de valencia y la banda de conducción del semiconductor que se va a acoplar [32, 33].

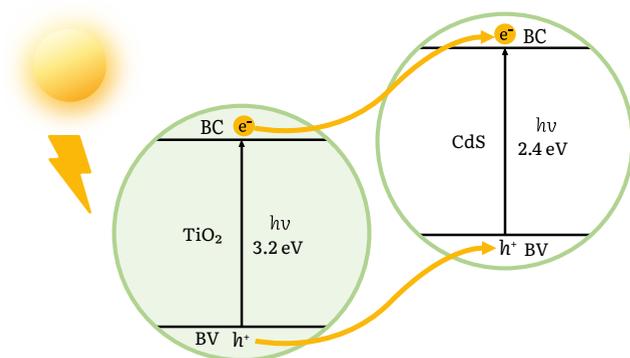


Figura 2.6
Nivel de energía de TiO_2 acoplado con CdS .

Fuente: elaboración propia basada en la referencia [11].

En la Tabla 2.2, se observa un resumen sobre las modificaciones de fotocatalizadores, los materiales, su aplicación en la degradación de un

contaminante objetivo, su eficiencia en el porcentaje de degradación y la activación.

Tabla 2.2 Ejemplo de modificaciones de fotocatalizadores y aplicaciones en el tratamiento de agua.

Modificación	Materiales	Contaminante	Degradación (% de remoción)	Fuente de activación	Referencia
Dopaje	Fe-CeO ₂	Rojo Congo	96 % en 3 h	Luz visible	[34]
	B-ZnO	Cianuro	89 % en 2 h	Luz solar	[35]
Dopaje metálico	Au NP/Bi ₂ S ₃	Rodamina	95 % en 1.5 h	Luz solar	[36]
	Agatom/MnO ₂	E. Coli	100 % en 17 min 99.5 % en 1 h	Luz solar	[37]
	Ag/g-C ₃ N ₄	Sulfametaxazol		Luz visible	[38]
Acoplamiento	TiO ₂ /CdS	Clorhidrato de tetraciclina en aguas residuales	99 % en 20 min	Luz visible	[39]
	TiO ₂ /WO ₃ /CQDs	Cefalexina	92.4 % en 4 h	Luz UV	[40]

Dentro de estas modificaciones, la morfología también juega un papel importante en la mejora de la selectividad deseada de un fotocatalizador para H₂O y CO₂; este ha sido el enfoque de estudio de la fotocatalisis en los últimos años, pues la superficie del catalizador es el lugar donde se lleva a cabo la fotocatalisis; por eso, es el elemento clave de este proceso. De esta manera, se logra mejorar la actividad catalítica, mediante diversas formas o morfologías que un fotocatalizador puede obtener, por ejemplo, nanohojas, nanorods y octaedros, utilizando el método apropiado de síntesis de catalizadores en fase líquida.

Diferentes investigadores han explorado los efectos de las morfologías variables de un fotocatalizador en la eliminación de contaminantes en aguas; por ejemplo, Bhatt y colaboradores investigaron el efecto de la morfología de las nanopartículas (nanocubos, nanorods, nanoesferas)

en la eliminación de colorantes, y el resultado del estudio reveló que la eliminación de contaminantes y la selectividad de CO_2 seguían el orden de nanocubos > nanorods > nanoesferas. De hecho, se demostró que el cambio de morfología altera la eficacia de enlace del catalizador con el reactivo y los productos intermedios. Además, los defectos superficiales de los catalizadores, como las vacantes de oxígeno en cationes y aniones, pueden alterar la eficiencia de unión de un fotocatalizador para conseguir una transferencia de energía y una capacidad de captación de luz óptima [41].

2.4 Aplicaciones de la fotocatalisis en el tratamiento de agua

Como se mencionó anteriormente, el TiO_2 ha sido el fotocatalizador más estudiado en la fotocatalisis aplicada al tratamiento de agua, debido a su bajo costo y su capacidad de producir radicales hidroxilos. Sin embargo, a través de diversos estudios se ha podido observar que no es tan eficiente en el tema de la absorción solar, ya que se modifica mediante diversas técnicas como el dopaje con metales y no metales para mejorar la capacidad de absorción de luz desde la UV a la visible. Al mismo tiempo, la última tendencia dentro de este tratamiento ha sido el estudio de otros materiales fotocatalíticos como Ag_3PO_4 , CeO_2 , Bi_2O_3 , SrTiO_3 , Fe_2O_3 , BiVO_4 , SnO_2 , WO_3 y $\text{g-C}_3\text{N}_4$. En este sentido, expondremos diversas aplicaciones de la fotocatalisis en el tratamiento de agua, mediante aplicaciones a nivel laboratorio y también aplicaciones de aguas reales [41].

El rendimiento en la degradación de contaminantes de un fotocatalizador se evalúa por la brecha de banda de energía, la tasa de recombinación de carga y el potencial de oxidación-reducción. De esta manera, un fotocatalizador prometedor debería tener un potencial de absorción de luz visible, una tasa de transferencia de carga rápida, una alta estabilidad mecánica y térmica, no ser tóxico, una brecha de banda energética más corta (>3) y ser de bajo costo. Uno de los requerimientos para escalar la fotocatalisis hacia aplicaciones reales es lograr la reutilización del fotocatalizador. Los experimentos

de reciclado para la eliminación de contaminantes emergentes proporcionan información sobre la estabilidad y reutilización de un fotocatalizador para aplicaciones de tratamiento de aguas y aguas residuales [42].

Varias publicaciones han destacado el uso del TiO_2 en la eliminación de contaminantes en sistemas de aguas residuales y han demostrado las ventajas que tiene utilizar este catalizador inmovilizado contra suspensión, pues al inmovilizarlo se evita el postratamiento para su eliminación del agua tratada. Un estudio realizado por Miranda-García y colaboradores, en el que inmovilizaron TiO_2 en un soporte de vidrio de borosilicato para la eliminación de quince contaminantes emergentes seleccionados en aguas residuales municipales reales y simuladas mediante irradiación solar, demostró la degradación del 85 % de los compuestos en 120 min de tiempo de iluminación y la capacidad del fotocatalizador para reutilizarse, incluso, después de cinco procesos en el sistema de agua simulado [43]. Por otra parte, el TiO_2 también ha sido inmovilizado mediante soportes poliméricos para posteriormente aplicarlo en la eliminación de parabenos del agua, por medio de oxidación fotocatalítica solar. Se prepararon membranas polidimetilsiloxano (PDMS) y se modificaron con TiO_2 . La eliminación de parabenos, a través de membranas de PDMS modificadas con TiO_2 bajo energía solar, se logró mediante la producción de radicales hidroxilo, seguida de la oxidación de contaminantes orgánicos con el 30 % de eliminación de parabenos en 1 h de reacción, demostrando que el PDMS es un material interesante para soportar TiO_2 en tratamientos fotocatalíticos de aguas residuales y superando el inconveniente asociado al uso de catalizadores en polvo, lo que lo convierte en un tratamiento viable para su aplicación [44].

Por otra parte, el TiO_2 ha sido estudiado también en agua real, Cabañas y colaboradores [13] realizaron el tratamiento de muestras tomadas de 5 diferentes pozos someros, localizados en la comisaría de Candel, Yucatán. Las muestras fueron sometidas a tratamiento mediante fotocatalisis con TiO_2 , usando radiación solar y fotólisis, donde se demostró que la fotocatalisis (TiO_2 + luz) permitió eliminar

un porcentaje mayor de coliformes que la fotólisis (luz) en las aguas de pozo, debido a que la adición de TiO_2 al agua aceleró la acción bactericida de la radiación solar, alcanzando un porcentaje de remoción de coliformes de 53.7 % con una concentración de 1 mg/ml de TiO_2 y un tiempo de reacción de 60 min.

Se han propuesto instalaciones móviles basadas en la fotocatalisis, utilizando TiO_2 como fotocatalizador; por ejemplo, la propuesta de Fenoll y colaboradores (Figura 2.7), quienes estudiaron el tratamiento de aguas agro-residuales obtenidas de diferentes granjas mediante fotocatalisis heterogénea (TiO_2 en $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$) y luz solar; las aguas contenían cuatro insecticidas neonicotinoides (tiametoxam, imidacloprid, acetamiprid y tiacloprid). El sistema consiste en un fotorreactor con cuatro tubos de borosilicato montados sobre reflectores curvos de aluminio pulido que van de este a oeste, donde el agua fluye entre los tubos conectados en serie para llegar al depósito de reserva (180 L) para volver a los tubos en forma de recirculación; en el sistema se adiciona $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ y TiO_2 al tanque de reacción. Este sistema cuenta con una membrana Poliacrilonitrilo (PAN) para recuperar el TiO_2 tras los tratamientos. Los porcentajes restantes de los insecticidas se mantuvieron en el rango 0-47 % para tiametoxam, 0.1-33 % para imidacloprid, 2-66 % para acetamiprid y 0.02-60 % para tiacloprid de la masa inicial total, demostrando que el sistema del reactor fotoquímico propuesto era una instalación innovadora y energéticamente eficiente que podría ser ubicada en las granjas [45].

Dentro de las aplicaciones de la fotocatalisis en el tratamiento de agua, el dopaje de los fotocatalizadores es una de las tendencias que se han seguido para mejorar su rendimiento. Un ejemplo es el estudio que se realizó para comparar el rendimiento del fotocatalizador ZnO contra el mismo fotocatalizador dopado con nanopartículas de boro en la eliminación de cianuro. Se observó que al utilizar el fotocatalizador dopado se alcanzaba el 89 % de degradación de cianuro en 2 h bajo luz visible contra un 75 % del fotocatalizador sin dopar [35]. También se ha estudiado la síntesis verde de fotocatalizadores como ZnO, que convierten esta tecnología en un tratamiento completamente

amigable con el ambiente; un estudio a destacar en esta vertiente fue el realizado por El Golli y colaboradores, quienes propusieron la síntesis de nanorods de ZnO, por medio de extracto de bulbo de ajo (*Allium Sativum*), y los compararon con los obtenidos mediante síntesis química. El rendimiento de estos fotocatalizadores fue estudiado por fotocatálisis solar para la degradación del colorante azul de metileno; las degradaciones que se obtuvieron con el fotocatalizador sintetizado, a través de un método verde, fueron de un 69 % en 120 min, comparadas con los beneficios no solo ambientales, sino también económicos que se obtuvieron por medio de la evaluación económica de los costos, donde se demostró que la síntesis verde también es rentable, reduciendo el costo asociado a los fotocatalizadores en un 35 %, el cual se reduce aún más al ser un tratamiento que utiliza radiación solar, en comparación con un sistema convencional de irradiación UV [46].

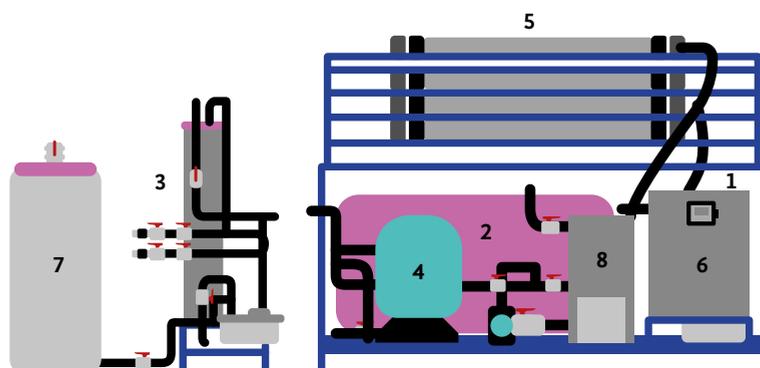


Figura 2.7

Esquema de la planta de tratamiento. 1. Tanques de reacción; 2. Tanques de almacenamiento de agua; 3. Membrana de ultrafiltración; 4. Filtro de arena; 5. Módulo fotorreactor con cuatro tubos de borosilicato; 6. Tanque de almacenamiento de agua filtrante; 7. Unidad de control; 8. Refrigerador.

Fuente: elaboración propia.

El acoplamiento entre fotocatalizadores puede resultar exitoso dentro del tratamiento de agua residual, mediante un efecto sinérgico como el caso de acoplar IO-TiO₂-CdS para la degradación del clorhidrato de tetraciclina, donde la estructura macroporosa tridimensional ordenada (3DOM) de IO-TiO₂ mejoró el aprovechamiento de la luz, a través del efecto de fotones lentos. La adición de CdS mejoró la

eficiencia de degradación de la tetraciclina ampliando el rango del espectro de absorción, optimizando la separación del portador de carga en el catalizador y alcanzando en las mejores condiciones más del 99 % de degradación del clorhidrato de tetraciclina en 20 min bajo irradiación de luz visible [39].

No solo se han buscado alternativas como el dopaje, inmovilización o acoplamiento entre catalizadores para mejorar la eficiencia de la fotocatalisis, sino también se han acoplado a otros tratamientos (sonólisis) para aumentar los rendimientos en la degradación de contaminantes en aguas residuales (colorantes); por ejemplo, la degradación de naranja de metilo se llevó a cabo mediante un tratamiento sonofotocatalítico simulando radiación solar, donde se sintetizaron fotocatalizadores $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ con diversas cantidades de ftalocianina de cobre como agente fotosensibilizador. Este estudio consistió en la comparación del tratamiento sonofotocatalítico con la fotocatalisis y la sonólisis, por separado. Los resultados mostraron que el rendimiento de la descomposición seguía el siguiente orden: sonofotocatalisis (30 W de potencia ultrasónica) > fotocatalisis > sonólisis. Por su parte, también se evaluó la reutilización del fotocatalizador, la cual demostró una excelente estabilidad en seis ciclos consecutivos, con un desvanecimiento insignificante (5 %) del rendimiento sonofotocatalítico. Las pruebas de barrido indicaron que el radical $\cdot\text{OH}$ no era la especie reactiva dominante y que la sonicación a través de aspectos físicos y la producción de otros radicales influían en la reacción fotocatalítica [47].

Referencias

- [1] Y. Zhang, Y.G. Zhao, F. Maqbool, Y. Hu, "Removal of antibiotics pollutants in wastewater by UV-based advanced oxidation processes: Influence of water matrix components, processes optimization and application: A review", *Journal of Water Process Engineering*, vol. 45, 2022. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102496>

- [2] S.G. Michael, I. Michael-Kordatou, S. Nahim-Granados, M.I. Polo-López, J. Rocha, A.B. Martínez-Piernas, P. Fernández-Ibáñez, A. Agüera, C.M. Manaia, D. Fatta-Kassinos, “Investigating the impact of UV-C/H₂O₂ and sunlight/H₂O₂ on the removal of antibiotics, antibiotic resistance determinants and toxicity present in urban wastewater”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 388, 2020. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124383>
- [3] G. Dong, B. Chen, B. Liu, Y. Cao, B. de Jourdan, S.R. Stoyanov, J. Ling, X. Ye, K. Lee, B. Zhang, “Comparison of O₃, UV/O₃, and UV/O₃/PS processes for marine oily wastewater treatment: Degradation performance, toxicity evaluation, and flocs analysis”, *Water Research*, vol. 226, 2022. Available: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119234>
- [4] J. Deng, G. Wu, S. Yuan, X. Zhan, W. Wang, Z.H. Hu, “Ciprofloxacin degradation in UV/chlorine advanced oxidation process: Influencing factors, mechanisms and degradation pathways”, *Journal of Photochemistry and Photobiology A Chemistry*, vol. 371, pp. 151–158, 2019. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2018.10.043>
- [5] M. Pirsaeheb, H. Hossaini, H. Janjani, “Reclamation of hospital secondary treatment effluent by sulfate radicals based–advanced oxidation processes (SR-AOPs) for removal of antibiotics”, *Microchemical Journal*, vol. 153, 2020. Available: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104430>
- [6] N.P. Xekoukoulotakis, C. Drosou, C. Brebou, E. Chatzisyneon, E. Hapeshi, D. Fatta-Kassinos, D. Mantzavinos, “Kinetics of UV-A/TiO₂ photocatalytic degradation and mineralization of the antibiotic sulfamethoxazole in aqueous matrices”, *Catalysis Today*, vol. 161, pp. 163–168, 2011. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2010.09.027>
- [7] A. Pattnaik, J.N. Sahu, A.K. Poonia, P. Ghosh, “Current perspective of nano-engineered metaloxide based photocatalysts in advanced oxidation processes for degradation of organic pollutants in wastewater”, *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 190, pp. 667–686, 2023. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.01.014>

- [8] M. Aliste, I. Garrido, P. Flores, P. Hellín, N. Vela, S. Navarro, J. Fenoll, “Reclamation of agro-wastewater polluted with thirteen pesticides by solar photocatalysis to reuse in irrigation of greenhouse lettuce grown”, *Journal of Environmental Management*, vol. 266, 2020. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110565>
- [9] M. Bermejo-Fernández, P. Rodríguez-Monteverde-Cantarell, “Fotocatálisis y su capacidad descontaminante. Aplicación en Gran Vía”, [Trabajo de Fin de Grado, ETS Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid], 2018.
- [10] L.C. Casanova, “Síntesis y caracterización de fotocatalizadores nanoestructurados TiO₂ y TiO₂-C para su aplicación en la oxidación de COVs”, [Tesis de doctorado, Universidad de Alicante] 2018. Disponible en: <https://rua.ua.es/dspace/handle/10045/74470>
- [11] V. Prashanth, P. Jayasree, P. Rajput, N. Remya, “Solar photocatalysis and its application for emerging contaminant removal from wastewater”, In: *Advanced Oxidation Processes for Effluent Treatment Plants*: Elsevier, M.P. Shah ed., 2021, pp. 69-85. Available: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821011-6.00004-9>
- [12] D. Prato Garcia, R. Vásquez Medranob, M. Vedrenne, “Tratamiento de contaminantes mediante procesos fotocatalíticos en fase heterogénea: aspectos técnicos, económicos y ambientales”, en: *Procesos de Oxidación Avanzada en el tratamiento de agua*, C.E. Barrera-Díaz, M. Rodríguez-Peña eds., Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, 2020, pp. 77-96.
- [13] D.D. Cabañas Vargas, V. Mota Poot, E.J. Ruiz Espinoza, “Luz solar y TiO₂ para eliminar patógenos contenidos en agua de pozo : comportamiento de la fotocatalisis”, *Ingeniería*, vol. 23, 2019.
- [14] J. Schneider, M. Matsuoka, M. Takeuchi, J. Zhang, Y. Horiuchi, M. Anpo, D.W. Bahnemann, “Understanding TiO₂ Photocatalysis: Mechanisms and Materials”, *Chemical Reviews*, 114, pp. 9919-9986, 2014. Available: <https://doi.org/10.1021/cr5001892>
- [15] G. Lapenta, “Space weather: Variability in the Sun-Earth connection”, in: *The Dynamical Ionosphere*, M. Materassi, B.

- Forte, A.J. Coster, S. Skone eds., 2020. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814782-5.00008-X>
- [16] W. Jo, R.J. Tayade, “New Generation Energy-Efficient Light Source for Photocatalysis: LEDs for Environmental Applications”, *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 53, 2014.
- [17] D. Sanz Carrillo, Desarrollo de fotocatalizadores activos bajo luz visible para la degradación de COVs, Universidad de Zaragoza, 2019. Recuperado de: <https://zagan.unizar.es/record/87523/files/TESIS-2020-035.pdf>
- [18] B.M. Namooos, A.R. Mohamed, K.A. Ali, “Methods and strategies for producing porous photocatalysts: Review”, *Journal of Solid State Chemistry*, vol. 320, 2023. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2023.123834>
- [19] D.A. Solís-Casados, L. Escobar-Alarcón, F. González Zavala, “Fotocatálisis Vis”, en: *Procesos de Oxidación Avanzada en el tratamiento de agua*, C.E. Barrera-Díaz, M. Rodríguez-Peña eds., Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, 2020, pp. 117–131.
- [20] J. Hong, K.H. Cho, V. Presser, X. Su, “Recent advances in wastewater treatment using semiconductor photocatalysts”, *Current Opinion in Green Sustainable Chemistry*, vol. 36, 2022. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100644>
- [21] Y. Li, H. Jiang, X. Wang, X. Hong, B. Liang, “Recent advances in bismuth oxyhalide photocatalysts for degradation of organic pollutants in wastewater”, *RSC Advances*, 11, 26855–26875, 2021. Available: <https://doi.org/10.1039/d1ra05796k>
- [22] A. Mendoza, L. Hurtado, R. Natividad-Rangel, “Capítulo 6. Fotocatálisis heterogénea UV”, en: *Procesos de Oxidación Avanzada en el tratamiento de agua*, C.E. Barrera-Díaz, M. Rodríguez-Peña eds., Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, 2020, pp. 29–41. Available: <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/109361>
- [23] A. Ahmadi, T. Wu, “Inactivation of *E. coli* using a novel TiO₂nanotube electrode”, *Environmental Science: Water Research & Technology*, 3, 534–545, 2017. Available: <https://doi.org/10.1039/c6ew00319b>

- [24] Y. Xin, M. Gao, Y. Wang, D. Ma, “Photoelectrocatalytic degradation of 4-nonylphenol in water with WO₃/TiO₂ nanotube array photoelectrodes”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 242, pp. 162–169, 2014. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.12.068>
- [25] A. Mukherjee, S. Das, Y.H. Ahn, “Synergistic effect of sonophotocatalysis with blue LED and natural photosensitizer terpinolene for rapid disinfection of multi-drug resistant coliform bacteria in wastewater”, *Journal of Water Process Engineering*, vol. 49, 2022. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103186>
- [26] M.R. Sohrabi, M. Ghavami, “Photocatalytic degradation of Direct Red 23 dye using UV/TiO₂: Effect of operational parameters”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 153, pp. 1235–1239, 2008. Available: <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2007.09.114>
- [27] H. Huang, J. Zhang, L. Jiang, Z. Zang, “Preparation of cubic Cu₂O nanoparticles wrapped by reduced graphene oxide for the efficient removal of rhodamine B”, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 718, pp. 112–115, 2017. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.05.132>
- [28] M.J. Martín de Vidales, M.P. Castro, C. Sáez, P. Cañizares, M.A. Rodrigo, “Radiation-assisted electrochemical processes in semi-pilot scale for the removal of clopyralid from soil washing wastes”, *Separation and Purification Technology*, vol. 208, pp. 100–109, 2019. Available: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.04.074>
- [29] K. Wetchakun, N. Wetchakun, S. Sakulsersuk, “An overview of solar/visible light-driven heterogeneous photocatalysis for water purification: TiO₂- and ZnO-based photocatalysts used in suspension photoreactors”, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 71, pp. 19–49, 2019. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.11.025>
- [30] T.D. Pham, B.K. Lee, “Selective removal of polar VOCs by novel photocatalytic activity of metals co-doped TiO₂/PU under visible light”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 307, pp. 63–73, 2017. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.08.068>

- [31] F. Dong, H. Wang, Z. Wu, J. Qiu, “Marked enhancement of photocatalytic activity and photochemical stability of N-doped TiO₂ nanocrystals by Fe³⁺/Fe²⁺ surface modification”, *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 343, pp. 200–208, 2010. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.11.012>
- [32] T.B. Nguyen, C.P. Huang, R. Doong, “Photocatalytic degradation of bisphenol A over a ZnFe₂O₄/TiO₂ nanocomposite under visible light”, *Science of the Total Environment*, vol. 646, pp. 745–756, 2019. Available: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.352>
- [33] Z. Liu, P. Fang, S. Wang, Y. Gao, F. Chen, F. Zheng, Y. Liu, Y. Dai, “Photocatalytic degradation of gaseous benzene with CdS-sensitized TiO₂ film coated on fiberglass cloth”, *Journal of Molecular Catalysis A Chemical*, vol. 363–364, pp. 159–165, 2012. Available: <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2012.06.004>
- [34] W.A. Aboutaleb, R.A. El-Salamony, “Effect of Fe₂O₃-CeO₂ nanocomposite synthesis method on the Congo red dye photodegradation under visible light irradiation”, *Materials Chemistry and Physics*, vol. 236, 2019. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.121724>
- [35] R.E. Núñez-Salas, A. Hernández-Ramírez, L. Hinojosa-Reyes, J.L. Guzmán-Mar, M. Villanueva-Rodríguez, M. de L. Maya-Treviño, “Cyanide degradation in aqueous solution by heterogeneous photocatalysis using boron-doped zinc oxide”, *Catalysis Today*, vol. 328, pp. 202–209, 2019. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.11.061>
- [36] N. Nwaji, E.M. Akinoglu, M. Giersig, “Gold nanoparticle-decorated bi₂S₃ nanorods and nanoflowers for photocatalytic wastewater treatment”, *Catalysts*, vol. 11, pp. 1–12, 2021. Available: <https://doi.org/10.3390/catal11030355>
- [37] D. Xia, H. Liu, B. Xu, Y. Wang, Y. Liao, Y. Huang, L. Ye, C. He, P.K. Wong, R. Qiu, “Single Ag atom engineered 3D-MnO₂ porous hollow microspheres for rapid photothermocatalytic inactivation of E. coli under solar light”, *Applied Catalysis B Environmental*, vol. 245, pp. 177–189, 2019. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.12.056>

- [38] Y. Song, J. Qi, J. Tian, S. Gao, F. Cui, “Construction of Ag/g-C₃N₄ photocatalysts with visible-light photocatalytic activity for sulfamethoxazole degradation”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 341, pp. 547–555, 2018. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.02.063>
- [39] C. Lv, X. Lan, L. Wang, X. Dai, M. Zhang, J. Cui, S. Yuan, S. Wang, J. Shi, “Rapidly and highly efficient degradation of tetracycline hydrochloride in wastewater by 3D IO-TiO₂-CdS nanocomposite under visible light”, *Environmental Technology (United Kingdom)*, vol. 42, pp. 377–387, 2021. Available: <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1629183>
- [40] X. Sun, W. He, T. Yang, H. Ji, W. Liu, J. Lei, Y. Liu, Z. Cai, “Ternary TiO₂/WO₃/CQDs nanocomposites for enhanced photocatalytic mineralization of aqueous cephalexin: Degradation mechanism and toxicity evaluation”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 412, 2021. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128679>
- [41] S. Ahmed, F.S.A. Khan, N.M. Mubarak, M. Khalid, Y.H. Tan, S.A. Mazari, R.R. Karri, E.C. Abdullah, “Emerging pollutants and their removal using visible-light responsive photocatalysis – A comprehensive review”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, 2021. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106643>
- [42] R. Fagan, D.E. McCormack, D.D. Dionysiou, S.C. Pillai, “A review of solar and visible light active TiO₂ photocatalysis for treating bacteria, cyanotoxins and contaminants of emerging concern”, *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 42, pp. 2–14, 2016. Available: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.07.052>
- [43] N. Miranda-García, S. Suárez, B. Sánchez, J.M. Coronado, S. Malato, M.I. Maldonado, “Photocatalytic degradation of emerging contaminants in municipal wastewater treatment plant effluents using immobilized TiO₂ in a solar pilot plant”, *Applied Catalysis B Environmental*, vol. 103, pp. 294–301, 2011. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.01.030>
- [44] R.C. Martins, Â. Sacras, S. Jovanovic, P. Alves, P. Ferreira, J. Gomes, “Solar energy for liquid wastewater treatment with

- novel TiO₂ supported catalysts”, *Energy Reports*, vol. 8, pp. 489–494, 2022. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.196>
- [45] J. Fenoll, I. Garrido, P. Flores, P. Hellín, N. Vela, G. Navarro, J. García-García, S. Navarro, “Implementation of a new modular facility to detoxify agro-wastewater polluted with neonicotinoid insecticides in farms by solar photocatalysis”, *Energy*, vol. 175, pp. 722–729, 2019. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.118>
- [46] A. El Golli, M. Fendrich, N. Bazzanella, C. Dridi, A. Miotello, M. Orlandi, “Wastewater remediation with ZnO photocatalysts: Green synthesis and solar concentration as an economically and environmentally viable route to application”, *Journal of Environmental Management*, vol. 286, 2021. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112226>
- [47] H.K. Hakki, S. Allahyari, “Sonophotocatalytic treatment of wastewater using simulated solar light-driven Bi₂O₃-ZnO nanophotocatalyst sensitized with copper phthalocyanine”, *Materials Chemistry and Physics*, vol. 288, 2022. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126355>

Capítulo 3

DESTILACIÓN SOLAR

El agua potable es una necesidad primaria y esencial para el ser humano. Actualmente, en diversas comunidades existen muchos problemas de salud pública que se deben a la falta de disponibilidad de agua potable, misma que se ha visto limitada en los últimos años, debido a la contaminación de los recursos hídricos, a factores como el crecimiento de la población, a la industrialización y al uso desmedido de fármacos y pesticidas. Además, en las últimas décadas, como consecuencia del cambio climático, se ha presentado la disminución de precipitaciones a lo largo del mundo. Por esta razón, es necesario desarrollar diversas tecnologías que permitan la recuperación de agua potable a partir de agua residual, agua contaminada o fuentes de agua no dulce. Esto plantea un reto enorme, ya que la eficiencia y el costo deben justificar las inversiones que se requieren para lograr dicho propósito.

La desalinización del agua, por medio del tratamiento de aguas residuales se ha estudiado mediante diversas tecnologías a lo largo del tiempo por su eficiencia, costo y fácil operación a nivel industrial [1, 2]. La destilación solar es una de las principales técnicas; ha sido estudiada desde hace muchos años, pero en los últimos tiempos ha tomado fuerza [3]. Esto se debe a la gran crisis energética a nivel mundial, basada en la sobreexplotación y dependencia de las fuentes de energía convencionales y no renovables. Por ello, la energía solar ha sido un foco de atención para muchos países, como se ha mencionado en los capítulos anteriores. De esta manera, la destilación solar se puede considerar como una de las mejores soluciones, donde su principal ventaja es utilizar la energía solar, la cual está disponible en todo el mundo, volviéndose una tecnología prometedora y que puede ser competitiva económicamente, comparada con otros métodos disponibles [4].

La desalinización que emplea destilación solar es una solución rentable para obtener agua dulce de agua salada o de fuentes de agua salobre. El principio aplicado en esta tecnología es básicamente similar al ciclo hidrológico de producción de lluvia, a través del cual se adquiere agua dulce por cambio de fase, debido a la inclusión de energía calorífica a la solución de agua salina. El agua salina cambia de fase a vapor de agua, gracias a la aplicación de calor procedente de la radiación solar y, a continuación, se vuelve a condensar para convertirse en agua dulce [5]. La destilación solar se considera una de las tecnologías de desalinización más prácticas y económicas para obtener agua potable; sin embargo, también se han estudiado otras aplicaciones novedosas como la extracción de sal, descarga cero de aguas residuales y la generación de electricidad [6].

La Figura 3.1 muestra un diagrama termodinámico de la energía necesaria para pasar de agua en estado sólido (hielo) a vapor de agua. Dependiendo de la temperatura inicial, es necesario aplicar y añadir energía para lograr el cambio de fase. “Los largos tramos de temperaturas constantes en 0 °C y 100 °C reflejan las grandes cantidades de calor necesarias para provocar el derretimiento y la vaporización, respectivamente” [7].

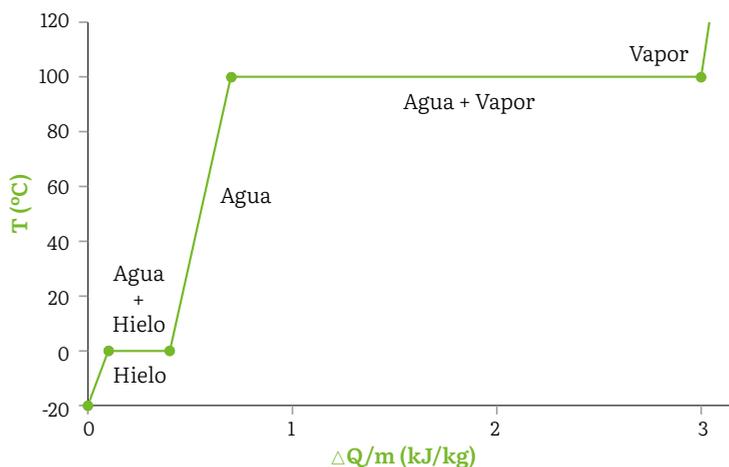


Figura 3.1
Temperatura versus calor [7].

La energía implicada en un cambio de fase depende del número de enlaces o pares de fuerzas y de su resistencia. El número de enlaces es proporcional al de moléculas y, por tanto, a la masa de la muestra. Se conoce como calor de fusión a la energía por unidad de masa necesaria para que una sustancia pase de la fase sólida a la líquida, o que se libera cuando la sustancia pasa de líquida a sólida. La energía por unidad de masa necesaria para que una sustancia pase de la fase líquida a la fase de vapor se conoce como calor de vaporización. La resistencia de las fuerzas depende del tipo de moléculas. El calor Q absorbido o liberado en un cambio de fase en una muestra de masa m viene dado por

$$Q = mL_f \text{ (derretimiento/ congelación)} \quad [3.1]$$

$$Q = mL_v \text{ (vaporización/condensación)} \quad [3.2]$$

donde el calor de fusión latente L_f y el calor de vaporización latente L_v son constantes fundamentales que se determinan experimentalmente (los calores latentes también se denominan coeficientes de calor latente y calores de transformación). Estas constantes son “latentes”, u ocultas, porque en los cambios de fase, la energía entra o sale de un sistema sin provocar un cambio de temperatura en este, por lo que, en efecto, la energía está oculta [7].

El principio de la destilación solar es el aumento en la temperatura del agua en estado líquido para que se pueda llevar a cabo el cambio de fase en vapor de agua. Como esta temperatura es específica para cada sustancia, la destilación permite una obtención de agua de muy alta calidad, la cual queda libre de contaminantes, sustancias químicas o minerales. Posteriormente, se requiere que el vapor de agua entre en contacto con una superficie fría o con la temperatura más baja para que se lleve a cabo la condensación y obtener agua en estado líquido.

Una unidad de destilación solar (UDS) es un sistema que destila agua contaminada utilizando la energía de irradiación solar obtenida del Sol. El proceso de destilación en los alambiques solares sigue la misma metodología que el ciclo natural o ciclo abierto de la naturaleza que

provoca la lluvia, es decir, la absorción del calor solar, la evaporación y la condensación, pero en una cámara confinada de ciclo cerrado [8, 9], resultando ser mucho más eficaz, ya que el control de todo el sistema puede variar según la situación o necesidad de tiempo y demanda, a través de la variación en ciertos parámetros como el caudal y el ángulo de inclinación, entre otros [10].

Los objetivos que se deben seguir para cumplir con un diseño eficiente de un destilador solar pueden dividirse, conforme a la Figura 3.2 [11]:

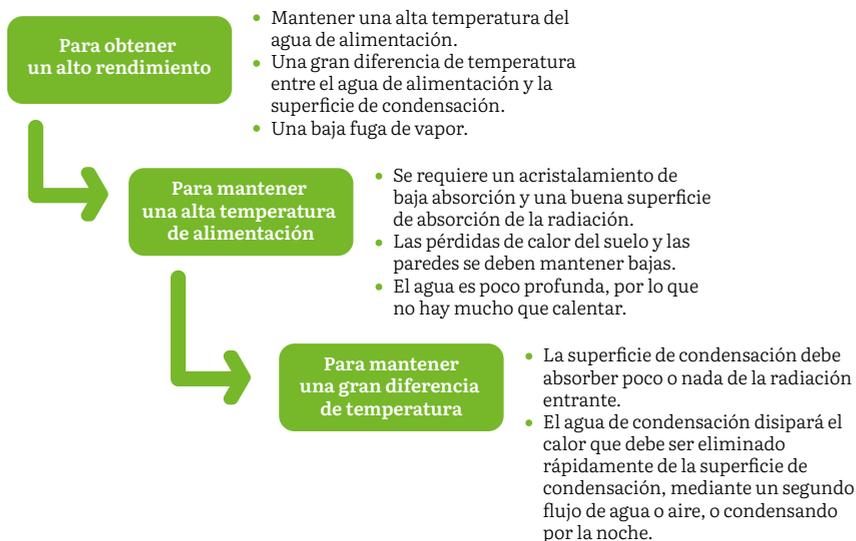


Figura 3.2
Guía para un diseño eficiente de un destilador solar [11].

En general, los destiladores solares se dividen en dos categorías: pasivos y activos. En los sistemas de destilación solar pasivos, la energía solar irradiada es la única fuente para calentar el agua que se encuentra en el depósito y no hay otros elementos que consuman o produzcan energía. Por otro lado, en el sistema de destilación activa, se suministra calor adicional a través de varios arreglos, modificaciones o diseños sofisticados, con la finalidad de incrementar el rendimiento. En este caso, hay posibilidad de que elementos adicionales puedan

consumir o producir energía eléctrica útil para el sistema o algún otro propósito [12].

3.1 Destilador solar pasivo

La Figura 3.3 muestra el esquema básico de un destilador solar pasivo. La configuración esencial del destilador consiste en un recipiente hermético que puede ser de hormigón, cemento o chapa de hierro galvanizado, en el cual se deposita agua contaminada o salina y se recomienda que en el interior tenga un color negro para lograr una máxima absorción de la radiación solar. En la parte superior del recipiente se debe colocar una cubierta inclinada hecha de un material transparente como vidrio o plástico y es muy recomendable que esté perfectamente aislado y sellado para evitar pérdidas de calor.

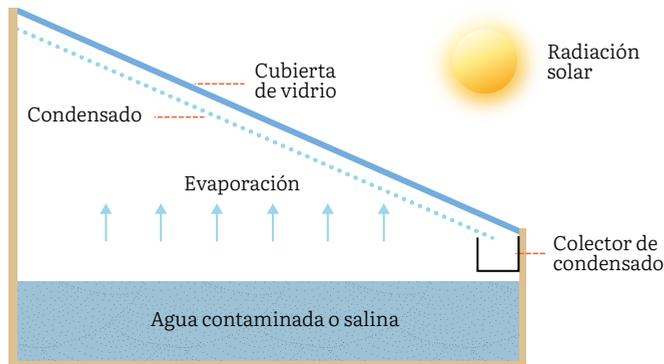


Figura 3.3
Unidad básica de destilación solar.
Fuente: elaboración propia.

El destilador debe siempre estar orientado al Sol para que se maximice la radiación solar. Los rayos solares atraviesan la cubierta y se dirigen a calentar el agua que se encuentra en el depósito, entonces el calor se absorbe y empieza a incrementar la temperatura del agua, lo que provoca su evaporación. El vapor de agua asciende hasta la cubierta y se recoge en la cámara de recolección para su uso posterior [13].

Durante el proceso de destilación pasiva, todas las impurezas, contaminantes o la sal presente en el agua se puede acumular en el recipiente de depósito; estos residuos se eliminan durante el proceso de mantenimiento o se limpian mediante una operación de drenaje. De esta manera, el destilador solar pasivo obtiene agua purificada de distintos tipos de agua residual o contaminada y separa efectivamente sales, minerales, bacterias, y metales pesados [8, 14].

Un aspecto muy relevante es la eficiencia que se puede obtener al emplear un destilador solar; en este sentido, las eficiencias típicas de recuperación de agua pueden ser del 25 %. Sin embargo, se han reportado eficiencias de destiladores solares bien construidos y mantenidos de aproximadamente el 50 %, lo que hace muy prometedora esta tecnología [15].

Un destilador solar pasivo, por lo general, tiene un diseño sencillo; pueden fabricarse fácilmente con material accesible y requiere poco mantenimiento. En la Tabla 3.1 se resumen las ventajas y desventajas de estos equipos solares.

Tabla 3.1 Ventajas y desventajas de los destiladores solares pasivos.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • No requiere el uso de energía proveniente de combustibles fósiles, pues utiliza la energía solar. • No requiere electricidad adicional al no tener partes móviles. • Amigable con el ambiente. • Se puede generar agua destilada en casa con una pequeña inversión para fines domésticos y comerciales. • Costo de mantenimiento bajo. 	<ul style="list-style-type: none"> • La eficiencia del proceso se afecta durante el invierno. • Inclinación forzosa hacia la orientación del sol. • El sistema requiere protección durante condiciones adversas como lluvia, viento fuerte, etc.

Fuente: elaboración propia.

Los destiladores solares pasivos pueden clasificarse en destiladores cuenca, mecha cóncava, combinación de invernadero, esférica, tubular. A continuación, se describen de manera breve:

3.1.1 Destilador solar de cuenca

Es, quizá, el modelo de destilador con estructura más sencilla (Figura 3.3). “Se trata de una caja cubierta por un cristal inclinado. La caja está dividida en dos compartimentos: uno con el fondo de color negro donde se coloca el agua a evaporar y que ocupa la mayor parte de la caja y el otro el receptáculo donde se recoge el agua destilada y que se encuentra en el lado de menor altura” [16]. El compartimento utilizado como depósito del agua salada o a destilar se recubre normalmente con óxidos como cobre, cromo y níquel para posteriormente, por un medio electrolítico y su posterior oxidación, dar un color negro y tener una mayor absorción de radiación solar [16].

3.1.2 Destilador de mecha cóncava

Este tipo de destilador utiliza una superficie de mecha cóncava para la evaporación en los cuatro lados y tiene forma de pirámide, donde se realizará la condensación (Figura 3.4). La forma cóncava de la superficie de la mecha aumenta el área de evaporación debido al efecto capilar. Kabeel y colaboradores estudiaron el rendimiento de un destilador de mecha cóncava y utilizaron una mecha de yute para aumentar la absorción de la radiación solar y la superficie de evaporación. De acuerdo con los resultados, se alcanzó una productividad media por día de 4,0 L/m² con una eficiencia del destilador solar de alrededor del 45 %; esta eficiencia es mayor en comparación con un diseño convencional de destiladores solares (destilador de cuenca) [17].

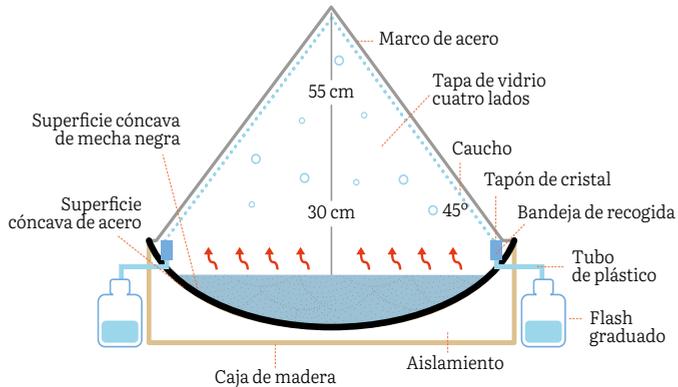


Figura 3.4
Ejemplo de un destilador solar de mecha cóncava.
Fuente: elaboración propia.

3.1.3 Destilador solar de invernadero

Es un modelo de destilador solar de gran tamaño (Figura 3.5), el cual se compone de estructuras de invernaderos (un “tejado” de material transparente de dos vertientes) que en su interior albergan un estanque de agua de poca profundidad y con el fondo de color negro. El agua evaporada se condensa en las paredes del invernadero y se desliza hacia los receptores situados en la base de las paredes [18].

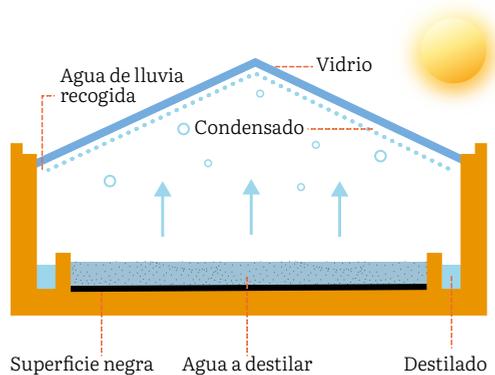


Figura 3.5
Ejemplo de un destilador solar de invernadero.
Fuente: elaboración propia.

3.1.4 Destilador solar esférico

Este destilador solar se caracteriza por su forma esférica de material transparente, así como por la introducción de un jalador que lame su cara interna y está accionado por un pequeño motor. El agua que se destilará se coloca en una bandeja con fondo de color oscuro, situada en la parte central de la esfera; el jalador permite arrastrar las gotas que se van condensando en el interior de la esfera provocando que se precipiten por gravedad a la parte baja donde se acumulan (Figura 3.6). La ventaja de tener una forma esférica es que mantiene una mayor inercia térmica, facilitando un mayor aprovechamiento del calor producido por la energía solar, al igual que se favorece la captación solar, pues se evitan sombras que se pueden provocar en destiladores solares convencionales. Como desventaja de este modelo, respecto a otros, es el suministro de energía para accionar el motor que ejecuta el movimiento del jalador [16]. Dhiman Naresh presentó un modelo matemático para predecir el rendimiento térmico de una destilación solar esférica. Los resultados muestran que el rendimiento de la destilación solar esférica es un 30 % superior al de la destilación solar convencional [19].

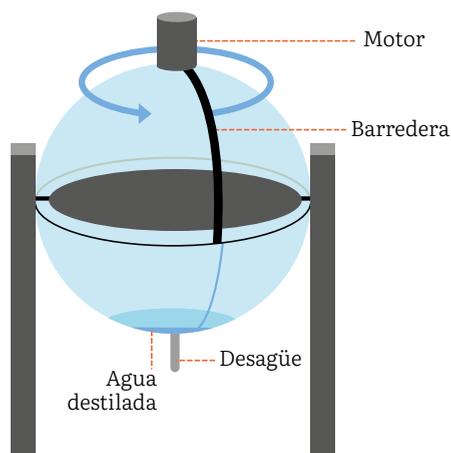


Figura 3.6
Diagrama de un destilador solar esférico [16].

3.1.5 Destilador solar tubular

El destilador solar tubular consta principalmente de un tubo cilíndrico transparente en el que se coloca el absorbedor rectangular. Este tipo de destilador utiliza el mismo principio que el destilador básico de destilación solar pasiva, pero difiere en la forma (cilíndrica). La intensidad solar se transmite a través de la cubierta tubular transparente, alcanzando el absorbedor y calentando el agua salina en el canal. La cubierta tubular y la cubeta absorben la pequeña cantidad restante de energía solar incidente. De este modo, el agua de la cubeta se evapora y el vapor de agua se transfiere a la superficie interior de la cubierta tubular formando una fina película hasta condensarse. Por efecto de la gravedad, el agua condensada desciende por la superficie interior de la cubierta tubular transparente y se almacena en el colector situado en la parte inferior de la cubeta (Figura 3.7) [20, 21].

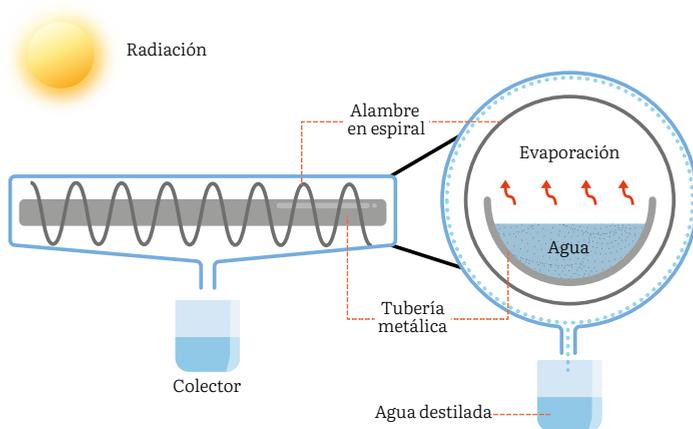


Figura 3.7
Destilador solar tubular.
Fuente: elaboración propia.

Se ha evaluado la eficiencia de este tipo de destilador solar, frente a otras configuraciones, por ejemplo, Nader y colaboradores [22] estudiaron el comportamiento de dos destiladores solares: uno triangular y otro tubular. En ambos se compararon las mismas

condiciones ambientales reales y los resultados mostraron que tanto la eficiencia como el rendimiento era superior en el destilador tubular alcanzando un 41 %, frente a un 35 % del destilador triangular; al igual que 1.6 l/m²día, frente al 1.336 l/m²día, respectivamente. Basándose en la producción de destilado, el rendimiento del destilador tubular es un 20 % superior al del triangular. Asimismo, los coeficientes de transferencia de calor del destilador tubular son superiores a los del triangular en un 4 % y un 7 %, respectivamente. Además, la generación de entropía del destilador tubular es inferior a la del triangular en un 17.4 %.

Una vez expuestos los diferentes tipos de destiladores pasivos y conociendo sus ventajas, es importante indicar que en algunas ocasiones pueden presentar un bajo rendimiento de obtención de agua purificada, ya que para su correcto desempeño se depende de la estación del año, la región y la intensidad de la radiación solar. Por ello, se busca mejorar su rendimiento mediante algunas modificaciones, aplicando las siguientes medidas:

1. Instalar aletas en el depósito para aumentar la transferencia de calor al agua.
2. Utilizar un depósito de forma escalonada para aumentar la tasa de evaporación.
3. Aplicar materiales de almacenamiento de calor en el depósito para aumentar los coeficientes de transferencia de calor.
4. Emplear un vidrio de cobertura de doble pendiente para aumentar la intensidad de la irradiación solar.
5. Usar varias etapas para reutilizar el calor latente del condensado [23].

3.2 Destilador solar activo

La destilación solar activa se puede clasificar principalmente en Destilación a alta temperatura, Suministro de agua precalentada,

Destilador solar multietapa de vacío, Destilador solar integrado con un condensador externo o interno y Destilador solar de burbujas de aire.

3.2.1 Destilación a alta temperatura

En estos sistemas la temperatura del agua del destilador convencional aumenta debido al suministro de energía térmica adicional, a través de colectores solares pasando de 20-50 °C a 70-80 °C. La ventaja de contar con una mayor temperatura es el aumento en el vapor de agua dentro de la cuenca. La formación de una mayor cantidad de vapor de agua conduce a la producción de agua potable a partir del alambique solar [24].

Un sistema de destilación solar activa a alta temperatura (Figura 3.8) tiene una fuente adicional de alimentación de energía térmica en el depósito al acoplarse paneles fotovoltaicos. La energía eléctrica generada es utilizada en el funcionamiento del sistema, lo que permite aumentar la tasa de evaporación y continuar la destilación incluso en ausencia de radiación solar [25-27].

El acoplamiento de paneles solares ha sido estudiado en diversos tipos de destiladores solares, con el fin de conocer su funcionamiento y ventajas, por ejemplo, se estudió experimentalmente la transferencia del calor interior de un destilador solar pasivo de pendiente simple, y un destilador tipo invernadero solar activo híbrido acoplado a una placa plana fotovoltaica (FV/T). Los experimentos se llevaron a cabo durante un año en las condiciones climáticas naturales de la India y demostraron un coeficiente medio de transferencia de calor convectivo para el destilador solar pasivo de pendiente simple de 3.6 w/m²k y del destilador tipo invernadero solar activo híbrido acoplado a una placa plana fotovoltaica de 18.3 w/m²k. Se obtuvo que el valor anual normal del coeficiente de transferencia de calor convectivo y evaporativo del destilador activo acoplado al sistema fotovoltaico es mayor, entre 3 y 5 veces, que el del destilador solar pasivo [27, 28].

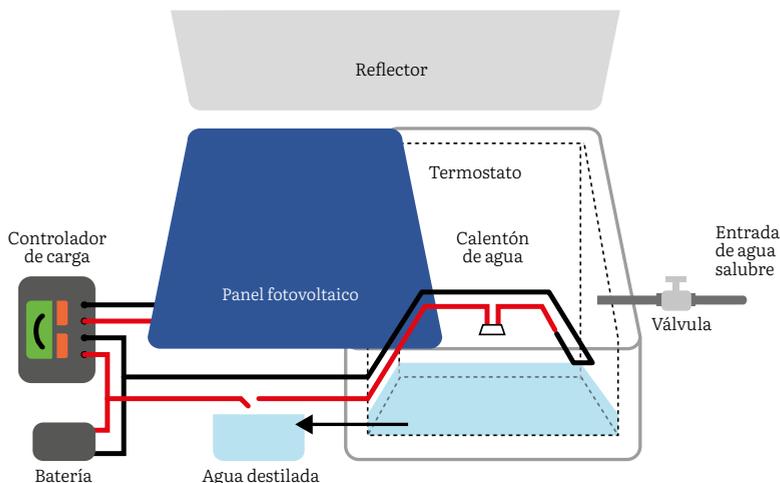


Figura 3.8
 Unidad de destilación solar activa con panel fotovoltaico.
 Fuente: elaboración propia.

3.2.2 Suministro de agua precalentada

Consiste en un destilador solar de pendiente simple en el que el calor del agua residual se recupera haciéndola pasar a una velocidad constante por un intercambiador de calor instalado dentro del destilador, precalentando así el agua del destilador, especialmente en las horas en que no hay Sol (Figura 3.9) [30]. Este método de aumento de la temperatura del agua del destilador incrementa la diferencia de temperatura entre el agua y la cubierta de vidrio inferior, lo que provoca una mayor evaporación y condensación. El agua caliente residual procede de diversas fuentes como industrias papeleras, químicas, centrales térmicas e industrias alimentarias, y puede utilizarse en plantas de destilación solar para aumentar la productividad [4, 31].

Este tipo de destiladores han probado una mayor eficiencia. En el estudio de Park y colaboradores se simuló la adición de calor residual al destilador solar con agua de mar, colocando un intercambiador de calor en la cuenca acoplado a los gases de escape de un generador

eléctrico portátil. Los resultados reportados mostraron un incremento considerable de la productividad diaria a diferentes caudales de calor residual. Cuando el calor añadido al sistema era de 10 MJ, la productividad al cabo de 2 h fue de 7 kg/m², mientras que fue de 16 kg/m² cuando el calor añadido era de 20 MJ [32].

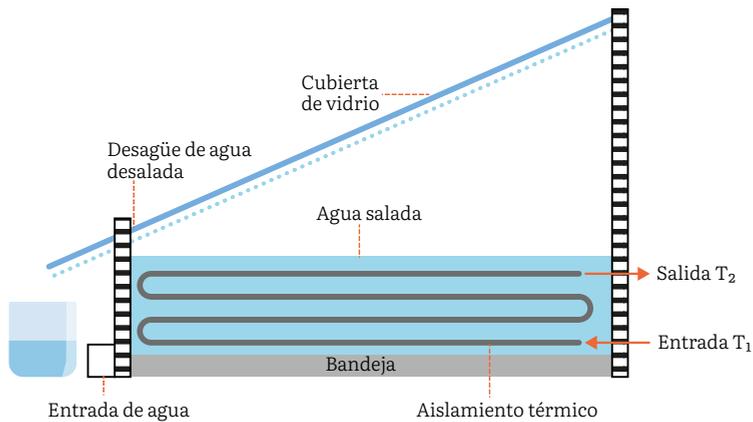


Figura 3.9
Destilador solar acoplado a intercambiador de calor.

Fuente: elaboración propia.

En este sentido, los sistemas de destilación solar activa pueden usar distintas configuraciones o sistemas previos, por ejemplo, acoplado a un colector plano, acoplado a un concentrador parabólico, acoplado a un colector de tubos de vacío, acoplado a un tubo de calor, acoplado a sistema híbrido FV/T; además, pueden usar distintos tipos de destilación solar como la multi-etapa, el sistema de destilación solar activa multi-efecto, el destilador solar con burbujas de aire o el sistema híbrido de destilación solar [4].

3.3 Destilador solar multi-etapa de vacío

La Figura 3.10 muestra un destilador solar multi-etapa propuesto por Ahmed y colaboradores, el cual consiste en tres etapas con tuberías separadas de recogida de soborno y destilado, conectadas a sus

respectivos tanques de recogida. La presión en el interior de cada etapa se mantiene por debajo de la atmosférica con la ayuda de una bomba de vacío accionada fotovoltaicamente.

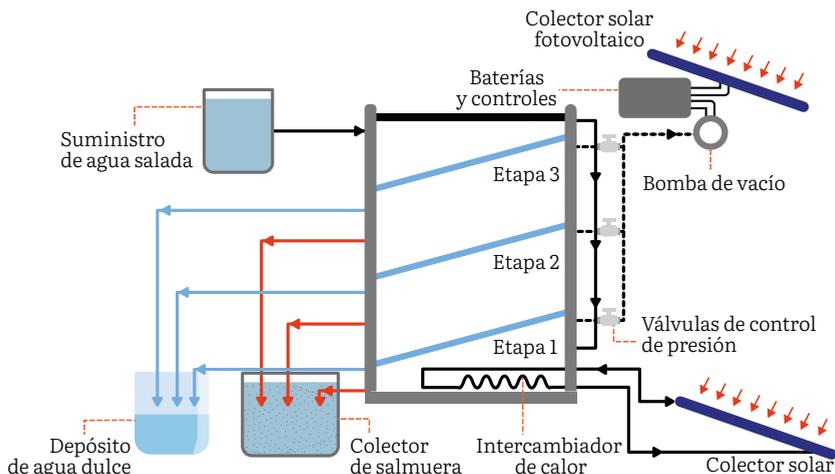


Figura 3.10
Esquema de un destilador solar multi-etapa de vacío.
Fuente: elaboración propia.

El tanque de almacenamiento de agua salina se encuentra en la parte superior de la última etapa. El agua salina del tanque fluye por cada etapa manteniendo la temperatura determinada del agua de la cuenca. El agua de la cuenca inferior o primera etapa se calienta con la ayuda del intercambiador de calor y la combinación del colector de placas planas, lo que provoca una diferencia de temperatura entre el agua de la cuenca y la cubierta de cristal inferior. El agua salina se evapora y cede su calor a la superficie inferior de la segunda etapa, por lo que la temperatura del agua de la segunda cuenca aumenta, debido a la recuperación de calor latente, lo que provoca la evaporación y la condensación. El mismo fenómeno continúa incluso en la última etapa. En cada etapa también disminuye la presión interna, de manera que conduce a un aumento de la tasa de evaporación y, por ende, a una mayor cantidad de condensado. Los autores, Ahmed y colaboradores, informaron que el rendimiento máximo de destilado a una presión

de 0.5 bares en la primera, segunda y tercera etapas fue de $6 \text{ kg/m}^2/\text{día}$, $4.3 \text{ kg/m}^2/\text{día}$ y $2 \text{ kg/m}^2/\text{día}$, respectivamente [30].

3.4 Destilador solar integrado con un condensador externo o interno

En este tipo de destiladores es acoplado un condensador externo o interno para promover la evaporación del agua salada y aumentar su productividad (Figura 3.11). El principal objetivo de añadir el condensador externo es ayudar a reducir la pérdida de calor por convección del agua al vidrio, ya que el condensador sirve como un disipador de calor y masa adicional [31].

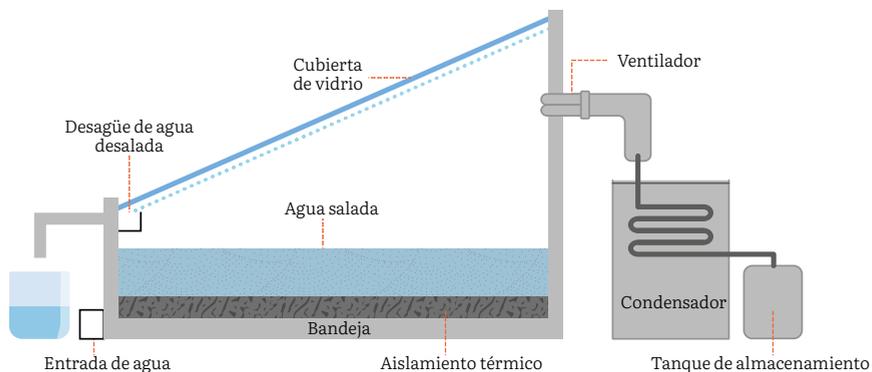


Figura 3.11
Destilador solar equipado con un condensador externo.

Fuente: elaboración propia.

Debido a que la productividad de agua destilada mediante un destilador solar de monocubeta es muy limitada, la adición de condensadores mejora este rendimiento.

Se ha demostrado experimentalmente que el efecto de añadir un condensador externo al recipiente del destilador disminuye la pérdida de calor por convección del agua al vidrio, ya que el condensador actúa como un disipador de calor, mostrando que la integración del

destilador solar con un condensador externo aumenta el rendimiento del agua destilada en un 53.2 % aproximadamente [34].

3.5 Destilador solar de burbujas de aire

La eficiencia de este tipo de destilador depende del efecto simultáneo de forzar las burbujas de aire seco, junto con el efecto de enfriamiento de la cubierta de vidrio. Se utiliza un soplador y válvulas de control para forzar el burbujeo del aire sobre el agua del estanque (Figura 3.12). Esta modificación conduce a un aumento de la producción de destilado, pues mejora tanto el fenómeno de evaporación como el de condensación [31]. Los destiladores con suministro de burbujeo tienen más eficiencia térmica y menos caída de presión, en comparación con los colectores convencionales [35].

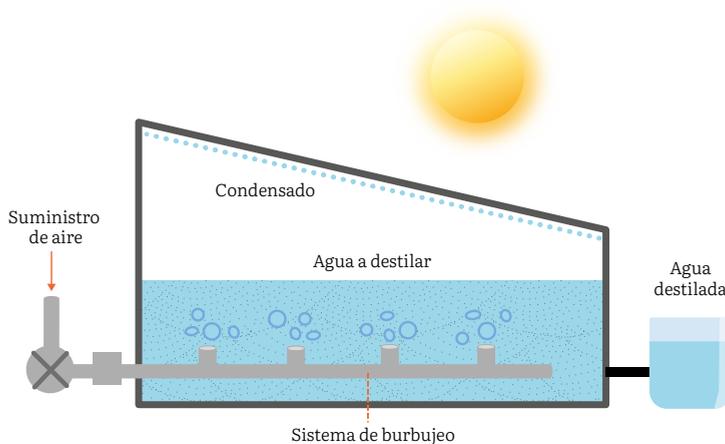


Figura 3.12
Sistema de burbujeo acoplado a un destilador de pendiente.
Fuente: elaboración propia.

Fallahzadeh y colaboradores diseñaron un destilador solar con condiciones exteriores e interiores específicas de pendiente única, el cual consta de un colector en espiral simple y un sistema de inyección de burbujas para aumentar la velocidad de evaporación, así como un

sistema de serpentín de tubos de cobre para mejorar la condensación del agua. Los resultados mostraron que la disminución del número de inyectores de aire conlleva una reducción de la productividad y de la eficacia del sistema, por lo que la inyección de aire resultó ser uno de los parámetros claves para el aumento de la eficiencia del sistema. Se estimó un costo medio de 0.08 dólares por litro de agua durante una vida útil de 10 años, lo que es comparable con otros tipos de destiladores solares [35].

En la Tabla 3.2 se muestra una comparación entre los destiladores pasivos y activos, los cuales tienen distintos tipos de diseños, materiales y condiciones. Se puede observar que los destiladores solares activos logran aumentar la eficiencia de destilación global e incrementar la productividad. Sin embargo, la maximización de producción de destilado depende de varios factores como el clima, el diseño (material, orientación, inclinación, fuentes externas, etc.) y la operación (salinidad del agua, profundidad y temperatura de alimentación).

Tabla 3.2 Revisión de tipos de destiladores y sus eficiencias.

Tipo de destilador	Diseño	Eficiencia	Ref
Destilador de cuenca de pendiente única con múltiples absorbedores porosos flotantes.	Tamaño de la cuenca: 0.8 m x 0.65 m. Cubierta de vidrio 3 mm y 24° de inclinación. Piezas de termocol: 0.79 m x 0.07 m x 0.025 m. Flotación de nueve absorbedores de poliestireno en el agua de la cuenca.	Rendimientos del 68 % y del 35 % en días claros y nublados.	[36]

Destilador solar con unidad de almacenamiento de material de cambio de fase (PCM).	<p>Aletas cilíndricas huecas.</p> <p>Diámetro exterior: 19 mm.</p> <p>Grosor: 1 mm.</p> <p>Longitud de las aletas cilíndricas: 26 mm.</p> <p>La distancia entre dos aletas: 5 cm.</p> <p>Número de aletas: 225.</p>	<p>16 % de eficiencia energética media.</p> <p>Costo por litro de agua dulce por metro cuadrado de 0.0427 \$/l.</p> <p>Rendimientos acumulativos diarios totales de agua dulce 3.26 kg/m².</p>	[37]
Destilador solar de doble cubeta (DBSS) con tubos de vacío.	<p>Aletas macizas porosas y robustas de acero dulce.</p> <p>Aletas de 3 cm de longitud.</p> <p>Inclinación de la cubierta de vidrio de 23°.</p> <p>Inclinación de los tubos de vacío de 45°.</p>	<p>Aumento de la producción de destilado en un 25 %, en comparación con los destiladores solares convencionales de doble cubeta con tubos de vacío.</p>	[38]
Destilador activo de doble pendiente.	<p>Aletas rectangulares macizas.</p> <p>El tamaño de las aletas 88.9 × 3 × 0.4 cm³.</p> <p>Número de aletas: 6.</p> <p>Placas absorbedoras de dimensiones de 0.89 m x 0.56 m (0.5 m²).</p>	<p>Productividad de 3.07 L/m².</p> <p>Eficiencia media diaria de 22.33 %</p> <p>0.0117 \$/L/m².</p>	[39]
Destilador solar de pendiente única integrado con aletas porosas.	<p>Aletas porosas de aluminio.</p> <p>El diámetro de 3 cm.</p> <p>Altura de las aletas de 11 cm.</p> <p>Número de aletas: 20.</p> <p>Cubierta de vidrio de 4 mm de grosor y 23° de inclinación.</p>	<p>3.8 litros de producción de destilado, mejorando un 42.3 %, en comparación con un destilador convencional.</p>	[40]

3.6 Aplicaciones de destilación solar

Una de las mayores y más exitosas aplicaciones de destilación solar ha sido la desalinización de agua de mar. La necesidad de eliminarle la salinidad al agua de mar es un tema que ha sido estudiado a lo largo del tiempo, pues ha representado una alternativa para los asentamientos humanos que están cerca del mar de disponer de agua de buena calidad para el consumo y ciertas actividades productivas.

Otras aplicaciones de la destilación solo están enfocadas en el tratamiento de aguas residuales de procesos industriales, debido a que se promueve el fenómeno de evaporación, así como la separación de materiales y sustancias que se encuentran disueltas. También ayuda para la gestión de los lodos residuales que se generan, pues presentan características que los hacen más fáciles de manipular y tratar.

En ambas aplicaciones resulta altamente atractivo utilizar fuentes de energía como la radiación solar, pues no solo significa una disminución en los costos de operación, sino también un avance clave para reducir las emisiones industriales de bióxido de carbono (CO_2), así como para abonar a dar solución a los problemas energéticos y cuidar el medioambiente [41, 42].

En los últimos años ha habido grandes avances en materiales y diseño de destiladores solares al aire libre, lo que ha aumentado la eficiencia de conversión de energía solar en vapor de agua en volúmenes grandes, y está permitiendo su uso industrial a gran escala [41]. Dentro de los parámetros más importantes para la aplicación de determinado tipo de equipamiento se encuentra la salinidad del agua. Para obtener agua que permita lograr una buena eficiencia, es importante la ubicación geográfica de la fuente de agua, ya que tanto la salinidad como la radiación solar cambian dependiendo de la región. Estas condiciones complican la selección y el diseño del destilador, pues cada configuración tecnológica funciona eficazmente dentro de un determinado rango de salinidad y para una composición relativamente constante de agua de alimentación y de radiación solar.

En este sentido, se han desarrollado diversos equipos. Una muestra de un destilador solar es el propuesto por Lisboa y colaboradores, el cual tiene un solo depósito y una pendiente pronunciada para la desalinización de agua de mar (Figura 3.13). En este dispositivo se consideró que los materiales idóneos para el depósito deben estar hechos de aluminio o hierro, y pintados de negro, lo cual contribuye a maximizar la absorción de radiación. En la parte superior se recomienda una cubierta de vidrio inclinada, la cual debe estar debidamente sellada con lana de vidrio o serrín para evitar la pérdida de calor. En las corridas experimentales se encontró que entre los parámetros que más influyen en la eficiencia de la desalinización se encuentra la altura de las paredes, la profundidad del agua, la introducción de reflectores y el aumento del aislamiento. Adicionalmente, el uso de materiales porosos y la separación de la evaporación y condensación incrementan la eficiencia del destilador solar [43].

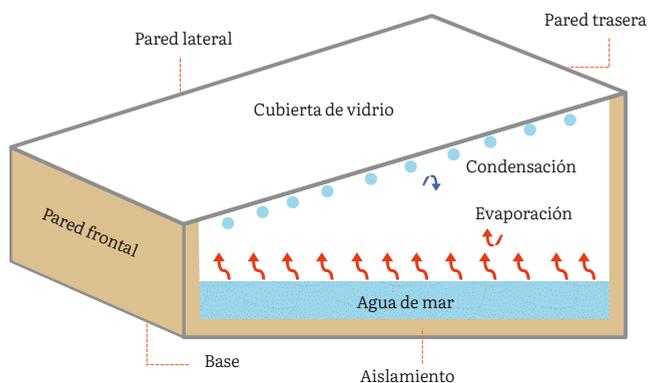


Figura 3.13
Representación en 3D de un destilador solar de una sola vertiente.
Fuente: elaboración propia.

Una estrategia que permite concentrar la radiación procedente del Sol en el punto focal es utilizar discos parabólicos, como lo ha reportado Abudakkar y colaboradores. La idea es maximizar la irradiación solar en el punto exacto para que aumente la eficiencia de evaporación y permita una mayor desalinización de agua de mar (Figura 3.14). Este destilador consiste en un plato paraboloide de diámetro 1.46 m y un alambique solar de longitud 33 cm, anchura 19 cm y alturas 15

y 29 cm colocado en el punto focal del plato. La parábola permite girarla manualmente en torno a un eje único. La placa solar se orienta manualmente hacia el Sol una vez por la mañana y otra por la tarde. Se pega papel aluminio en el concentrador, pues tiene una reflectividad de 0.88; esto es importante, ya que la reflectividad del material del concentrador afecta al porcentaje de radiación solar que llega al receptor. El destilador solar está hecho de vidrio por todos los lados, excepto por la parte superior, porque utiliza una lámina acrílica, la cual tiene una baja conductividad térmica, reduce la pérdida de calor y aumenta la velocidad de evaporación. La eficiencia del destilador solar que fue reportada en términos de disminución del pH, dureza, cloruros y sólidos disueltos totales es de 7.28 %, 99.29 %, 98.75 % y 99.79 %, respectivamente [44].

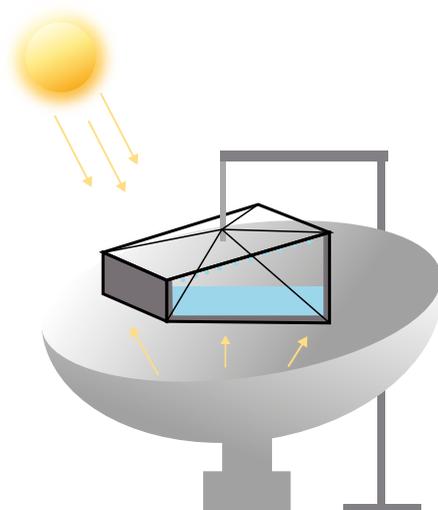


Figura 3.14
Destilador solar pasivo sobre un plato parabólico.
Fuente: elaboración propia.

Otra de las grandes aplicaciones de los destiladores solares es en el tratamiento de aguas residuales de diferente naturaleza; por ejemplo, se han utilizado para el tratamiento de agua de extracción de petróleo y gas de esquisto. La extracción de petróleo y gas de

esquisto requieren grandes volúmenes de agua durante las técnicas de perforación y al mismo tiempo generan grandes cantidades de agua residual, la cual es muy compleja, e incluye principalmente altos niveles de sólidos disueltos totales (TDS), una variedad de compuestos orgánicos peligrosos y materiales radiactivos naturales [45], por lo tanto, la gestión eficaz de las aguas residuales del gas de esquisto es de suma importancia para lograr un desarrollo industrial sostenible. En este sentido, el tratamiento de este tipo de agua con destiladores solares ha demostrado ser una tecnología que permite alcanzar agua condensada que puede reutilizarse para el riego, aunque se requiere posiblemente un paso de tratamiento adicional para alcanzar la calidad deseada; y favorece la recuperación de recursos, especialmente de elementos estratégicos como el litio, el uranio y el europio. La recuperación inteligente de sales en el proceso de evaporación de agua y cristalización, realizando la precipitación clasificada en un solo paso, es una dirección de investigación prometedora en un futuro próximo [41].

Los destiladores solares también han sido aplicados para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la agroindustria. En este sector se han empleado sistemas comerciales como el desarrollado por la empresa holandesa Kascade: se basa en una cubierta triangular transparente sobre una superficie plana. Este sistema puede utilizarse tanto para la evaporación como para el secado de lodos. El rendimiento máximo de agua destilada reportado por la empresa para la evaporación es de $10 \text{ L/m}^2 \cdot \text{día}$, y la capacidad de secado reportada es de $11.5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{día}$ [42]. Se ha estudiado también el tratamiento de aguas residuales derivadas del proceso de extracción de aceite de oliva virgen, por medio de destilación, utilizando un colector solar cilindro-parabólico, donde se ha obtenido una reducción significativa del 95 % al 97 % de los compuestos fenólicos tras la destilación. Además, en comparación con el agua cruda, el pH del destilado recuperado ha disminuido significativamente. El colector solar cilindro-parabólico con 26.6 m^2 de área de apertura ha generado 19 MWh de energía térmica a lo largo de la fase de post-producción de aceite de oliva, lo que evitó alrededor de 12.660 kg (eq) de emisiones de CO_2 .

Como hemos podido observar a lo largo del capítulo, los destiladores solares parecen ser una tecnología prometedora para la obtención de agua dulce y para el tratamiento de aguas residuales, pues no solo nos permite alcanzar agua con una buena calidad, sino que representa una respuesta viable en cuestiones energéticas al utilizar la radiación solar. Por ello, se convierte en una respuesta tanto para la crisis del agua como para la crisis energética, evitando el uso de combustibles fósiles, reduciendo las emisiones de CO_2 . Por su parte, también nos permite alcanzar la llamada economía circular del agua, pues logramos reutilizar agua residual, mientras recuperamos productos con valor agregado como el litio, el uranio y el europio, así como diferentes sales disueltas.

Los destiladores solares continúan presentando ciertas desventajas como los fenómenos de incrustación y de residuos hipersalinos, los cationes divalentes disueltos, como el Ca^{2+} y el Mg^{2+} , que inducen a la formación de incrustaciones, mientras que la materia orgánica disuelta y las bioespecies provocarán incrustaciones en el absorbedor solar y dentro de la estructura de suministro de agua. Por ello, deben utilizarse materiales con diseños novedosos de precipitación que impidan que la sal se adhiera al dispositivo [46]. Otra de las limitaciones de esta tecnología es la producción específica de agua; esta eficiencia puede mejorarse al estudiar el rendimiento de la conversión solar-térmica del absorbedor solar, al reducir la pérdida de calor por conducción, radiación y convección, y al perfeccionar la eficiencia térmica de la generación de vapor con el desarrollo de estrategias de recuperación de calor latente sencillas, energéticamente eficientes, flexibles, ligeras y compactas para mejorar sustancialmente la producción del destilado a bajo costo [41]. Por su parte, con respecto a los cristales de sal obtenidos mediante el proceso de destilación, algunos de ellos pueden resultar ser tóxicos, por ejemplo, metales pesados, lo que complica la recuperación y reutilización de los cristales de sal; puede ser necesario un tratamiento adicional para eliminar los materiales peligrosos y cumplir los objetivos de pureza.

Referencias

- [1] A. Singh, “A review of wastewater irrigation: Environmental implications”, *Resources, Conservation Recycling*, vol. 168, 2021. Available: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105454>
- [2] N. Gonzalez-Rivas, H. Reyes-Pérez, C.E. Barrera-Díaz, “Recent Advances in Water and Wastewater Electrodisinfection”, *ChemElectroChem*, vol. 6, pp. 1978–1983, 2019.
- [3] L.A. Kristoferson, V. Bokalders, “Solar Water Distillation”, *Renewable Energy Technologies*, pp. 215–218, 1986. Available: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-034061-6.50024-x>
- [4] K. Sampathkumar, T.V. Arjunan, P. Pitchandi, P. Senthilkumar, “Active solar distillation-A detailed review”, *Renewable and Sustainable Energy Review*, vol. 14, pp. 1503–1526, 2010. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.01.023>
- [5] A.W. Jeevadasan, S. Padmini, C. Bharatiraja, A.E. Kabeel, “A review on diverse combinations and Energy-Exergy-Economics (3E) of hybrid solar still desalination”, *Desalination*, vol. 527, 2022. Available: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115587>
- [6] P. Wang, “Emerging investigator series: the rise of nano-enabled photothermal materials for water evaporation and clean water production by sunlight”, *Environmental Science: Nano*, 5, 1078–1089, 2018. Available: <https://doi.org/10.1039/c8en00156a>
- [7] W. Moebs, S.J. Ling, J. Sanny, “Física universitaria vol. 2”, OpenStax, Texa, 2021. Available: <https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-2/pages/1-5-cambios-de-fase>
- [8] A.K. Singh, R.K. Yadav, D. Mishra, R. Prasad, L.K. Gupta, P. Kumar, “Active solar distillation technology: A wide overview”, *Desalination*, vol. 493, 2020. Available: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114652>
- [9] S.M. Parsa, “Reliability of thermal desalination (solar stills) for water/wastewater treatment in light of COVID-19 (novel coronavirus “SARS-CoV-2”) pandemic: What should consider?”, *Desalination*, vol. 512, 2021. Available: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115106>

- [10] M. Barroso, L. Gil Vollmer, S. Arcetti, “Destilador solar para usos múltiples”, *Tekhné*, 2016.
- [11] J.P. Gerofi, G.G. Fenton, E. Mannik, Solar distillation: the solar-driven case. *Desalination*. 1981; 39; 83-94. Available: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)86111-1](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)86111-1)
- [12] H. Manchanda, M. Kumar, “A comprehensive decade review and analysis on designs and performance parameters of passive solar still”, *Renewables: Wind, Water and Solar*, 2, 2015. Available: <https://doi.org/10.1186/s40807-015-0019-8>
- [13] J. Carletto, L. Rodrigo, V. Rodrigo, Diseño de una planta de destilación solar de agua para la facultad de ingeniería y ciencias económico sociales en villa mercedes, san luis, evaluación de costos, 2000, pp. 4–8.
- [14] A.A. El-Sebaai, E. El-Bialy, “Advanced designs of solar desalination systems: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 1198–1212, 2015. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.161>
- [15] T. Arunkumar, Y. Ao, Z. Luo, L. Zhang, J. Li, D. Denkenberger, J. Wang, “Energy efficient materials for solar water distillation - A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 115, 2019. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109409>
- [16] A. Caro Guzmán, Desarrollo y evaluación de destiladores solares de agua de alto rendimiento, [Tesis de doctorado, Universidad Autónoma del Estado de México] 2020. Disponible en: <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/105716>
- [17] A.E. Kabeel, S.A. El-Agouz, “Review of researches and developments on solar stills”, *Desalination*, vol. 276, pp. 1–12, 2011. Available: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.03.042>
- [18] K. Voropoulos, E. Mathioulakis, V. Belessiotis, “Transport phenomena and dynamic modeling in greenhouse-type solar stills”, *Desalination*, vol. 129, pp. 273–281, 2000. Available: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)00067-9](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)00067-9)
- [19] P. Durkaieswaran, K.K. Murugavel, “Various special designs of single basin passive solar still - A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 1048–1060, 2015. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.111>

- [20] A.E. Kabeel, K. Harby, M. Abdelgaied, A. Eisa, “A comprehensive review of tubular solar still designs, performance, and economic analysis”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 246, 2020. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119030>
- [21] Ahsan A, Imteaz M, Rahman A, Yusuf B, Fukuhara T. “Design, fabrication and performance analysis of an improved solar still”. *Desalination*, vol. 292, pp. 105-112, 2012. Available: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.02.013>
- [22] N. Rahbar, A. Asadi, E. Fotouhi-Bafghi, “Performance evaluation of two solar stills of different geometries: Tubular versus triangular: Experimental study, numerical simulation, and second law analysis”, *Desalination*, vol. 443, pp. 44–55, 2018. Available: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.05.015>
- [23] C. Balocchi, S. Villagrán, “Destiladores solares : nuevo enfoque en materiales y diseños”, en: XXVI Simposio Peruano de Energía Solar y Del Ambiente (XXVI- SPES), Ayacucho, 2019, pp. 18–21. Disponible en: <https://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2020/06/Balocchi-C.pdf>
- [24] K. Pansal, B. Ramani, K. kumar Sadasivuni, H. Panchal, M. Manokar, R. Sathyamurthy, A.E. kabeel, M. Suresh, M. Israr, “Use of solar photovoltaic with active solar still to improve distillate output: A review”, *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 10, 2020. Available: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100341>
- [25] A. Samuel, J. Brizuela, K.C. Chang, C.T. Lin, “Design and Investigation of an Effective Solar Still Applicable to Remote Islands”, *Water (Switzerland)*, 14, 2022. Available: <https://doi.org/10.3390/w14050703>
- [26] J. Aguilar Castro, “Diseño y construcción de un destilador solar con condensación por separado”, Tesis, 2019.
- [27] A. Muthu Manokar, D. Prince Winston, A.E. Kabeel, S.A. El-Agouz, R. Sathyamurthy, T. Arunkumar, B. Madhu, A. Ahsan, “Integrated PV/T solar still- A mini-review”, *Desalination*, vol. 435, pp. 259–267, 2018. Available: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.04.022>

- [28] S. Kumar, G.N. Tiwari, “Estimation of internal heat transfer coefficients of a hybrid (PV/T) active solar still”, *Solar Energy*, vol. 83, pp. 1656–1667, 2009. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.06.002>
- [29] A.E. Kabeel, M. Abdelgaied, G.M. Mahmoud, “Performance evaluation of continuous solar still water desalination system”, *Journal Thermal Analysis and Calorimetry*, 144, 907-916, 2021. Available: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09547-5>
- [30] P. Vishwanath Kumar, A. Kumar, O. Prakash, A.K. Kaviti, “Solar stills system design: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 153–181, 2015. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.103>
- [31] O. Younis, A.K. Hussein, M.E.H. Attia, H.S.S. Aljibori, L. Kolsi, H. Togun, B. Ali, A. Abderrahmane, K. Subkrajang, A. Jirawattanapanit, “Comprehensive Review on Solar Stills—Latest Developments and Overview”, *Sustainability*, 14, 2022. Available: <https://doi.org/10.3390/su141610136>
- [32] C.D. Park, B.J. Lim, K.Y. Chung, S.S. Lee, Y.M. Kim, “Experimental evaluation of hybrid solar still using waste heat”, *Desalination*, vol. 379, pp. 1–9, 2016. Available: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.10.004>
- [33] M.I. Ahmed, M. Hrairi, A.F. Ismail, “On the characteristics of multistage evacuated solar distillation”, *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 1471–1478, 2009. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.10.029>
- [34] A.E. Kabeel, Z.M. Omara, F.A. Essa, “Enhancement of modified solar still integrated with external condenser using nanofluids: An experimental approach”, *Energy Conversion and Management*, vol. 78, pp. 493–498, 2014. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.013>
- [35] R. Fallahzadeh, L. Aref, V. Madadi Avargani, N. Gholamiarjenaki, “An experimental investigation on the performance of a new portable active bubble basin solar still”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 181, 2020. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115918>

- [36] P.K. Srivastava, S.K. Agrawal, “Experimental and theoretical analysis of single sloped basin type solar still consisting of multiple low thermal inertia floating porous absorbers”, *Desalination*, vol. 311, pp. 198–205, 2013. Available: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.11.035>
- [37] M.S. Yousef, H. Hassan, “Energetic and exergetic performance assessment of the inclusion of phase change materials (PCM) in a solar distillation system”, *Energy Conversion and Management*, vol. 179, pp. 349–361, 2019. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.078>
- [38] H. Panchal, K. Kumar Sadasivuni, M. Suresh, S. Yadav, S. Brahmabhatt, “Performance analysis of evacuated tubes coupled solar still with double basin solar still and solid fins”, *International Journal of Ambient Energy*, vol. 41, pp. 1031–1037, 2020. Available: <https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1501745>
- [39] S.S. Tuly, M.S. Rahman, M.R.I. Sarker, R.A. Beg, “Combined influence of fin, phase change material, wick, and external condenser on the thermal performance of a double slope solar still”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 287, 2021. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125458>
- [40] H. Panchal, R. Sathyamurthy, “Experimental analysis of single-basin solar still with porous fins”, *International Journal of Ambient Energy*, vol. 41, pp. 563–569, 2020. Available: <https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1360206>
- [41] W. Xie, P. Tang, Q. Wu, C. Chen, Z. Song, T. Li, Y. Bai, S. Lin, A. Tiraferri, B. Liu, “Solar-driven desalination and resource recovery of shale gas wastewater by on-site interfacial evaporation”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 428, 2022. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132624>
- [42] J. Nadal-Bach, J.C. Bruno, J. Farnós, M. Rovira, “Solar stills and evaporators for the treatment of agro-industrial liquid wastes: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 142, 2021. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110825>
- [43] A.A.V. Lisboa, R. Segurado, M.A.A. Mendes, “Solar still performance for small-scale and low-cost seawater desalination: Model-based analysis and water yield enhancement techniques”,

- Solar Energy, vol. 238, pp. 341–362, 2022. Available: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.04.007>
- [44] A. Abubakkar, P. Selvakumar, T. Rajagopal, A. Tamilvanan, “Development of concentrating dish and solar still assembly for sea water desalination”, *Materials Today Proceedings*, vol. 45, pp. 974–980, 2021. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.043>
- [45] H. Chang, T. Li, B. Liu, R.D. Vidic, M. Elimelech, J.C. Crittenden, “Potential and implemented membrane-based technologies for the treatment and reuse of flowback and produced water from shale gas and oil plays: A review”, *Desalination*, vol. 455, pp. 34–57, 2019. Available: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.01.001>
- [46] W. Xie, J. Duan, J. Li, B. Qi, R. Liu, B. Yu, H. Wang, X. Zhuang, M. Xu, J. Zhou, “Charge-Gradient Hydrogels Enable Direct Zero Liquid Discharge for Hypersaline Wastewater Management”, *Advanced Materials*, vol. 33, 1–10, 2021. Available: <https://doi.org/10.1002/adma.202100141>

CONCLUSIÓN

En este breve libro se abordaron temas relacionados con el uso de la energía que proporciona el Sol para el tratamiento de agua de forma directa. El Sol es la mayor fuente de energía de la cual disponemos; por ello, es necesario aumentar el conocimiento de cómo poder aprovecharla de mejor manera. Se expusieron las necesidades de este tipo de tratamiento, así como la comprensión detallada de los mecanismos de degradación de contaminantes por medio de energía solar, la viabilidad y las técnicas exploradas hasta la fecha. En este sentido, el foco de atención hacia la aplicación real de tratamientos de aguas residuales a través de energía solar es la reducción del uso de energía convencional y, por tanto, la emisión de gases de efecto invernadero.

En los capítulos previos se describió que existen diversas tecnologías dentro del tratamiento de agua residual mediante radiación solar y una gama de opciones con tecnologías muy sencillas y de baja inversión, por ejemplo, la destilación solar, que es adecuada para regiones remotas de países en desarrollo que carecen de abundante apoyo financiero y acceso a alta tecnología. La mayor aplicación de esta tecnología es en la desalinización de agua. Sin embargo, la destilación solar también ha demostrado tener buenas eficiencias de degradación de compuestos orgánicos, debido a que cada sustancia disuelta en el agua cuenta con una temperatura de destilación diferente, lo que permite tener una mayor selectividad. Para que la destilación solar pueda aplicarse con éxito, es de suma importancia contar con materiales y diseños adecuados en los destiladores solares, donde se eviten incrustaciones de sales y se mejore el proceso de precipitación, así como la búsqueda de estrategias de recuperación de calor latente sencillas y eficientes que aumenten la obtención de destilado a bajo costo. Por otra parte, la destilación solar no solo podría ayudar en la desalinización o tratamiento de agua residual, debido a que en los últimos años ha llamado la atención su capacidad para recuperar las sales como productos de valor agregado.

Los procesos fotoquímicos que emplean radiación solar como tratamiento de agua residual son, sin duda, las tecnologías con mayor atracción a nivel de investigación y escalamiento a nivel industrial, ya que han demostrado ser una opción energética altamente eficiente y ambientalmente amigable para la degradación de compuestos orgánicos persistentes. No obstante, el escalamiento de estas tecnologías ha sido obstaculizado, debido al posible alto costo de capital, la necesidad de fotocatalizadores y la naturaleza intermitente de la energía solar. Dentro de los principales retos se encuentra la síntesis de fotocatalizadores inmovilizados eficientes en la degradación de compuestos orgánicos, los cuales deben cumplir con características importantes como la posibilidad de reciclarse tras una actividad fotocatalítica frecuente y una síntesis sencilla y viable económicamente.

Otra de las aplicaciones atractivas de la radiación solar en el tratamiento de agua es mediante los procesos de oxidación avanzada, los cuales ya han demostrado su capacidad y viabilidad en la degradación de contaminantes altamente complejos presentes en el agua. A pesar de ello, uno de sus principales inconvenientes es el costo energético de estas tecnologías, por lo que lograr que la energía solar sea la fuente de energía para estos procesos es uno de los enfoques de mayor interés. Ya se han reportado tecnologías de oxidación avanzada en las que se emplea radiación solar como fuente de energía, sin embargo, a pesar de sus eficiencias aceptables, el principal inconveniente sigue siendo la discontinuidad de la energía.

Los esfuerzos de los procesos de tratamiento de agua residual con radiación solar van encaminados a mejorar la eficiencia y la reducción del costo para alcanzar el escalamiento y su aplicación real. Es esencial el desarrollo novedoso en el diseño de destiladores solares, reactores o tanques de tratamiento, así como la síntesis de fotocatalizadores. No obstante, uno de los principales inconvenientes que nos encontramos en cualquier tecnología de tratamiento de agua solar y el reto a resolver con urgencia es el almacenamiento de la energía solar, lo que permitirá operar de manera continua plantas

de tratamiento de agua solares, con eficiencias de degradación que nos permitan cumplir con los límites máximos permisibles para la descarga de estas aguas o, en el mejor de los casos, su reutilización a nivel agrícola o consumo humano.

RESEÑAS CURRICULARES



Mayra Rodríguez Peña

En 2021 obtuvo el Doble Doctorado mediante un convenio entre la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX) y la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), España. Es Doctora en Ciencias Ambientales por la UAEMEX y Doctora en Ingeniería Química y Ambiental por la UCLM.

En el periodo de 2016-2018 estudió la Maestría en Ciencias Ambientales en la UAEMEX, y en 2017 realizó una estancia de investigación en el Laboratorio de Electroquímica e Ingeniería Ambiental de la UCLM.

En 2011 cursó la Licenciatura de Ingeniería Química en la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México. Actualmente trabaja en Los Alamos National Laboratory como postdoc, donde le fue otorgada la prestigiosa “Los Alamos Director’s Post-Doctoral Fellowship”.



Carlos Eduardo Barrera Díaz

En 2003 obtuvo el Doctorado en Ciencias e Ingeniería Ambientales en la Universidad Autónoma Metropolitana, obteniendo la Medalla al Mérito Universitario. En el periodo de 1996 a 1998, estudió la Maestría en Ingeniería Ambiental en The University of British Columbia en Vancouver,

Canadá. En 1990 cursó la Licenciatura en Ingeniería Química en la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México.

Es integrante del Sistema Nacional de Investigadores desde el 2001. Obtuvo el Premio al Mérito Académico por la Universidad Autónoma Metropolitana en 2003; también ha sido galardonado con el Premio Estatal de Ciencia y Tecnología en el 2014; asimismo, en 2018 y 2023 obtuvo el Premio Scopus por el alto número de citas a sus publicaciones y en 2019 fue reconocido con el Premio WEB of Science por el alto número de citas a sus publicaciones.

En 2023 fue condecorado con la Presea “José Mariano Mociño Suárez Lozada” por la Preservación del Ambiente y la Sostenibilidad de los Recursos Naturales; y le fue otorgada la Medalla de la Universidad de Varsovia, Polonia, por la colaboración científica.

RADIACIÓN SOLAR EN EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

De la autoría de

Mayra Rodríguez Peña
Carlos Eduardo Barrera Díaz

Se terminó de imprimir el 15 de julio de 2024,
en la imprenta SALO PACK DE MÉXICO S.A. de C.V.,
Priv. Moctezuma 108, Col. Guadalupe de San Buenaventura,
C.P. 50110, Toluca, Estado de México.
En su composición se utilizó la fuente Literata.

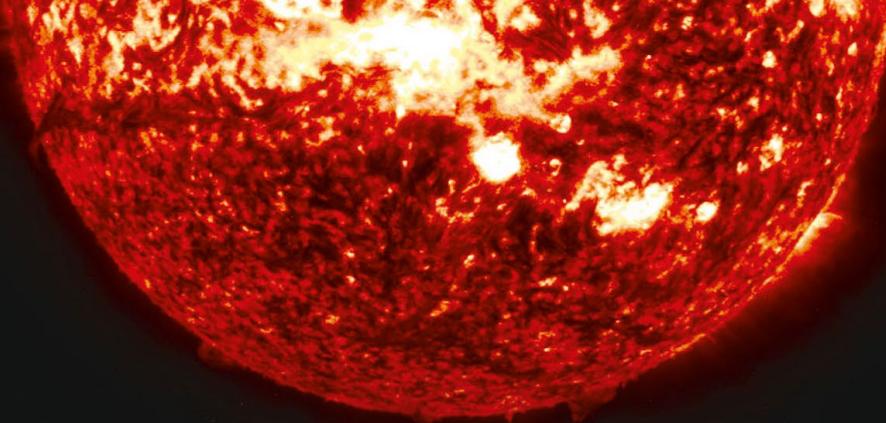
La edición estuvo a cargo de la Dirección de Difusión y Promoción de la Investigación y los Estudios Avanzados, mediante el Departamento de Producción y Difusión Editorial, y consta de 300 ejemplares.

María de los Ángeles
García Moreno
Oswaldo Renato Millán Zea
Cristina Mireles Arriaga

Patricia Vega Villavicencio

**Análisis e interpretación
del sistema antiplagio
Corrección de estilo y ortotipográfica
Diseño de forros, formación
y reelaboración de gráficas
Coordinación editorial**

Por disposición del Reglamento de Acceso Abierto se publica la versión PDF de este libro en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma del Estado de México.



Descubre cómo la radiación solar puede transformar el futuro del tratamiento de agua residual. En este libro se explora cómo el Sol, nuestra mayor fuente de energía, puede ser aprovechado de manera efectiva para abordar uno de los desafíos más apremiantes de nuestro tiempo: la escasez de agua y la necesidad urgente de reducir el impacto ambiental.

Se explica la vital importancia que tiene el Sol en nuestro planeta, y la aplicación de tecnologías simples y económicas en el tratamiento de agua residual. Entre ellas destacan la destilación solar, especialmente adecuada para regiones remotas y países en desarrollo, así como procesos fotoquímicos avanzados para la degradación de contaminantes complejos. Estas tecnologías no solo buscan reducir el uso de energía convencional, sino también mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero.

ISBN 978-607-633-883-4



9 786076 338834

Secretaría de Investigación
y Estudios Avanzados