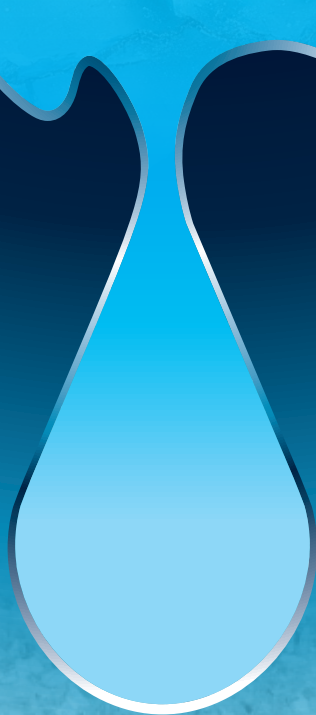


DESALAR AGUA CON EL FRÍO DEL SOL

Agua, energía solar y desalación por congelación



Prometeo Editores



DESALAR AGUA CON EL FRÍO DEL SOL. Agua, energía solar y desalación por congelación

Primera edición, 2026

D. R. © Universidad de Guadalajara
Centro Universitario de Tonalá
Tonalá, Jalisco, México.

Coordinación editorial:

Dra. Beatriz Castillo Téllez
Dra. Margarita Castillo Téllez
Dr. Rosenberg J. Romero

Autores y autoras:

Dra. Margarita Castillo Téllez, Lic. Héctor Salomón Lobera Castillo y Hasbleidy Palacios Hinestroza
Capítulo 1: Agua, energía y ciencia para soluciones sostenibles

Dra. Belkis Sulbarán Rangel, Ing. José Armando Becerra Hernández, Dr. Víctor Hugo Romero Arellano y Dr. Jesús Águila León
Capítulo 2: El nexo agua-energía: dos crisis que no pueden separarse

Dra. Roxana Berenice Recio Colmenares, Dra. Carolina Livier Recio Colmenares y Dr. César Alejandro García García
Capítulo 3: Desalación: convertir agua salina en agua útil

Dra. Beatriz Castillo Téllez, Dr. Gerardo Mejía Pérez y M.I. Carlos Javier Hernández Estrella
Capítulo 4: Desalación por congelación: separar la sal usando hielo

Dr. Erick César López Vidaña, M. C. Dryden Gilberto Estrada Téllez y Mtro. Jorge A. Escobedo Bretado
Capítulo 5: Energía para desalar: de la electricidad a las fuentes renovables

Dr. Alfredo Domínguez Niño y Dr. Octavio García Valladares
Capítulo 6: Energía solar térmica: aprovechar el calor del Sol

Dr. Nicolás Velázquez Limón, Dr. Saúl Islas Pereda y M.I. Luis Antonio López Martínez
Capítulo 7: Refrigeración solar: producir frío aprovechando energía solar

Dr. Joel Kelly Gurubel Tun, Físico Matemático Daniel Uribe Castillo y Dr. Rachid Marzoug
Capítulo 8: ¿Por qué modelar antes de construir?

Ing. Beatriz Melissa Aponte, Dr. José Antonio Rubio González y Dra. Martha Fabiola Martín del Campo Solís
Capítulo 9: Calidad del agua: más allá de quitar la sal

Dra. Abril Adriana Angulo Sherman, Dr. Valentín Flores Payán, Dr. Espicio Monteros Curiel y Dr. Jesús Barrera Rojas
Capítulo 10: Desalación por frío: retos, aprendizajes y visión de futuro

Diseño editorial y formación:

Prometeo Editores

Cuidado editorial:

Alexis Campos

Ilustraciones y figuras:

Alexis Campos



ISBN: 978-970-96121-8-9

Proyecto apoyado por la Secihti en el año 2025.

Esta publicación forma parte de las actividades de divulgación científica del proyecto “Innovación en desalación sostenible: fundamentos físicos y validación de una alternativa de bajo consumo energético con viabilidad solar”, folio CBF-2025-G-309, desarrollado en el marco de la Convocatoria de Ciencia Básica y de Frontera 2025 de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación

Se permite la reproducción parcial de esta obra con fines académicos, educativos y de divulgación, siempre que se cite la fuente correspondiente y no se utilice con fines comerciales. Queda prohibida la reproducción total o parcial con fines de lucro sin autorización previa y por escrito de la Universidad de Guadalajara.

Impreso en México / Publicación digital

Printed in Mexico

Forma sugerida de citar esta obra:

Castillo Téllez, B., Castillo Téllez, M., & Romero, R. J. (Coords.). (2026). Desalar agua con el frío del sol: agua, energía solar y desalación por congelación. Universidad de Guadalajara.

| PRÓLOGO

El acceso al agua y a la energía forma parte de los grandes desafíos de nuestro tiempo. Aunque ambos recursos suelen estudiarse por separado, en la vida cotidiana están profundamente conectados: se requiere energía para captar, bombear, tratar, distribuir o desalar agua; y, al mismo tiempo, numerosos procesos energéticos dependen del agua para funcionar. Comprender esta relación es indispensable para pensar en soluciones más sostenibles, especialmente en regiones con estrés hídrico, limitaciones de infraestructura o alta disponibilidad de recursos renovables.

Este libro de divulgación científica surge con el propósito de acercar al lector a una línea de investigación que integra agua, energía solar, refrigeración y desalación por congelación. Es un intento de explicar, de manera clara y accesible, cómo la ciencia permite estudiar fenómenos conocidos —como la formación de hielo, la concentración de sales o el aprovechamiento del calor solar— para explorar nuevas alternativas ante problemas reales.

A lo largo de los capítulos se aborda el nexo agua-energía, la desalación como estrategia para obtener agua con menor salinidad, la desalación por congelación como proceso emergente, la energía necesaria para separar sales, el aprovechamiento de la energía solar térmica, la posibilidad de producir frío mediante refrigeración solar y la importancia del modelado antes de construir sistemas experimentales o de pensar en su escalamiento. El recorrido concluye con una reflexión sobre los retos técnicos, energéticos, ambientales y sociales que aún deben abordarse.

El objetivo de esta obra es comunicar de manera sencilla conceptos clave que pueden resultar útiles para estudiantes, docentes, investigadores en formación, tomadores de decisiones y público interesado en tecnologías sostenibles. Por ello, se ha buscado un lenguaje claro, con ejemplos, figuras y explicaciones conceptuales que faciliten la comprensión sin perder el rigor científico.

Esta publicación forma parte de las actividades de divulgación del proyecto “Innovación en desalación sostenible: fundamentos físicos y validación de una alternativa de bajo consumo energético con viabilidad solar”, folio CBF-2025-G-309, apoyado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, mediante la Convocatoria de Ciencia Básica y de Frontera 2025. Agradecemos dicho apoyo, así como la colaboración de las autoras y los autores que participaron en este esfuerzo colectivo.

Esperamos que este material contribuya a despertar la curiosidad, fortalecer la formación de los estudiantes y abrir conversaciones sobre nuevas formas de pensar el agua, la energía y la ciencia aplicada a las necesidades sociales. Frente a los retos hídricos y energéticos actuales, la investigación, la colaboración y la comunicación pública de la ciencia son herramientas indispensables para imaginar y construir soluciones más justas, responsables y sostenibles.

Dra. Beatriz Castillo Téllez

Responsable del proyecto y coordinadora principal de la obra.

ÍNDICE

AGUA, ENERGÍA Y CIENCIA PARA SOLUCIONES SOSTENIBLES	9
EL NEXO AGUA-ENERGÍA: DOS CRISIS QUE NO PUEDEN SEPARARSE	18
DESALACIÓN: CONVERTIR AGUA SALINA EN AGUA ÚTIL.....	27
DESALACIÓN POR CONGELACIÓN: SEPARAR LA SAL USANDO HIELO.....	34
ENERGÍA PARA DESALAR: DE LA ELECTRICIDAD A LAS FUENTES RENOVABLES	41
ENERGÍA SOLAR TÉRMICA: APROVECHAR EL CALOR DEL SOL.....	48
REFRIGERACIÓN SOLAR: PRODUCIR FRÍO APROVECHANDO ENERGÍA SOLAR	55
¿POR QUÉ MODELAR ANTES DE CONSTRUIR?	61
CALIDAD DEL AGUA: MÁS ALLÁ DE QUITAR LA SAL.....	67
DESALACIÓN POR FRÍO: RETOS, APRENDIZAJES Y VISIÓN DE FUTURO	73
SOBRE LAS AUTORAS Y AUTORES.....	79

AGUA, ENERGÍA Y CIENCIA PARA SOLUCIONES SOSTENIBLES

**Dra. Margarita Castillo Téllez, Lic. Héctor Salomón Lobera Castillo
y Hasbleidy Palacios Hinestroza**

1.1 | INTRODUCCIÓN: DOS NECESIDADES QUE SOSTIENEN LA VIDA

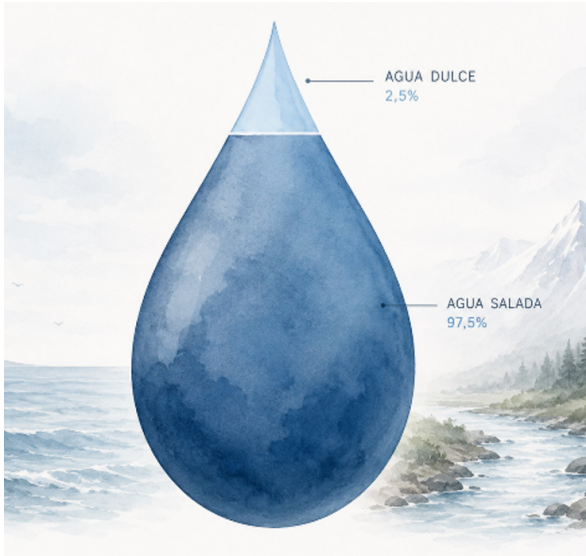
El agua, la energía y la ciencia se conectan cuando buscamos soluciones sostenibles a problemas reales. Abrir una llave y contar con agua disponible parece algo cotidiano. Encender una luz, cargar un celular o conservar alimentos en refrigeración también nos parece normal. Sin embargo, detrás de esas acciones hay dos recursos fundamentales: el agua y la energía. Sin ellos, la vida diaria cambia por completo.



El agua permite beber, cocinar, limpiar, cultivar alimentos, producir bienes y mantener ecosistemas. La energía, por su parte, permite bombear, transportar, tratar, refrigerar, desalinar y distribuir agua. En pocas palabras: el agua necesita energía para llegar a nosotros en condiciones útiles, y la energía, a menudo, necesita agua para generarse, enfriarse o procesarse. Esta relación, conocida como nexo agua-energía, es una de las claves actuales para pensar en soluciones sostenibles.

Por eso, cuando hablamos de sostenibilidad, no podemos tratar el agua y la energía como temas separados. Son dos piezas de un mismo rompecabezas. Si falla una, la otra también se complica. Y si queremos construir soluciones para comunidades, ciudades, zonas rurales o regiones costeras, necesitamos entender esa relación desde el inicio.

La ciencia entra precisamente ahí: no como algo lejano, encerrado en laboratorios, sino como una herramienta para formular mejores preguntas, medir con cuidado y diseñar alternativas más responsables.



1.2 | EL AGUA DULCE: ABUNDANTE EN APARIENCIA, LIMITADA EN LA PRÁCTICA

La Tierra está cubierta de agua. Vista desde el espacio, incluso parece un planeta azul. Pero esa imagen puede engañarnos un poco. La mayor parte del agua del planeta es salada y se encuentra en los mares y océanos. El agua dulce disponible para el consumo humano, la agricultura, la industria y los ecosistemas representa solo una pequeña fracción del total.

Además, no toda el agua dulce está en lugares accesibles. Parte se encuentra congelada, otra está en acuíferos profundos, otra se contamina, y otra simplemente no coincide con los lugares donde más se necesita. Hay regiones donde llueve mucho, pero carecen de infraestructura para almacenar o tratar el agua. En otras, hay comunidades cerca del mar, pero sin acceso seguro a agua dulce. Suena paradójico, pero ocurre con frecuencia: estar rodeados de agua no significa tener agua útil.

A esto se suma el crecimiento de la población, el cambio climático, la sobreexplotación de acuíferos y la contaminación. Las sequías más intensas, las lluvias irregulares y la presión sobre las fuentes de agua obligan a buscar nuevas formas de gestionar este recurso. La agricultura, por ejemplo, sigue siendo

el principal usuario de agua dulce a nivel mundial, lo que evidencia la presión sobre este recurso y la necesidad de mejorar su gestión.

Una de esas alternativas es la desalación, es decir, el proceso mediante el cual se retiran las sales del agua salina o salobre para obtener agua con menor salinidad y con posible uso posterior. No siempre se busca producir agua potable directamente; también puede destinarse al riego, a procesos productivos, a la limpieza, a servicios o a un tratamiento más amplio. Lo importante es entender que convertir agua salina en agua potable requiere conocimiento, tecnología y energía. Aunque el planeta tiene mucha agua, solo una pequeña parte está disponible como agua dulce útil para las personas y los ecosistemas.

1.3 | LA ENERGÍA: EL MOTOR INVISIBLE DEL AGUA

Cuando pensamos en el agua, solemos imaginar ríos, pozos, presas, lluvia o tuberías. Pero pocas veces pensamos en la energía que hay detrás. Para llevar agua desde una fuente hasta una comunidad, se necesita bombearla; para limpiarla, se requieren equipos; para desinfectarla, se requieren procesos; y para desalarla, casi siempre se requiere un aporte significativo de energía.

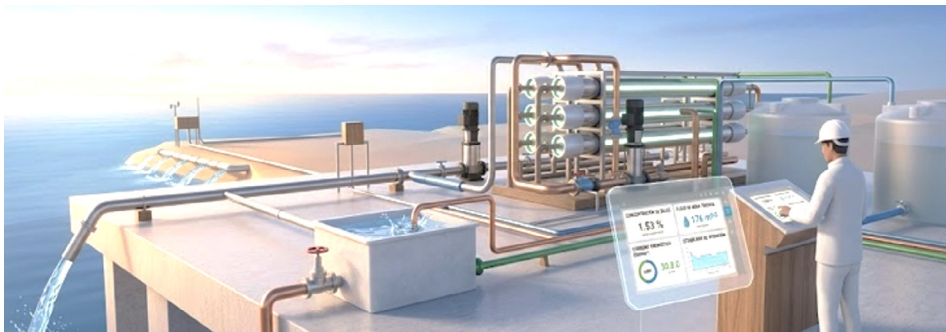


Esto significa que una solución hídrica no puede considerarse sostenible si depende de un consumo energético excesivo, caro o contaminante. Una planta de tratamiento o desalación puede ser técnicamente eficiente, pero si requiere mucha electricidad proveniente de una red eléctrica inestable o muy costosa, puede no ser viable para ciertas comunidades. De hecho, la demanda energética asociada a la desalación seguirá creciendo a medida que aumente el uso de fuentes de agua no convencionales. El agua requiere energía para captarla, tratarla y distribuirla; al mismo tiempo, muchos procesos energéticos dependen de ella.

1.4 | AGUA SIN NUEVOS PROBLEMAS DE ENERGÍA

La respuesta no es sencilla. No existe una tecnología mágica que funcione en todos los lugares, con cualquier calidad de agua y a cualquier costo. Cada solución depende del sitio, de la fuente de agua, de la escala requerida, del clima, de los recursos económicos, de la capacidad de operación y del uso final del agua.

Lo que sí está claro es que las energías renovables abren posibilidades interesantes. En regiones con buena radiación solar, por ejemplo, la energía solar puede convertirse en una aliada para calentar, secar, bombear, refrigerar o alimentar procesos de tratamiento de agua. Pero hay que decirlo con cuidado: usar energía solar no vuelve automáticamente sostenible a una tecnología. El sistema debe estar bien diseñado, bien dimensionado y adaptado al contexto.



1.5 | CIENCIA PARA NO IMPROVISAR

A veces se piensa que innovar es construir rápidamente un prototipo y comprobar si funciona, pero esto no siempre basta. La ciencia ayuda a evitar la improvisación. Antes de construir, conviene entender qué fenómeno se quiere aprovechar, qué variables lo rigen y cuáles son sus límites.

En el caso del agua salina, por ejemplo, no basta con decir «vamos a quitarle la sal». Hay que saber qué tipo de sales contiene, en qué concentración, para qué se utilizará el agua tratada, qué energía se requerirá, qué residuos o corrientes concentradas se generarán y cómo se manejarán. También debe considerarse si el sistema podrá operar de forma estable en condiciones reales. La gestión de la salmuera, por ejemplo, es uno de los principales retos ambientales de la desalación, especialmente al considerar sistemas de mayor escala.

La ciencia no solo busca responder si algo funciona, sino también qué tan bien funciona, en qué condiciones mejora,

cuánta energía consume, qué impacto ambiental puede tener, si puede escalarse y si puede mantenerse con recursos locales.

Estas preguntas pueden parecer menos vistosas que una imagen de un equipo en funcionamiento, pero son las que distinguen una buena idea de una tecnología realmente útil. Una solución mal diseñada puede resultar cara, frágil o problemática para el medio ambiente.

1.6 | SOLUCIONES SOSTENIBLES

La palabra sostenible se usa mucho. Se aplica a productos, proyectos, tecnologías, ciudades, eventos e incluso campañas publicitarias. Pero en el ámbito del agua y la energía, la sostenibilidad debe entenderse con mayor seriedad.

Una solución sostenible debería cumplir al menos con tres condiciones. Primero, debe ser técnicamente viable: funcionar de manera confiable y producir el resultado esperado. Segundo, debe ser ambientalmente responsable: reducir

los impactos, optimizar el uso de los recursos y gestionar adecuadamente los residuos. Tercero, debe ser social y económicamente pertinente: responder a necesidades reales y mantenerse a lo largo del tiempo.

En el caso de las tecnologías para el agua, esto implica mirar más allá del equipo. Hay que pensar en el ciclo completo, desde dónde viene el agua, cómo se trata, cuánta energía se consume, qué calidad se obtiene, qué mantenimiento se requiere, cuánto cuesta, qué capacidades locales se necesitan y qué pasa con las corrientes de rechazo.

Por eso, la sostenibilidad no se logra solo colocando un panel solar o usando la palabra “verde”. Se logra cuando el diseño técnico conversa con el contexto social, ambiental y económico. Dicho más claro, aunque una tecnología sea aceptable a nivel de laboratorio, si no se adapta al territorio, no será útil.

1.7 | EL PAPEL DE LA ENERGÍA SOLAR



La energía solar tiene una ventaja evidente: está ampliamente disponible en muchas regiones de México y de América Latina. En zonas rurales, costeras o con infraestructura limitada, puede representar una oportunidad para impulsar procesos que requieren calor, electricidad o frío.

Cuando se habla de energía solar, muchas personas piensan de inmediato en paneles fotovoltaicos, que generan electricidad. Sin embargo, también

existe la energía solar térmica, que aprovecha directamente el calor del sol. Este calor puede utilizarse para calentar agua, secar alimentos, climatizar espacios o activar ciertos sistemas de refrigeración.

Aquí aparece una idea que, al principio, puede sonar extraña: usar el calor del sol para producir frío. Pero no es una contradicción. Existen sistemas de refrigeración que pueden activarse mediante calor, como los de absorción o

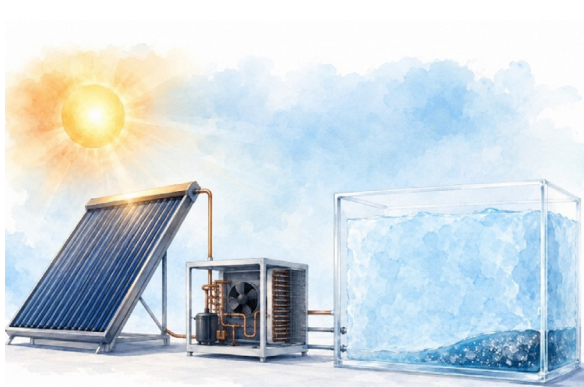
de adsorción. Estas tecnologías han sido estudiadas como rutas para aprovechar el calor solar en procesos de enfriamiento, aunque su desempeño depende en gran medida del diseño, del tipo de colector, de la temperatura disponible y de las condiciones de operación.

Esta posibilidad es muy importante al considerar tecnologías como

la desalación por congelación. Si para separar sales mediante hielo necesitamos frío, entonces una pregunta natural es si ese frío podría producirse aprovechando una fuente renovable, como la energía solar térmica. Esta conexión abre una línea de investigación muy interesante: unir agua salina, la congelación y el sol en un mismo sistema.

1.8 | ¿QUÉ ES LA DESALACIÓN?

Cuando se habla de desalación, a menudo se piensa en grandes plantas cerca del mar. La tecnología más conocida es la ósmosis inversa, que emplea membranas y presión para separar las sales. También existen procesos térmicos en los que el agua se evapora y luego se condensa. Ambos caminos han sido importantes y seguirán siéndolo.



Sin embargo, la desalación no es una única tecnología. Es un conjunto de procesos distintos que buscan reducir la salinidad del agua. Cada uno tiene ventajas, limitaciones y condiciones de aplicación.

La desalación por congelación es una alternativa menos conocida, pero muy interesante desde el punto de vista científico. Se basa en un fenómeno natural: cuando el agua salina se congela, los cristales de hielo tienden a formarse principalmente con moléculas de agua, mientras que muchas sales permanecen en la fase líquida. Si ese hielo se separa y se derrite, se puede obtener agua con menor salinidad. La literatura especializada la reconoce como una tecnología emergente con ventajas potenciales frente a procesos térmicos y de membrana, aunque aún enfrenta retos de madurez tecnológica, de pureza del hielo, de productividad y de escalamiento.

La idea parece simple, pero el proceso no lo es tanto. Para que funcione bien, se necesita controlar cómo se forma el hielo, cómo se mueve la sal, cómo se separa la salmuera y cómo se recupera el agua obtenida. También hay que analizar la energía necesaria para generar frío y la posibilidad de aprovechar energías renovables.

Aquí es donde la ciencia hace su trabajo: observa, mide, compara, modela y diseña. La desalación por congelación propone usar hielo para separar parte del agua de las sales, con la posibilidad de generar frío mediante energía solar.

1.9 | DEL CONOCIMIENTO AL DISEÑO

Una tecnología sostenible no surge de la noche a la mañana. Primero se estudia el fenómeno, luego se realizan experimentos, después se construyen modelos para entender lo que ocurre, más adelante se diseñan prototipos, se evalúa el consumo energético y se analiza la viabilidad de escalar el sistema.

En el caso de la desalación por congelación con energía solar, el camino requiere varias preguntas encadenadas. Primero: ¿cuánta agua con menor salinidad se desea obtener? Después: ¿Cuánto hielo debe producirse para lograrlo? A partir de ahí, se pueden estimar el frío necesario, el tamaño del equipo, el tipo de colector solar, el sistema de refrigeración, las condiciones climáticas adecuadas y la estrategia para manejar la salmuera.

Este orden es importante: no se empieza por escoger equipos al azar. Se parte de la necesidad y luego se diseña el sistema. Si no se hace así, se corre el riesgo de construir algo llamativo, pero poco útil. Muy bonito para la foto, muy malo para resolver el problema.

1.10 | AGUA Y ENERGÍA CON SENTIDO TERRITORIAL

Hablar de soluciones sostenibles también implica reconocer que cada territorio es distinto. No es lo mismo diseñar una tecnología para una ciudad con una buena infraestructura eléctrica que para una comunidad aislada. No es lo mismo tratar agua de mar que agua salobre. No es lo mismo operar un sistema en una zona templada que en una región con alta radiación solar y temperaturas elevadas.

Por eso, las tecnologías deben pensarse con sentido territorial. Una solución para agua y energía debe partir de preguntas concretas: ¿qué problema se quiere resolver?, ¿para quién?, ¿con qué recursos?, ¿en qué clima?, ¿con qué capacidades locales?, ¿a qué escala?

México tiene regiones con estrés hídrico, zonas costeras con disponibilidad de agua salina, comunidades rurales con acceso limitado a la infraestructura y un recurso solar abundante. Esto no significa que una sola tecnología resuelva todo. Pero sí significa que vale la pena explorar alternativas adaptadas a estas condiciones.

La desalación por congelación alimentada con energía solar térmica se ubica en esa frontera: no como una receta universal, sino como una línea de investigación que puede aportar conocimiento y abrir nuevas posibilidades tecnológicas.

1.11 | CIENCIA CERCANA PARA UN FUTURO MÁS JUSTO

La ciencia no debe quedarse solo en artículos especializados. También debe comunicarse de manera clara, sencilla y útil. Un estudiante, una comunidad, una autoridad local o una persona interesada en ecotecnologías tiene derecho a entender qué se investiga y por qué es importante.

Este libro nace con esa intención: explicar de forma accesible cómo se conectan el agua, la energía, la desalación, la congelación y la energía solar. No busca convertir al lector en especialista en termodinámica, transferencia de calor o tratamiento de agua. Busca algo igual de valioso: despertar la curiosidad, ordenar las ideas y mostrar que la ciencia puede contribuir a la construcción de soluciones sostenibles.

Los retos del agua y la energía no se resolverán con una sola tecnología ni con discursos optimistas. Se resolverán combinando conocimiento, diseño, responsabilidad ambiental, colaboración institucional y participación social. El futuro no se improvisa. Se estudia, se diseña y se construye. Y en ese camino, el agua, la energía y la ciencia deben ir juntas.



1.12 | PARA SEGUIR PENSANDO

Pensar en el agua sin energía es quedarse con la mitad del problema. Pensar en la energía sin agua también. Por eso, el nexo agua-energía se ha convertido en una de las claves para diseñar soluciones más inteligentes y sostenibles.

La desalación por congelación con energía solar térmica es un ejemplo de cómo la ciencia puede mirar fenómenos conocidos (el hielo, la sal, el sol) y convertirlos en preguntas tecnológicas de futuro. No se trata solo de obtener agua con menor salinidad; se trata de hacerlo con menor impacto, un mejor uso de la energía y posibilidades reales de adaptación a distintos contextos.

El desafío es grande, pero también lo es la oportunidad. Porque cuando el conocimiento se orienta a resolver problemas reales, la ciencia deja de ser una explicación del mundo y se convierte en una herramienta para transformarlo.

Lecturas recomendadas

UNESCO/ONU-Agua. (2024). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2024: agua para la prosperidad y la paz. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000391195>

Naciones Unidas. (s. f.). Objetivos de Desarrollo Sostenible: agua limpia y saneamiento. Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

EL NEXO AGUA-ENERGÍA: DOS CRISIS QUE NO PUEDEN SEPARARSE

*Belkis Sulbarán Rangel, José Armando Becerra Hernández,
Víctor Hugo Romero Arellano y Jesús Águila León*

2.1 | INTRODUCCIÓN

En los últimos años, debido al crecimiento de la población, la rápida urbanización, la industrialización y la expansión de las actividades productivas, la demanda de recursos hídricos y energéticos ha aumentado drásticamente. Este aumento ha sido responsable de desarrollos negativos como la mala calidad y disponibilidad del agua, el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y la creciente presión sobre la producción de alimentos y los ecosistemas naturales. Por lo tanto, es necesario idear planes para mitigar los efectos ambientales secundarios derivados del uso excesivo de estos recursos y avanzar hacia patrones de desarrollo más sostenibles. En este sentido, la idea del nexo agua-energía se ha vuelto prominente, enmarcada en la naturaleza interdependiente de los recursos hídricos y energéticos, de tal manera que las decisiones y solicitudes en uno de estos sectores impactan en el otro.

Se reconoce la energía necesaria para extraer, bombear, tratar, transportar y entregar agua, también en el tratamiento y reutilización del agua; y el agua como un elemento esencial para la extracción de combustible, la minería, la refrigeración de plantas térmicas, la generación hidroeléctrica y muchos otros procesos industriales necesarios para generar energía. Y así, cada uno es interdependiente, de modo que un cambio en uno de ellos puede tener un impacto en el otro en el medio ambiente, la economía y la sociedad. Tal nexo ha sido bien establecido en línea con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, especialmente con respecto al Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6, sobre agua limpia y saneamiento, y al ODS 7, sobre energía limpia y asequible. Sin embargo, las políticas públicas y los regímenes de gestión a menudo abordan estos objetivos por separado, cuando están inextricablemente vinculados, lo que conduce a una visión confusa e ineficiente de sus interrelaciones.

Además, el cambio climático, la sequía, la contaminación del agua y el creciente requerimiento energético están colocando el riesgo de seguridad de ambos sistemas en el extremo superior. Por ejemplo, una reducción en la disponibilidad de agua afecta la generación de electricidad y los procesos industriales, mientras que un aumento en

el consumo de energía ejerce presión adicional sobre los recursos hídricos y contribuye al calentamiento global. Estas complejas interacciones subrayan una demanda urgente de integrar enfoques que se centren en la evaluación simultánea del uso del agua, la energía y sus efectos ambientales.

En este contexto, las herramientas de inteligencia artificial y los métodos de optimización ofrecen nuevas posibilidades para entender mejor estas interacciones, especialmente cuando se requiere equilibrar objetivos que pueden entrar en conflicto, como reducir costos, disminuir emisiones, proteger el agua y garantizar el acceso equitativo a la energía y los servicios. En un esfuerzo por desentrañar la relación actual entre el agua y la energía, este documento explora no solo los impactos ambientales derivados del aumento de la demanda de los dos recursos, sino también las recomendaciones sobre cómo integrarlos. También evalúa hasta qué punto la solución incluye una visión integrada del nexo agua-energía y cuáles son las consecuencias si se descuida esta interdependencia.

2.2 | ¿POR QUÉ EL AGUA NECESITA ENERGÍA Y LA ENERGÍA NECESITA AGUA?

El agua y la energía mantienen una relación de dependencia mutua, esencial para el funcionamiento de las sociedades modernas. Por un lado, el agua es un recurso fundamental para la producción de energía. En las centrales termoeléctricas y nucleares, grandes volúmenes de agua se emplean tanto para generar vapor que acciona las turbinas como para los sistemas de enfriamiento. Asimismo, la generación hidroeléctrica depende directamente de la disponibilidad y del caudal del agua en ríos y embalses. Incluso otras fuentes energéticas requieren agua en diferentes etapas de producción; por ejemplo, la extracción de petróleo, gas natural, carbón y uranio demanda procesos de perforación, refinación, lavado y enfriamiento que consumen grandes cantidades de agua.

Por otro lado, el suministro de agua también depende en gran medida de la energía. Actividades como la extracción de agua subterránea, el bombeo, el tratamiento, la distribución y el reúso requieren electricidad y combustibles para su funcionamiento. De igual forma, tecnologías como la desalinización y el tratamiento avanzado de aguas residuales son particularmente intensivas en energía debido a los procesos térmicos y de filtración implicados. En regiones con escasez hídrica, donde el agua debe transportarse largas distancias o elevarse a grandes alturas, el consumo energético asociado puede incrementarse considerablemente.

Las interacciones entre el agua y la energía también generan impactos ambientales significativos. El aumento

de la demanda de agua potable impulsa la construcción de nuevas infraestructuras de bombeo, tratamiento y desalinización, que requieren cantidades cada vez mayores de energía. A su vez, cuando esta energía proviene principalmente de combustibles fósiles, aumentan las emisiones de gases de efecto invernadero y se intensifican fenómenos como el calentamiento global y el cambio climático. Paradójicamente, algunas estrategias diseñadas para resolver problemas hídricos o energéticos pueden generar nuevos impactos si se implementan de forma aislada. Por ejemplo, ciertas tecnologías de generación de energía reducen las emisiones de carbono,

pero aumentan considerablemente el consumo de agua, mientras que algunas soluciones para enfrentar la escasez hídrica, como la desalinización, incrementan significativamente la demanda de energía.

Por ello, comprender el nexo agua-energía no solo implica reconocer la relación entre ambos recursos, sino también entender que las soluciones sostenibles requieren enfoques integrales capaces de equilibrar simultáneamente las necesidades de agua, energía y alimentos sin comprometer los ecosistemas ni agravar el cambio climático.



2.3 | ¿QUÉ PASA CUANDO SE IGNORA EL NEXO AGUA-ENERGÍA?

Durante generaciones, el agua y la energía se trataron como sectores separados. Las políticas públicas relacionadas con el suministro de agua, la generación de electricidad, la agricultura o el desarrollo urbano se diseñaban típicamente de manera independiente, a menudo ignorando que el agua y la energía, así como los sistemas de agua y de generación de energía, están interconectados. No reconocer esta conexión ha tenido muchos costos ambientales, económicos y sociales, muchos de los cuales hemos comenzado a ver con mayor claridad en el siglo XXI. Uno de los principales problemas de esta visión fragmentada es que la respuesta a una crisis suele derivar en la exacerbación de otro problema. Por ejemplo, el desarrollo de la desalinización de agua de mar en muchos países para aliviar la escasez de agua en áreas costeras.

Aunque esta tecnología hace que el agua potable sea mucho más accesible, requiere enormes cantidades de electricidad para funcionar. Lo cual, cuando esta energía proviene de combustibles fósiles, conduce a niveles más altos de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que incrementa la contribución al cambio climático. Irónicamente, las sequías y la escasez de agua, agravadas por el cambio climático, exacerban el problema que se creía resuelto.

Un destino similar se observa en el sector energético. Algunas tecnologías de generación eléctrica pueden reducir significativamente las emisiones de carbono. Sin embargo, aumentan significativamente el consumo de agua. Las plantas de energía termoeléctrica y nuclear, por ejemplo, dependen completamente de fuentes de agua para su enfriamiento. En regiones con estrés hídrico, esto puede generar una competencia por el agua entre el suministro urbano, la agricultura y la producción de energía. Se ha observado una reducción de la energía disponible para la producción de electricidad durante sequías prolongadas o periodos de calor extremo, lo que impide que el enfriamiento por agua alcance su capacidad en cualquier país, como se ha visto en muchos otros. Las políticas desconectadas también generan efectos menos obvios, pero igualmente significativos.

El consumo de energía aumenta significativamente cuando una ciudad bombea más agua para satisfacer la demanda urbana de agua potable en su subsuelo. Así, los aumentos en los requisitos de electricidad implican una mayor generación de electricidad y, en muchos casos, un mayor consumo de agua. Esto establece un ciclo de retroalimentación negativa en el que intentar resolver un problema impone nuevas presiones sobre el otro recurso. En consecuencia, existe un consenso

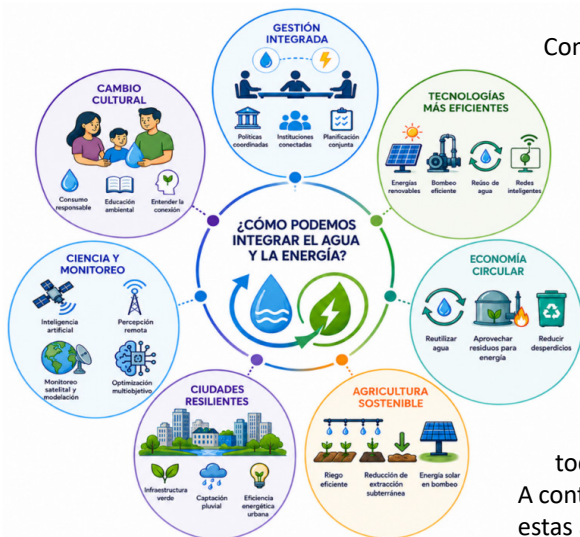
creciente en torno a la necesidad de una gestión integrada del nexo agua-energía. Esto significa elaborar políticas, tecnología e infraestructura que tengan en cuenta no solo los recursos, sino también cómo interactúan con los alimentos, el clima y los ecosistemas.

El desafío no es buscar soluciones de manera aislada, sino apreciar que el agua y la energía son partes conectadas

del mismo sistema, en el que las decisiones en uno de esos sectores afectarán al otro. Si podemos aceptarlo, ya no se puede simplemente descartar el nexo agua-energía como un mero fallo técnico para proteger a las sociedades futuras en medio del aumento de la población, la creciente urbanización y el cambio climático.

2.4 | ¿CÓMO PODEMOS INTEGRAR EL AGUA Y LA ENERGÍA?

Frente a los desafíos ambientales y sociales actuales, integrar la gestión del agua y la energía ya no es una opción, sino una necesidad. El crecimiento poblacional, el cambio climático y la creciente demanda de recursos han demostrado que ambos sistemas están profundamente conectados y que las decisiones tomadas en uno repercuten inevitablemente en el otro. Por ello, avanzar hacia un modelo sostenible requiere abandonar la visión tradicional fragmentada y adoptar enfoques integrales que consideren simultáneamente el uso del agua y de la energía, así como sus impactos en los ecosistemas y en la sociedad.



Como se observa en la figura anterior, la integración puede enfocarse en la gestión integral, en contar con tecnologías más eficientes y sostenibles, en la economía circular con el aprovechamiento de los recursos, en la agricultura sostenible y en el uso eficiente del agua, en ciudades resilientes y sostenibles, y en la ciencia, el monitoreo y nuevas herramientas tecnológicas, todo dentro de un cambio cultural. A continuación, explicamos cada una de estas acciones:

- 🌀 Gestión integrada: pensar los recursos como un solo sistema: Uno de los principales retos consiste en mejorar la coordinación entre sectores que históricamente han trabajado de manera separada. En muchos países, las políticas de agua, energía, agricultura y desarrollo urbano son diseñadas por instituciones distintas, con objetivos independientes e incluso contradictorios. Integrar el nexo agua-energía implica promover políticas coordinadas, instituciones conectadas y procesos de planificación conjunta capaces de evaluar los efectos cruzados entre ambos recursos. Esto significa, por ejemplo, que antes de construir una nueva planta energética o una gran infraestructura hidráulica se analicen simultáneamente aspectos como el consumo de agua, la demanda energética, las emisiones de carbono y los posibles impactos ambientales y sociales.
- 🌀 Tecnologías más eficientes y sostenibles: La innovación tecnológica también desempeña un papel fundamental para reducir la presión sobre ambos recursos. En el sector hídrico, el uso de sistemas de bombeo eficientes, redes inteligentes y tecnologías de tratamiento de agua de menor consumo energético puede reducir considerablemente la demanda eléctrica. Asimismo, el reúso de aguas residuales y el tratamiento avanzado permiten reducir la extracción de agua dulce y aumentar la disponibilidad del recurso. Por otro lado, las energías renovables representan una alternativa importante para reducir las emisiones asociadas al suministro de agua. La energía solar y eólica, por ejemplo, suelen requerir menos agua que las centrales termoeléctricas convencionales. Además, la incorporación de energías renovables en sistemas de bombeo, desalinización y tratamiento de agua puede contribuir a reducir la dependencia de los combustibles fósiles.
- 🌀 Economía circular: aprovechar mejor los recursos. Otro enfoque clave es la economía circular, basada en reducir desperdicios y reutilizar recursos en los sistemas productivos. En lugar de considerar las aguas residuales y los residuos orgánicos como desechos, pueden transformarse en nuevas fuentes de agua y energía. Por ejemplo, las plantas de tratamiento pueden reutilizar el agua para riego o para procesos industriales, mientras que los lodos y residuos orgánicos pueden aprovecharse para producir biogás y generar electricidad. Este tipo de estrategias permite disminuir simultáneamente el consumo de agua, la demanda energética y la contaminación ambiental.
- 🌀 Agricultura sostenible y uso eficiente del agua: La agricultura es uno de los sectores con mayor consumo de agua y de energía a nivel mundial. Por ello, mejorar la eficiencia en este sector es fundamental para reducir la presión sobre ambos recursos. Tecnologías como el riego por goteo, los sistemas automatizados y el monitoreo de la humedad del suelo permiten optimizar el uso del agua y reducir el

consumo energético asociado al bombeo. Asimismo, el uso de la energía solar para alimentar sistemas de riego puede reducir costos y emisiones, especialmente en comunidades rurales. De igual forma, limitar la sobreexplotación de los acuíferos y promover prácticas agrícolas sostenibles contribuyen a preservar la disponibilidad de agua para futuras generaciones.

- 
Ciudades resilientes y sostenibles: Las ciudades del futuro deberán diseñarse considerando la relación entre el agua, la energía y el cambio climático. La incorporación de infraestructura verde, sistemas de captación de agua de lluvia, reutilización de aguas grises y edificaciones energéticamente eficientes puede reducir significativamente la demanda de ambos recursos. Además, las ciudades resilientes buscan minimizar las pérdidas de agua en las redes de distribución, optimizar el consumo energético urbano y adaptarse a fenómenos extremos como sequías, inundaciones y olas de calor, cada vez más frecuentes debido al cambio climático.
- 
Ciencia, monitoreo y nuevas herramientas tecnológicas: La ciencia y la tecnología son fundamentales para comprender y gestionar el nexo agua-energía. Este nexo no se limita al equilibrio entre estos dos recursos, sino que se manifiesta de manera especialmente compleja en su operación cotidiana en las comunidades humanas. Actualmente, herramientas como sensores ambientales, inteligencia artificial, percepción remota y monitoreo satelital permiten analizar en tiempo real variables relacionadas con la disponibilidad de agua, el consumo energético, la calidad del agua y los efectos del cambio climático.

En las grandes ciudades, una fracción considerable de la energía eléctrica se destina a mover, tratar y distribuir el agua que llega a los hogares, mientras que el agua, además, es un derecho que debe garantizarse con calidad y equidad. A esta tensión se suma un factor cada vez más determinante en plena era de la inteligencia artificial: la proliferación de centros de datos, que demandan simultáneamente grandes cantidades de energía y de agua para su enfriamiento.

Gestionar este sistema implica perseguir simultáneamente objetivos

que, en apariencia, se contraponen, como minimizar los costos y las emisiones de CO₂ asociadas al transporte del agua, maximizar la cobertura y el confort, y mantener la calidad y la presión del suministro de agua y de energía dentro de los niveles establecidos. Todo esto se encuentra, además, sujeto a restricciones que no pueden vulnerarse, como garantizar el abasto a hogares, servicios básicos, agricultura e infraestructura digital, sin comprometer la estabilidad energética de las demás actividades. Esto es, en términos computacionales, lo que se conoce

como un problema de optimización multiobjetivo: la búsqueda de la mejor solución cuando no existe un punto de equilibrio evidente que permita mejorar un objetivo sin perjudicar a otro. Para enfrentar problemas tan complejos como la interrelación agua-energía, las técnicas de inteligencia artificial basadas en algoritmos inspirados en la naturaleza ofrecen una alternativa muy poderosa.

Estos algoritmos imitan procesos como la cruza y la mutación genética de especies animales y vegetales, que generan descendencia cada vez más apta al entorno, o los comportamientos colectivos de las aves que vuelan en parvada y las manadas de lobos guiadas por un individuo alfa. Tales conductas se traducen en ecuaciones que, mediante iteraciones sucesivas, convergen de manera inteligente hacia mejores soluciones. Este tipo de herramientas inteligentes basadas en la naturaleza contribuye a materializar la gestión integrada agua-energía, pues permite evaluar de manera simultánea los efectos cruzados entre este nexo, las emisiones contaminantes y la equidad, en lugar de optimizar un sector ignorando sus consecuencias sobre los demás. En otras palabras, permite buscar un equilibrio más amplio entre el agua, la energía, el medio ambiente y la sociedad.

Conviene, sin embargo, señalar una limitación: el poder de cómputo requerido puede resultar prohibitivo en problemas de gran escala, por lo que la mejora de estos algoritmos para hacerlos viables en tiempo real constituye hoy una línea de investigación activa.

Las soluciones tecnológicas por sí solas no serán suficientes. Integrar el agua y la energía también requiere un cambio cultural y social. Esto implica promover el consumo responsable, fortalecer la educación ambiental y comprender que las acciones cotidianas aparentemente simples, como abrir una llave o encender una luz, están conectadas entre sí y tienen impactos ambientales. Es importante señalar que, como humanidad, nos enfrentamos ahora a un punto de inflexión en el cambio cultural, impulsado por el uso cada vez más extendido de la IA en diversos ámbitos, lo que está llevando a una transformación social sin precedentes. Somos la primera generación de la humanidad que puede “hablar” con el conocimiento generado a lo largo de los siglos, que se nos presenta de manera dinámica y con capacidad para generar “nuevos” contenidos, en una retroalimentación humano-IA sin precedentes. Este cambio cultural tiene una afectación directa en la dinámica social y en el uso intensivo de agua y de energía.

2.5 | CONCLUSIÓN

El cambio hacia modelos más sostenibles dependerá no solo de los gobiernos e industrias, sino también de la participación activa de la sociedad. Reconocer la interconexión entre el agua y la energía nos permite ver que el bienestar humano, el desarrollo económico y la protección ambiental dependen de nuestra capacidad para gestionar ambos recursos de manera conjunta.

En el ámbito del uso cada vez más extenso de la IA, está en nuestras manos hacer uso responsable de esta nueva herramienta, de este nuevo tipo de inteligencia, no humana, que puede ayudarnos a solucionar grandes problemas ambientales como la gestión eficiente e interrelacionada del agua y la energía; o, en el peor de los casos, hacer un uso irresponsable de la misma sirviendo a intereses de unos pocos, no haciendo más que aumentar la brecha entre los más favorecidos y los menos, y no solucionar los problemas verdaderos de la humanidad en beneficio común. En nuestras manos está no solo gestionar el uso del agua y la energía en nuestro entorno inmediato a través de pequeñas acciones, sino también alzar la voz y ser proactivos en el uso democrático, ético y benigno de las inteligencias artificiales, que consumen cada vez más agua y energía. Vivimos en un mundo cada vez más afectado por el cambio climático y la presión sobre los recursos naturales, integrar el agua y la energía representa una de las estrategias más importantes para construir sociedades más resilientes, sostenibles y equitativas.

Lecturas recomendadas

Sulbarán-Rangel, B., Guzmán González, C. A., & Romero Arellano, V. H. (2022). El nexo agua-energía y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. En *Nexo agua y energía en la implementación de los Objetivos del Desarrollo Sostenible: experiencias en Latinoamérica*. Universidad de Guadalajara. https://posgrado.utn.edu.ec/wp-content/uploads/2022/06/Nexo-Agua-y-Energia-Libro-Electronico-0_.pdf

CEPAL. (2023). *Nexo Agua, Energía y Alimentación*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://www.cepal.org/es/proyectos/nexo-agua-energia-alimentacion>

Embid, A., & Martín, L. (2017). *El nexo entre el agua, la energía y la alimentación en América Latina y el Caribe: planificación, marco normativo e identificación de interconexiones prioritarias*. CEPAL.

DESALACIÓN: CONVERTIR AGUA SALINA EN AGUA ÚTIL

*Roxana Berenice Recio Colmenares,
Carolina Livier Recio Colmenares y
César Alejandro García García*

3.1 | UN PLANETA AZUL, PERO NO SIEMPRE DISPONIBLE

Desde el espacio, la Tierra parece un planeta abundante en agua. La imagen es clara y poderosa: océanos extensos, nubes, ríos, lagos y lluvia. Sin embargo, esa abundancia visual puede llevar a una idea errónea. La mayor parte del agua del planeta es salina y se encuentra en los océanos; solo una pequeña fracción corresponde a agua dulce, y no toda está disponible de manera directa para el consumo humano, la agricultura, la industria o la conservación de los ecosistemas. De acuerdo con el Servicio Geológico de Estados Unidos, cerca del 71 % de la superficie terrestre está cubierta por agua y los océanos contienen alrededor del 96,5 % del agua del planeta.

Esta paradoja permite entender por qué el agua se ha convertido en uno de los temas centrales de la sostenibilidad. El problema no es solamente cuánta agua existe, sino dónde se encuentra,

qué calidad tiene, cuánta energía se requiere para aprovecharla y en qué condiciones puede llegar a las personas. La disponibilidad de agua segura no depende únicamente de la naturaleza; también está relacionada con la infraestructura, la gestión pública, la tecnología, la energía, la economía y la justicia social.

En este escenario, la desalación surge como una alternativa tecnológica para ampliar las fuentes de agua útil. Su idea central parece sencilla: tomar agua con sales disueltas y reducir su salinidad hasta obtener agua apta para ciertos usos. No obstante, detrás de esa explicación breve hay procesos físicos, consumo de energía, infraestructura, costos, mantenimiento y decisiones ambientales que deben analizarse con cuidado. Desalar agua no es una solución mágica ni sustituye la necesidad de cuidar ríos, acuíferos, redes de distribución y hábitos de consumo. Puede ser una herramienta valiosa, pero su verdadero sentido se revela cuando se integra a una estrategia más amplia de ahorro, reúso, eficiencia energética, planeación territorial y protección ambiental.

3.2 | ¿QUÉ SIGNIFICA DESALAR AGUA?

Desalar significa retirar o reducir una parte importante de las sales disueltas en el agua. Aunque en la vida cotidiana solemos asociar la sal con el cloruro de sodio que usamos en la cocina, el agua salina es una mezcla de sustancias minerales, como el sodio, el cloruro, el calcio, el magnesio,

el potasio y los sulfatos. Estas sustancias no siempre se ven, pero están presentes en el agua y pueden modificar su sabor, su comportamiento químico y sus posibles usos. Cuando el agua contiene demasiadas sales, su aprovechamiento se vuelve limitado, ya que puede resultar inadecuada para el consumo humano, afectar cultivos sensibles, provocar incrustaciones en tuberías y equipos, alterar procesos industriales o requerir tratamientos adicionales antes de su uso.

La desalación busca separar una parte de esas sales para obtener una corriente de agua con menor salinidad. El agua tratada puede destinarse al consumo humano, al riego, a procesos industriales o a servicios, siempre que cumpla con

los criterios de calidad aplicables. Para uso potable, no basta con reducir las sales; también se requiere controlar los riesgos microbiológicos, químicos y operativos.

Una forma sencilla de imaginarlo es pensar en un vaso con agua y sal. Aunque la sal ya no se vea, sigue ahí. No puede retirarse con una cuchara porque está disuelta en el líquido. La desalación trabaja precisamente con ese desafío: separar algo que está mezclado a una escala que no distinguimos a simple vista. Algunas tecnologías usan membranas, otras calor, otras electricidad y otras frío. Todas buscan el mismo propósito general, aunque cada una lo hace por un camino distinto.

3.3 | AGUA DE MAR, AGUA SALOBRE Y SALMUERA: NO TODO ES “AGUA SALADA”

Para comprender la desalación conviene distinguir tres conceptos que suelen confundirse: agua de mar, agua salobre y salmuera. Esta diferencia no es solo de nombre; también influye en la tecnología que puede utilizarse, en la energía necesaria y en el manejo ambiental del proceso. Aunque los tres términos se relacionan con la presencia de sales, no significan lo mismo.

Diferencias entre agua de mar, agua salobre y salmuera

Tres conceptos relacionados, pero no equivalentes



El agua de mar tiene una alta concentración de sales. Su composición varía según la región, la evaporación, la aportación de ríos, las corrientes marinas y otras condiciones locales, pero, en términos generales, se reconoce como una fuente de salinidad elevada. Por esa razón, no puede beberse directamente ni utilizarse sin tratamiento en la mayoría de los usos agrícolas, urbanos o industriales.

Por otro lado, el agua salobre tiene menos sales que el agua de mar, pero más que el agua dulce. Puede encontrarse en acuíferos, lagunas costeras, estuarios o zonas áridas donde la evaporación concentra minerales en el suelo y en el agua subterránea. En muchas regiones, el agua salobre representa una fuente potencial porque requiere menos esfuerzo de separación que el agua de mar, aunque sigue necesitando tratamiento antes de su uso.

En desalación, se denomina salmuera a la corriente residual que queda tras obtener agua con menor salinidad. Es decir, el proceso produce dos corrientes: una con menos sales, que puede aprovecharse, y otra más concentrada, en la que se acumulan las sales separadas. Esta salmuera puede contener, además de sales, algunos compuestos asociados al tratamiento, según la tecnología empleada y la calidad del agua de entrada.

3.4 | ¿CÓMO SE PUEDE SEPARAR LA SAL DEL AGUA?

Existen distintas tecnologías de desalación. Algunas se basan en membranas, otras en cambios de temperatura y otras en el movimiento de partículas cargadas. No existe una tecnología ideal para todos los casos; la elección depende del tipo de agua, la cantidad de sales, el uso final, la escala del sistema, el costo de la energía, la capacidad de operación y la forma en que se gestionará la salmuera.

La ósmosis inversa es una de las tecnologías más utilizadas a nivel mundial. Emplea membranas que permiten el paso del agua con mayor facilidad que el de muchas sales disueltas. Para lograrlo, se aplica una alta presión al agua salina, de modo que una parte del agua “atraviese” la membrana y deja atrás una corriente más concentrada. Aunque a veces se compara con un filtro, la imagen debe tomarse con cuidado: no se trata de un colador común, sino de una separación a escala molecular muy pequeña.

La destilación y otros procesos térmicos aprovechan el cambio de fase del agua. En términos sencillos, el agua se evapora con calor y luego se condensa. El principio se parece al ciclo natural del agua: el Sol evapora agua del océano, el vapor forma nubes y luego cae la lluvia con un menor contenido de sales. En una planta de desalación térmica, ese fenómeno se reproduce de forma controlada. Estos procesos producen agua de excelente calidad, pero evaporarla requiere enormes cantidades de energía, por lo que su viabilidad depende de cómo se obtenga y aproveche el calor (por ejemplo, mediante cogeneración industrial).

La electrodiálisis utiliza electricidad y membranas especiales para mover iones, es decir, partículas con carga eléctrica. Si la ósmosis inversa puede imaginarse como un proceso que empuja el agua a través de una membrana, la electrodiálisis puede entenderse como

una forma de dirigir las sales disueltas hacia determinados compartimentos mediante la electricidad. Esta tecnología suele ser atractiva para aguas salobres, en las que la concentración de sales es menor que en el agua de mar.

La desalación por congelación se basa en un fenómeno físico interesante: cuando el agua salina se congela, los cristales de hielo tienden a formarse con un menor contenido de sales, mientras que las sales se concentran en la parte líquida restante. Después, esos cristales pueden separarse, lavarse y fundirse para obtener agua con menor salinidad. Su principio resulta atractivo porque no busca evaporar el agua ni forzarla necesariamente a través de membranas; aprovecha cómo el agua cambia de estado al congelarse.

Este enfoque cobra especial interés cuando se piensa en sistemas de bajo consumo energético o en esquemas acoplados a fuentes renovables. En regiones con alta radiación solar, por

ejemplo, puede explorarse la integración de la desalación por congelación con tecnologías de refrigeración solar, aprovechando el frío disponible o mediante sistemas híbridos que reduzcan la dependencia de la energía convencional. No se trata de presentarla como una respuesta inmediata a todos los escenarios, sino como una línea de investigación prometedora para la búsqueda de alternativas más eficientes y ambientalmente responsables. También existen procesos emergentes e híbridos, como la destilación por membranas, la ósmosis directa y la deionización capacitiva. Estas alternativas muestran que la desalación sigue siendo un campo de innovación activo. Más que buscar una única respuesta universal, la tendencia es diseñar soluciones ajustadas al contexto local. Para visualizar de manera integrada el proceso, la siguiente figura resume el esquema básico de la desalación sostenible, desde la fuente de agua salina hasta la obtención de agua con menor salinidad y el manejo responsable de la salmuera.



3.5 | EL RETO ENERGÉTICO: SEPARAR TAMBIÉN CUESTA

La desalación está estrechamente ligada a la energía. Separar las sales del agua requiere presión, calor, electricidad o frío, según la tecnología empleada. Las sales no se depositan fácilmente ni pueden retirarse por simple gravedad o filtración básica; están íntimamente disueltas y distribuidas en el agua, y separarlas implica vencer una fuerte resistencia física y termodinámica.

El consumo energético depende de varios factores. No es lo mismo tratar agua salobre que agua de mar; cuanto mayor sea la concentración de sales, mayores serán el esfuerzo y la presión requeridos para la separación. Tampoco todas las tecnologías demandan el mismo tipo de energía: la ósmosis inversa utiliza principalmente energía eléctrica para presurizar el agua mediante bombas de alta presión; los procesos térmicos requieren calor; la congelación necesita extraer calor (frío); y la electrodiálisis emplea electricidad directa para mover los iones.

Esta relación muestra con claridad el nexo agua-energía: necesitamos energía para captar, bombear, tratar y distribuir agua; al mismo tiempo, muchas formas de producir energía requieren agua. En desalación, esa relación se vuelve directa: cada metro cúbico de agua tratada tiene detrás una demanda energética fija e ineludible. Reducir este consumo es una de las grandes líneas de innovación a nivel mundial, que se busca mediante membranas mejoradas, sistemas de recuperación de energía, la integración con el calor residual industrial y el acoplamiento directo con la energía solar.

3.6 | LA SALMUERA Y LOS LÍMITES AMBIENTALES DEL PROCESO

Existe un equívoco generalizado en la percepción pública, que asume que los procesos de desalación eliminan los solutos a escala global. En términos estrictamente termodinámicos, estas tecnologías operan únicamente como mecanismos de separación y de concentración molecular. Mientras que el agua tratada experimenta una reducción drástica de su concentración salina, la corriente de rechazo, denominada salmuera, retiene y aumenta exponencialmente la carga de sólidos disueltos. Por consiguiente, la viabilidad de cualquier proyecto de desalación está supeditada a la incorporación de una estrategia explícita y sistémica para la gestión de este residuo desde las etapas preliminares de diseño ingenieril.

La disposición inadecuada o la falta de planificación de la salmuera conlleva implicaciones ecológicas de gravedad severa. En los ecosistemas litorales, un vertido deficiente puede inducir concentraciones atípicas y localizadas de salinidad en el área de influencia del emisario, puede alterar el equilibrio osmótico de organismos sensibles,

como algunas plantas marinas, peces e invertebrados del fondo marino. Por otra parte, en emplazamientos continentales o de interior, el desafío adquiere una complejidad técnico-ambiental superior debido a la ausencia de un sumidero marino natural; bajo estas condiciones, una disposición confinada incorrecta puede desencadenar procesos de lixiviación e infiltración en los perfiles edáficos, degradando irreversiblemente el potencial agronómico del suelo y salinizando los acuíferos de agua dulce subyacentes.

Las alternativas tecnológicas para la mitigación y manejo de estas corrientes residuales se determinan en función de la escala operativa y la ubicación geográfica del sistema. En entornos costeros, predomina el uso de descargas controladas mediante sistemas de difusores marinos de alta eficiencia, que aprovechan la hidrodinámica de las corrientes locales para acelerar la dilución y la dispersión del efluente. Por el contrario, en las regiones continentales se emplean habitualmente técnicas de aislamiento físico, como las balsas de evaporación solar o la inyección en pozos profundos debidamente confinados.

Las tendencias de investigación actuales se orientan hacia la reutilización de este residuo mediante la denominada minería de salmuera. Esta busca transformar la corriente de rechazo en una fuente secundaria de materias primas mediante la recuperación selectiva de minerales de alto valor estratégico e industrial, como el magnesio, el calcio y el litio.

3.7 | HACIA UNA DESALACIÓN SOSTENIBLE

La conceptualización de una desalación sostenible requiere una visión integral que trascienda la mera producción de agua. En primer lugar, el principio de pertinencia local exige que la selección tecnológica se ajuste estrictamente a las capacidades operativas y a las realidades socioeconómicas de cada territorio, evitando soluciones estandarizadas. En segundo lugar, la eficiencia energética requiere la reducción sistemática del consumo por unidad de volumen y la implementación de dispositivos avanzados de recuperación de energía. Como tercer eje, el diseño de ingeniería debe incorporar un modelo de gestión ambiental integrado desde sus etapas preliminares, para mitigar el impacto en los sistemas de captación y planificar el destino de las corrientes de rechazo. Finalmente, es crítica la convergencia con las energías renovables, una sinergia de alto valor en regiones áridas donde la elevada irradiancia solar permite desvincular el suministro hídrico de los combustibles fósiles.

Si bien la desalación es un recurso clave para la resiliencia hídrica, su potencial se maximiza únicamente al integrarse en una política hídrica integral que reconozca el agua como un bien finito y el medio ambiente como la condición indispensable para la sostenibilidad a largo plazo. La frontera del conocimiento ya no reside en el mecanismo técnico de separación, sino en la gobernanza eficiente y equitativa de dicho proceso.

Lecturas recomendadas

Vicuña, S., Daniele, L., Farías, L., González, H., Marquet, P. A., Palma-Behnke, R., Stehr, A., Urquiza, A., Wagemann, E., Arenas-Herrera, M. J., Bórquez, R., Cornejo-Ponce, L., Delgado, V., Etcheberry, G., Fragkou, M. C., Fuster, R., Gelcich, S., Melo, O., Monsalve, T., Winckler, P. (2022). Desalinización: Oportunidades y desafíos para abordar la inseguridad hídrica en Chile. Comité Asesor Ministerial Científico sobre Cambio Climático; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. <https://repositoriodirplan.mop.gob.cl/biblioteca/handle/20.500.12140/206243>

UNESCO. (2014). Desalación de agua de mar mediante sistema de ósmosis inversa y energía fotovoltaica para provisión de agua potable en Isla Damas, Región de Coquimbo. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000230987>

DESALACIÓN POR CONGELACIÓN: SEPARAR LA SAL USANDO HIELO

*Beatriz Castillo Téllez, Gerardo Alberto Mejía Pérez y
Carlos Javier Hernández Estrella*

4.1 | CUANDO EL HIELO AYUDA A SEPARAR

Cuando pensamos en hielo, normalmente imaginamos cubos en una bebida, alimentos congelados o escarcha en una superficie fría. Pero el hielo también puede verse de otra manera: como una herramienta para separar el agua de ciertas sustancias disueltas.

La desalación por congelación parte de una idea sencilla: cuando el agua salina empieza a congelarse, los cristales de hielo se forman principalmente a partir de moléculas de agua. Las sales disueltas no entran con la misma facilidad en esa estructura, por lo que tienden a quedar en la fase líquida que aún no se congela. Esa parte líquida, ahora más concentrada en sales, se conoce como salmuera.



Dicho de forma simple: al congelarse el agua salada, el hielo puede quedar con menos sal que el agua original, mientras que la sal se concentra en el líquido restante. Si ese hielo se separa de la salmuera y luego se funde, se puede obtener agua con un menor contenido de sales.

Sin embargo, conviene aclarar que no basta con meter agua salada en el congelador para obtener agua potable. La congelación ayuda, pero requiere ciertas consideraciones. Para que funcione como proceso de desalación, hay que controlar cómo se forma el hielo, cuánto tiempo tarda en formarse, cuánta sal queda atrapada y cómo se separa la salmuera.

4.2 | ¿QUÉ OCURRE AL CONGELAR EL AGUA SALINA?

El agua pura se congela cuando su temperatura desciende lo suficiente. En el agua salina, el proceso es más complejo porque las sales modifican la forma en que se produce la congelación.

Normalmente, el hielo empieza a formarse en la zona más fría y avanza poco a poco. En esa zona de avance, el agua se incorpora al hielo y buena parte de las sales permanece en el líquido. A medida que se forma más hielo, el líquido restante se vuelve cada vez más salino.

Ahí está la base del proceso: una fase sólida, el hielo, con menor cantidad de sales, y una fase líquida, la salmuera, con mayor concentración de sales.



El problema es que esta separación no siempre es perfecta. Si el hielo crece muy rápido, puede atrapar pequeñas porciones de salmuera. Si el enfriamiento no es uniforme, pueden formarse zonas con concentraciones de sal distintas. Y si el hielo no se separa bien del líquido concentrado, el agua recuperada puede conservar demasiadas sales.

Por eso, en la desalación por congelación no se trata solo de formar hielo, sino de que este sea útil para separar las sales.

4.3 | LAS ETAPAS BÁSICAS DEL PROCESO

Aunque existen diferentes formas de aplicar esta tecnología, el proceso puede explicarse en cinco pasos sencillos.

1. Primero, se parte del agua salina. Puede ser agua de mar, agua salobre o una solución preparada en el laboratorio.
2. Se enfría el agua. Al bajar la temperatura, se retira calor de la solución y comienza la formación de hielo.
3. Al formarse el hielo, las sales tienden a concentrarse en la parte líquida restante. Esta es la etapa central de la separación.
4. Se separa el hielo de la salmuera. Este paso es muy importante, porque si el hielo queda en contacto con la salmuera puede contaminarse nuevamente.
5. El hielo se funde. El agua obtenida puede contener menos sales que la solución inicial. Dependiendo del uso final, podría requerir otros tratamientos para garantizar su calidad.



Esto último es importante: la desalación no siempre implica obtener agua potable directamente. La potabilidad depende también de los microorganismos, de la materia orgánica, de los metales, de los contaminantes químicos y de las normas de calidad del agua.

4.4 | ¿QUÉ SE DEBE CONTROLAR?

La desalación por congelación depende de varios factores. Uno de los más importantes es la velocidad de congelación. Si el hielo se forma demasiado rápido, puede atrapar salmuera. Si se forma demasiado lentamente, el proceso puede tardar mucho y consumir más energía.

También importa la temperatura, ya que no solo debe enfriarse lo más posible, sino también de forma controlada. Un enfriamiento brusco o mal distribuido puede generar hielo irregular y una separación menos eficiente.

La forma del recipiente o del sistema también influye, ya que no es lo mismo congelar en una charola plana, en un cilindro o en un equipo con circulación de líquido. La geometría afecta a cómo avanza el hielo y a cómo se concentra la salmuera.

Además, la concentración inicial de sales modifica el comportamiento del proceso, por ejemplo, el agua ligeramente salobre no se congela igual que el agua de mar.

Finalmente, está la separación física. Una vez formado el hielo, hay que retirarlo correctamente de la salmuera. Si se hace mal, parte de la sal puede quedar adherida o atrapada.

4.5 | VENTAJAS Y POSIBILIDADES

La desalación por congelación resulta interesante porque ofrece una alternativa a las tecnologías más conocidas. No se basa en presurizar el agua a través de una membrana, como en la ósmosis inversa, ni en evaporarla mediante calor, como en la destilación. Su principio consiste en aprovechar el cambio de fase del agua: del líquido al sólido.



Una ventaja potencial es que podría reducir algunos problemas asociados a las membranas, como incrustaciones, ensuciamiento o la necesidad de altas presiones. También puede pensarse en sistemas modulares o de pequeña escala, útiles en contextos en los que no tendría sentido instalar grandes plantas desaladoras.

Otra posibilidad interesante es su relación con la refrigeración solar. Como la desalación por congelación requiere frío, surge una pregunta importante: ¿podría

producirse ese frío mediante sistemas alimentados con energía solar? Esta idea conecta la desalación por congelación con los capítulos siguientes sobre energía solar térmica y refrigeración solar.

Pero hay que mantener los pies en la tierra: el hecho de que una tecnología sea prometedora no significa que ya esté lista para resolver todos los problemas. Se necesita demostrar su eficiencia energética, la calidad del agua obtenida, su estabilidad operativa, su costo y su facilidad de mantenimiento.

4.6 | RETOS PRINCIPALES

Uno de los mayores retos es evitar que la sal quede atrapada en el hielo. Aunque el principio indica que el hielo tiende a rechazar las sales, en condiciones reales parte de la salmuera puede quedar retenida entre los cristales o adherida a la superficie.

Otro reto es la energía, ya que congelar agua requiere extraer calor y producir frío tiene un costo. Por eso, la pregunta no es solo si se puede desalar por congelación, sino si se puede hacer con un consumo razonable.



También está el manejo de la salmuera. Toda tecnología de desalación genera una corriente concentrada de sales, que debe manejarse adecuadamente para evitar impactos ambientales.

El escalamiento es otro desafío, ya que una cosa es estudiar el proceso en laboratorio y otra, muy distinta, es diseñar un sistema más grande, estable y útil en condiciones reales. Al aumentar el tamaño, cambian los tiempos de congelación, la transferencia de calor, la distribución de sales y la forma de separar el hielo.

Por eso, esta tecnología debe avanzar paso a paso: entender el fenómeno, probarlo en condiciones controladas, mejorar el diseño y evaluar en qué contextos podría tener sentido.



4.7 | UNA TECNOLOGÍA PROMETEDORA, PERO TODAVÍA EN DESARROLLO

La desalación por congelación no debe presentarse como una solución universal. No reemplaza automáticamente a la ósmosis inversa, a la destilación ni a otras tecnologías. Su valor radica en que ofrece una vía diferente para separar sales, especialmente interesante cuando se piensa en sistemas de bajo consumo energético, en la refrigeración solar y en soluciones adaptadas a territorios específicos.

Para avanzar, hace falta responder preguntas concretas: ¿qué tan baja puede ser la salinidad del agua obtenida?, ¿cuánta energía se consume?, ¿qué tan fácil es separar el hielo de la salmuera?, ¿qué hacer con la salmuera concentrada?, ¿qué escala tendría sentido?

Responder estas preguntas requiere investigación, pruebas y colaboración entre distintas áreas: tratamiento de agua, ingeniería térmica, energía solar, refrigeración y análisis ambiental.

El hielo puede ser una herramienta útil, pero no funciona por sí solo; requiere diseño, control y evaluación.



4.8 | IDEA CLAVE

La desalación por congelación aprovecha una propiedad natural del agua: cuando se forma hielo a partir de agua salina, las sales tienden a concentrarse en la parte líquida restante.

El reto no es simplemente congelar agua salada. El verdadero reto es formar hielo con una baja concentración de sales, separarlo adecuadamente de la salmuera y hacerlo con un consumo energético razonable.

Lecturas recomendadas

Castillo Téllez, B., Pilatowsky Figueroa, I., Castillo Téllez, M., & López Vidaña, E. C. (2016). Análisis del potencial de la tecnología de congelación/fusión para la desalinización del agua de mar utilizando energía termosolar. *Innovación & Sustentabilidad Tecnológica*, 1(1), 10–20.

Castillo Téllez, B., Castillo Téllez, M., & Vega Gómez, C. J. (2022). El potencial de la desalación por congelación utilizando energía solar. En *Nexo agua y energía en la implementación de los Objetivos del Desarrollo Sostenible: experiencias en Latinoamérica*. Universidad de Guadalajara. https://posgrado.utn.edu.ec/wp-content/uploads/2022/06/Nexo-Agua-y-Energia-Libro-Electronico-0_.pdf

ENERGÍA PARA DESALAR: DE LA ELECTRICIDAD A LAS FUENTES RENOVABLES

*Erick César López Vidaña, Dryden Gilberto Estrada Téllez y
Jorge A. Escobedo Bretado*

5.1 | HABLAR DE AGUA ES HABLAR DE ENERGÍA

Cuando pensamos en el agua potable que sale del grifo, es raro que nos preguntemos cuánta energía se necesitó para que llegara hasta allí. En el caso del agua de lluvia o de los ríos, la naturaleza realiza gran parte del trabajo. Pero cuando se trata de convertir agua salada, ya sea del mar o de acuíferos subterráneos, en agua potable, la historia es muy diferente: la energía se convierte en el eje del proceso.

Desalar el agua no es simplemente filtrarla. Es separar dos sustancias que, en el agua salada, están íntimamente unidas. Las sales, como el cloruro de sodio, no permanecen como “granitos” en el agua, sino que se disocian en iones rodeados por moléculas de agua. Por eso, separarlas requiere aplicar energía mediante un proceso físico adecuado. Eso tiene un costo energético inevitable. Por eso, antes de elegir una tecnología de desalación, es indispensable preguntarse: ¿cuánta energía se necesita?, ¿de dónde obtendremos esa energía? y ¿qué consecuencias tendrá?

En este capítulo hablaremos de los tipos de energía que intervienen en los distintos procesos de desalación, de por qué el consumo energético determina si una tecnología es viable o no, y de cómo las energías renovables, especialmente la solar, están abriendo nuevas posibilidades para producir agua limpia de manera más sostenible.

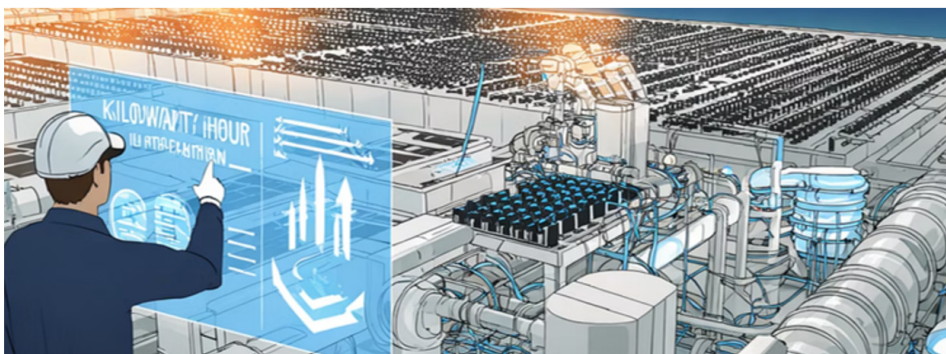
5.2 | ¿POR QUÉ DESALAR EL AGUA REQUIERE ENERGÍA?

El concepto intuitivo de mezcla y separación: cuando disolvemos sal en agua, las moléculas de sal (iones) se rodean de moléculas de agua. Es una unión estable y natural. Para separarlas debemos vencer esa atracción.

El agua y la sal forman una mezcla muy estable. Para separarlas, hay que suministrar energía que rompa ese equilibrio. Desde la termodinámica, siempre existe una cantidad mínima de energía necesaria para separar el agua de las sales. En la práctica, ningún sistema opera en condiciones ideales, por lo que el consumo real suele ser mayor debido

a pérdidas, fricción, resistencias y ineficiencias en los equipos. Este valor mínimo, aunque en teoría es muy pequeño, en la práctica resulta mucho mayor debido a las ineficiencias de los equipos y procesos reales.

Existen dos grandes rutas físicas para lograr esa separación. La primera consiste en empujar el agua a través de una membrana muy fina que deja pasar el agua pura, pero retiene las sales (esto requiere presión, generada mediante electricidad). La segunda es cambiar el estado físico del agua: ya sea calentándola hasta evaporarla (destilación) o enfriándola hasta congelarla, aprovechando que, al cambiar de fase, tiende a dejar atrás las sales disueltas. Ambas rutas son energéticamente costosas, aunque de formas distintas.



¿Cuánta energía cuesta desalar?

Desalar 1.000 litros de agua requiere 3-8 kWh de energía

Equivalente a usar una tetera eléctrica 30-80 horas o un horno 2-5 horas

"La sal no quiere separarse del agua. Hay que vencer la termodinámica"

5.3 | TIPOS DE ENERGÍA EN LOS PROCESOS DE DESALACIÓN

No todas las tecnologías de desalación utilizan el mismo tipo de energía. Cada proceso tiene sus propias necesidades energéticas, lo que influye directamente en el costo de operación, en su impacto ambiental y en las fuentes de energía que puede aprovechar.

Los procesos basados en membranas, como la ósmosis inversa (hoy la tecnología más utilizada en el mundo), dependen fundamentalmente de la energía eléctrica para generar la presión necesaria que impulsa el agua a través de la membrana. Los procesos de destilación, en cambio, requieren calor: se evapora el agua, que luego se condensa y

se recoge como agua pura. La destilación multiefecto y la destilación por compresión de vapor son ejemplos de ello. Otras tecnologías, como la electrodialísis, utilizan campos eléctricos para mover los iones de sal. En la desalación por congelación, el reto no es calentar el agua ni empujarla a través de una membrana, sino quitarle calor para formar hielo. Si ese frío se produce de manera controlada y eficiente, el hielo puede ayudar a separar parte del agua de las sales. Por eso, esta tecnología se integra muy bien con la refrigeración solar.

Tecnologías de Desalinización



Ósmosis inversa

Eléctrica (presión)

Agua de mar y salobre



Destilación multi-etapa

Térmica (vapor/calor)

Plantas grandes junto a centrales
térmicas



Destilación por múltiple efecto

Térmica (vapor/calor)

Cogeneración con calor residual



Congelación

Mecánica/térmica combinada

Poco común (experimental)



Electrodialísis

Eléctrica (corriente continua)

Agua salobre

5.4 | EL CONSUMO ENERGÉTICO COMO FACTOR DECISIVO

Una tecnología puede funcionar perfectamente en el laboratorio y aun así resultar inviable en la práctica. El motivo más común es simple: consume demasiada energía. El consumo energético no es solo un dato técnico; en gran medida determina el costo del agua producida, la huella ambiental del sistema y su rentabilidad a largo plazo.

Pensemos en ello como si fuera un automóvil: dos vehículos pueden llevarte del punto A al punto B, pero si uno gasta el doble de combustible, las consecuencias se acumulan con el tiempo —en el bolsillo y en el medio ambiente—. Lo mismo ocurre con las plantas desaladoras. Una planta que consume mucha energía eléctrica proveniente

de combustibles fósiles no solo encarece el agua, sino que también contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero.

Aquí es donde el diseño adecuado de los sistemas resulta crucial. Un sistema mal dimensionado o con componentes de baja eficiencia puede consumir el doble de energía que uno bien diseñado en las mismas condiciones. Elegir el tamaño adecuado de las bombas, diseñar intercambiadores de calor eficientes, recuperar la energía del agua concentrada que se desecha — como hacen los modernos sistemas de recuperación de presión en la ósmosis inversa— o seleccionar los materiales adecuados para las membranas puede reducir drásticamente el consumo energético de un sistema.



Desde una perspectiva de inversión, el costo de una planta desaladora no se limita a su construcción. Los costos de operación se acumulan a lo largo de toda la vida útil del sistema. Entre ellos, la energía puede representar una parte importante, por lo que diseñar equipos más eficientes puede reducir los gastos y disminuir el impacto ambiental. En otras palabras, diseñar bien no es un lujo: es la diferencia entre un proyecto rentable y otro que se abandona.

5.5 | LAS ENERGÍAS RENOVABLES ENTRAN AL ESCENARIO: HIBRIDACIÓN PARA GARANTIZAR OPERACIÓN CONTINUA

Durante mucho tiempo, las plantas desaladoras funcionaron casi siempre con combustibles fósiles: petróleo, gas o carbón. ¿El problema? Depender de ellos conlleva consecuencias: precios que suben y bajan con frecuencia, contaminación grave y el riesgo de quedarse sin recursos en el futuro.

Con el avance de las energías renovables, tenemos una alternativa mucho más amigable y con futuro: usar fuentes limpias como el sol, el viento o el calor de la Tierra para quitarle la sal al agua.

Por ejemplo, la energía eólica puede suministrar electricidad a una planta de ósmosis inversa (un sistema que elimina las sales del agua). La energía geotérmica aprovecha el calor interno del planeta para destilar. Y la energía solar (tanto los

paneles fotovoltaicos como los colectores térmicos) aprovecha la radiación solar mediante distintos métodos.

Pero hay un detalle no menor: la intermitencia. El viento no sopla siempre; el sol no brilla las 24 horas ni todos los días. ¿Y entonces, qué pasa con la planta desaladora? ¿Cómo se mantiene la operación cuando el recurso renovable disminuye?

Una solución podría ser la hibridación de tecnologías (es decir, combinar estrategias). Un sistema híbrido combina dos o más fuentes de energía para que, cuando una decae, la otra entre en acción. Por ejemplo:

Por ejemplo, una planta solar puede contar con respaldo de la red eléctrica o con baterías que almacenen energía para usarla de noche. También se puede combinar la energía solar térmica con biomasa para generar calor, incluso cuando el cielo esté nublado.

Además, la hibridación no solo ayuda a mantener la operación, sino que también hace que todo funcione de forma más inteligente. Cuando hay sol o viento, se aprovecha al máximo la energía renovable; si falta, se complementa con otras fuentes. Así se reducen costos, se contamina menos y la desalación renovable se vuelve una opción confiable y competitiva.



Agua desalada con energía renovable para comunidades remotas y costeras

En islas, zonas desérticas o pueblos sin red eléctrica, traer agua en camión es caro y contaminante. Una planta desaladora con paneles solares y baterías puede transformar estas comunidades.

Por qué la energía solar es importante para el desarrollo sostenible

La energía solar no es solo tecnología limpia. **Es justicia social:** da acceso a agua potable sin depender de combustibles importados.

5.6 || LA ENERGÍA SOLAR: UNA ALIANZA NATURAL CON LA DESALACIÓN Y DESARROLLO SUSTENTABLE

La energía solar destaca entre las energías renovables para desalar agua. ¿La razón? Geografía pura. Las zonas del mundo con más estrés hídrico (áridas, costeras, con alta salinidad) suelen ser las mismas en las que hay mayor disponibilidad de radiación solar constante. Desaprovechar esa coincidencia sería un error enorme.

El sol se puede usar de dos formas:

- ☉ Fotovoltaica: paneles que convierten la luz en electricidad para sistemas como el de ósmosis inversa.
- ☉ Térmica: colectores que captan calor para procesos de destilación o para generar electricidad.

México cuenta con una ventaja importante: muchas regiones del país presentan una alta disponibilidad de radiación solar, especialmente en el norte, el noroeste y algunas zonas costeras. Esto abre oportunidades para aprovechar un recurso local y abundante en sistemas de desalación alimentados por energía solar, siempre que el diseño sea adecuado y se consideren las condiciones específicas de cada sitio. Además, el uso de la energía solar puede contribuir a reducir las emisiones y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, de las redes energéticas centralizadas y de las fluctuaciones de los precios de la energía.

Pero esto no es solo tecnología: es sustentabilidad en sentido amplio. Significa agua potable sin quemar combustibles fósiles, con menos emisiones y menor dependencia de factores externos y de mercados energéticos inestables y de precios volátiles. Y lo más importante: llevar agua limpia a las comunidades con menor carga ambiental. Un sistema solar bien diseñado dura entre 20 y 30 años, requiere poco mantenimiento y no genera contaminación local. Para una comunidad costera o rural, eso puede ser la diferencia entre contar con agua segura y seguir dependiendo de pipas o de fuentes contaminadas. La sustentabilidad es una cuestión ambiental, social y económica.

5.7 | HACIA UNA DESALACIÓN CON MENOR HUELLA

A lo largo de este capítulo hemos visto que la energía no es un detalle secundario en la desalación: es su columna vertebral. La viabilidad de cualquier tecnología de desalación depende, en gran medida, de cuánta energía consume y de qué tan limpia es esa energía. Las decisiones que se toman en el diseño de un sistema, el tipo de proceso, la fuente de energía, los mecanismos de recuperación, la hibridación con energías renovables, tienen consecuencias que se extienden durante décadas, tanto en términos económicos como ambientales.

La transición hacia sistemas de desalación alimentados por energías renovables no es un sueño lejano. Es una realidad que ya existe en distintas partes del mundo y que, en México, presenta condiciones extraordinariamente favorables. El desafío está en diseñar estos sistemas con rigor, con visión de largo plazo y con la conciencia de que producir

agua y cuidar el planeta no son objetivos contradictorios, sino complementarios.

Quizás la pregunta más importante no sea si podemos desalar agua con energía solar, sino cómo hacerlo de la manera más inteligente, eficiente y justa posible. Esa pregunta no tiene una sola respuesta: la construyen ingenieros, científicos, comunidades y tomadores de decisiones, juntos.

Con esta base, los siguientes capítulos continúan el recorrido: primero se explicará cómo aprovechar el calor del sol mediante energía solar térmica; después, cómo ese calor puede ayudar a producir frío mediante refrigeración solar; y, más adelante, por qué modelar estos procesos resulta útil para diseñarlos mejor antes de llevarlos a la práctica.

Hacia un Futuro Sostenible



Ciclo de vida completo

Contar todos los costes:
construcción, operación e
impacto ambiental



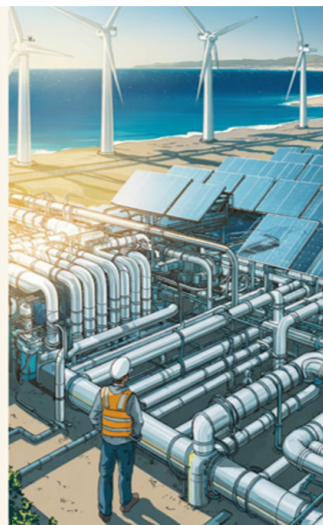
Transición energética

Usar energías renovables en
las plantas desalinizadoras
reduce costes y protege el
medio ambiente



Transparencia y decisiones informadas

Conocer el verdadero coste del agua nos ayuda a tomar mejores
decisiones



ENERGÍA SOLAR TÉRMICA: APROVECHAR EL CALOR DEL SOL

Alfredo Domínguez Niño y Octavio García Valladares

6.1 | INTRODUCCIÓN

El Sol ha acompañado a la humanidad desde sus primeras civilizaciones. En distintas culturas fue asociado con la vida, la fertilidad, la fuerza y los ciclos de la naturaleza; por ello, apareció representado en deidades como Ra en Egipto, Helios en Grecia, Amaterasu en Japón o Huitzilopochtli entre los mexicas.

Con el tiempo, esa observación simbólica se transformó en un aprovechamiento práctico. Desde la antigüedad se han utilizado espejos y superficies reflectantes para concentrar la luz solar y generar calor. Más adelante, en 1767, Horace de Saussure construyó una caja solar capaz de retener el calor, considerada un antecedente de los colectores solares modernos. En 1891, Clarence Kemp patentó uno de los primeros calentadores solares comerciales de agua y, en 1920, William Bailey mejoró estos sistemas al separar el colector del tanque de almacenamiento.

Durante el siglo XX, el desarrollo de colectores planos, tubos evacuados y concentradores permitió ampliar las aplicaciones de la energía solar térmica. Aunque los diseños han cambiado, el principio sigue siendo el mismo: captar la radiación del Sol, convertirla en calor y utilizar ese calor en un proceso útil.

6.2 | QUÉ ES LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA?

La energía solar térmica consiste en captar la radiación del Sol mediante dispositivos diseñados para absorberla y transferirla a un fluido. Ese fluido puede ser agua, aire, aceite térmico u otro medio capaz de transportar energía. El ejemplo más conocido es el calentador solar de agua. En él, la radiación solar calienta el agua que circula por tubos o depósitos. Después, esa agua puede utilizarse en viviendas, hospitales, hoteles o en procesos productivos.

Pero la energía solar térmica no se limita a calentar agua para uso doméstico. También puede emplearse en procesos de secado, climatización, tratamiento de agua, desalación térmica y refrigeración solar.

La clave está en elegir la tecnología adecuada según la temperatura requerida. No todas las aplicaciones requieren el mismo nivel de calor. Algunas funcionan a temperaturas moderadas; otras requieren temperaturas más altas y más estables. Por eso existen diferentes tecnologías solares térmicas.

6.3 | SOLAR FOTOVOLTAICA Y SOLAR TÉRMICA: NO SON LO MISMO

Aunque ambas tecnologías aprovechan la energía solar, no deben confundirse. La energía solar fotovoltaica produce electricidad. Esa electricidad puede alimentar bombas, sensores, lámparas, refrigeradores, equipos de cómputo o sistemas de ósmosis inversa. La energía solar térmica, en cambio, produce calor directamente. Ese calor puede utilizarse para calentar agua, aire u otros fluidos.

También puede almacenarse en tanques o en materiales térmicos para su uso posterior.

No se trata de afirmar que una tecnología sea siempre mejor que otra. La pregunta correcta es: ¿qué necesita el proceso? Si se requiere electricidad, la ruta fotovoltaica puede ser adecuada. Si se requiere calor, la ruta térmica puede resultar más conveniente. Y en algunos casos, lo más inteligente puede ser combinar ambas.



6.4 | COLECTORES SOLARES: DISTINTAS FORMAS DE CAPTURAR CALOR

Los colectores solares son equipos que captan la radiación del Sol y la convierten en calor útil. Existen varios tipos, y cada uno responde a necesidades distintas. Los colectores planos son de los más conocidos. Tienen una superficie absorbente, una cubierta transparente y aislamiento térmico. Son robustos, relativamente sencillos y adecuados para aplicaciones de baja o media temperatura, como el calentamiento de agua, el precalentamiento de fluidos o algunos procesos de secado. Los colectores de tubos evacuados permiten reducir las pérdidas de calor.

Cada tubo tiene una zona de vacío que actúa como aislante, por lo que puede alcanzar temperaturas superiores a las de muchos colectores planos. Son útiles cuando se requiere un mejor desempeño térmico o cuando las condiciones ambientales favorecen mayores pérdidas de calor. También existen colectores de aire, que calientan directamente una corriente de aire. Son muy útiles para el secado solar de productos agrícolas, biomasa, alimentos o materiales.

6.5 | CONCENTRADORES SOLARES: CUANDO SE REQUIERE MÁS TEMPERATURA

Cuando se requieren temperaturas más altas, entran en juego los concentradores solares (Figura 3). A diferencia de los colectores convencionales, los concentradores utilizan espejos o superficies reflectantes para dirigir la radiación solar hacia una zona más pequeña. Al concentrar la energía, se eleva la temperatura del fluido o de la superficie receptora. Dentro de estas tecnologías se encuentran los concentradores parabólicos, los concentradores de canal parabólico,

los concentradores lineales Fresnel, los sistemas de plato parabólico y los concentradores compuestos parabólicos (CPC).

Cada uno tiene características propias de operación, de temperatura y de seguimiento solar. Los concentradores permiten alcanzar temperaturas más elevadas y, por ello, pueden utilizarse en procesos en los que el calor solar debe ser más intenso. Esto los vuelve interesantes para ciertas aplicaciones de desalación, procesos térmicos, generación de vapor, refrigeración por absorción o investigación experimental.



6.6 | COLECTORES SIN CONCENTRACIÓN Y CON CONCENTRACIÓN

Una forma sencilla de clasificar las tecnologías solares térmicas consiste en distinguir entre sistemas sin concentración y con concentración. Los sistemas sin concentración captan la radiación solar sobre una superficie relativamente amplia y la convierten en calor. Aquí se ubican los colectores planos, los tubos evacuados y algunos colectores de aire. Son adecuados para aplicaciones en las que no se requieren temperaturas muy altas. Los sistemas de concentración, en cambio, concentran la radiación solar en un receptor.

Para lograrlo usan geometrías ópticas, espejos o superficies reflectantes. Al concentrar la energía, pueden alcanzar temperaturas más altas. Algunos requieren seguimiento solar para orientarse continuamente hacia el Sol y mantener un buen desempeño. No se trata de que una tecnología sea siempre mejor que otra. La elección depende de la aplicación. Para calentar agua doméstica, un concentrador puede resultar innecesario. Para un proceso que requiere temperaturas más altas, un colector plano puede no ser suficiente. La pregunta correcta siempre es: ¿qué temperatura necesita el proceso y durante cuánto tiempo?

6.7 | ¿POR QUÉ IMPORTA LA TEMPERATURA?

En la energía solar térmica, la temperatura determina las posibilidades de uso. No es lo mismo calentar agua para una regadera que generar vapor, secar biomasa, activar una máquina de absorción o apoyar un proceso de desalación. Las aplicaciones de baja temperatura suelen incluir el calentamiento de agua, el secado suave o el precalentamiento. Las de temperatura media pueden incluir secado más intensivo, procesos industriales ligeros, desalación térmica o refrigeración solar en ciertas configuraciones. Las de mayor temperatura requieren concentración solar y un diseño más cuidadoso.

Esta relación entre la temperatura y la aplicación es fundamental. Un sistema solar puede captar energía, pero si no alcanza la temperatura requerida, no podrá alimentar adecuadamente el proceso. De la misma manera, si se instala una tecnología demasiado compleja para una aplicación sencilla, el sistema puede resultar costoso e innecesario. Por eso, antes de seleccionar un colector o concentrador, hay que definir la necesidad: qué proceso se quiere alimentar, qué temperatura requiere, cuánta energía se necesita, durante cuántas horas y bajo qué condiciones climáticas.

6.8 | ENERGÍA SOLAR TÉRMICA Y DESALACIÓN

La energía solar térmica guarda una relación natural con la desalación. Varios procesos de desalación requieren calor, como la destilación solar, la destilación multiefecto, la humidificación-deshumidificación y otros sistemas térmicos o híbridos. En una destilación solar simple, el calor del Sol evapora el agua y deja atrás las sales. Luego, el vapor se condensa y se obtiene agua con menor salinidad. Este principio se parece al ciclo natural del agua: el sol evapora el agua, el vapor se condensa y luego cae como lluvia. La diferencia es que, en una tecnología de desalación, ese proceso se controla dentro de un sistema diseñado para recuperar el agua. También se pueden utilizar concentradores solares para elevar la temperatura del proceso y mejorar la producción de vapor o de calor útil.

En estos casos, el concentrador permite aprovechar la radiación solar de mayor intensidad, lo cual puede resultar útil en aplicaciones experimentales o en sistemas que buscan una mayor productividad térmica. Además, la energía solar térmica puede integrarse en sistemas híbridos. Por ejemplo, puede apoyar una etapa de precalentamiento, reducir el consumo de combustibles convencionales o combinarse con otras tecnologías de separación. Su potencial depende del diseño, la ubicación, la radiación disponible, la calidad del agua y de la forma en que se maneje la salmuera. Aquí conviene ser claros: usar energía solar no vuelve automáticamente sostenible una tecnología de desalación. El sistema debe estar bien dimensionado, ser eficiente, gestionar adecuadamente sus residuos y responder a una necesidad real. En algunos experimentos de desalación, la radiación solar puede concentrarse mediante superficies reflectantes para elevar la temperatura del proceso. Esto permite explorar condiciones térmicas que no se alcanzan fácilmente con colectores convencionales y abre la posibilidad de sistemas térmicos de mayor intensidad.

6.9 | ENERGÍA SOLAR TÉRMICA Y REFRIGERACIÓN SOLAR

Una de las aplicaciones más interesantes de la energía solar térmica es la refrigeración solar. Aunque parezca contradictorio, el calor del Sol puede utilizarse para activar sistemas que generan frío. En algunos ciclos de refrigeración, como los de absorción o de adsorción, el calor no se enfría directamente. Lo que hace es impulsar

un proceso que permite extraer calor de un espacio, de un fluido o de una sustancia. En otras palabras, el calor solar desencadena un ciclo que produce un enfriamiento útil. Para que esto funcione, se requiere alcanzar temperaturas adecuadas y mantener cierta estabilidad en el suministro de calor. Por eso, los colectores de tubos evacuados, los CPC o ciertos concentradores solares pueden resultar atractivos para aplicaciones de refrigeración solar, según el tipo de

ciclo y la temperatura requerida. Esta conexión es muy importante para la desalación por congelación.

Si el proceso requiere frío para formar hielo a partir de agua salina, una posibilidad es generar ese frío mediante refrigeración solar. Así, el Sol

no participa calentando directamente el agua para evaporarla, sino que aporta energía térmica para activar un sistema capaz de enfriar. La cadena conceptual sería: radiación solar, captación térmica, activación de un sistema de refrigeración, producción de frío, formación de hielo y separación de sales.



6.10 | EL RETO DE LA INTERMITENCIA SOLAR

El Sol es abundante, pero no constante. Su intensidad varía a lo largo del día: disminuye cuando hay nubes y desaparece durante la noche. Esta variabilidad es uno de los principales retos de cualquier tecnología solar. Para reducir este problema, se pueden emplear estrategias de almacenamiento. El calor puede almacenarse en tanques de agua caliente, aceites térmicos, lechos de materiales sólidos o materiales de cambio de fase. En algunos casos, también puede almacenarse el resultado del proceso, como agua caliente, vapor, aire caliente o incluso hielo.

El almacenamiento permite aprovechar mejor las horas de mayor radiación y mantener una operación más estable. En procesos de desalación o de

refrigeración, esta estabilidad puede ser clave para mejorar el desempeño del sistema. También pueden diseñarse sistemas híbridos en los que la energía solar se complementa con otra fuente de energía. Esto no significa renunciar a la sostenibilidad, sino reconocer que muchas aplicaciones reales requieren continuidad, seguridad y control.

6.11 | APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

La energía solar térmica puede aplicarse en diversas áreas. Una de las más conocidas es el calentamiento de agua para viviendas, hospitales, hoteles, escuelas y procesos productivos. También se emplea en el secado solar de alimentos, plantas, madera, biomasa o productos pesqueros. En la industria, puede apoyar procesos de lavado, pasteurización, precalentamiento,

evaporación o secado. En el tratamiento de agua, puede participar en la desalación térmica, la destilación solar, en procesos híbridos o en sistemas experimentales.

En investigación, los concentradores solares han permitido explorar procesos que requieren temperaturas más altas, como la generación de vapor, la activación de ciclos térmicos, la refrigeración solar y diversas formas de desalación. Esto muestra que la energía solar térmica no es una sola tecnología, sino una familia de soluciones que puede adaptarse a distintos niveles de temperatura y complejidad. Su valor no radica únicamente en captar energía solar. Está en integrarla correctamente a una necesidad específica.

6.12 | PARA SEGUIR PENSANDO

La energía solar térmica nos recuerda que el Sol no solo sirve para producir electricidad. También puede entregar calor útil, y ese calor puede emplearse en procesos muy diversos: calentar, secar, evaporar, tratar el agua, activar la refrigeración o apoyar tecnologías de desalación. Los colectores y concentradores solares ofrecen distintas formas de aprovechar ese calor. Algunos son sencillos y adecuados para temperaturas moderadas; otros concentran la radiación y permiten alcanzar temperaturas más altas. La elección siempre depende del proceso que se desea alimentar.

En el contexto de la desalación y la refrigeración solar, esta diversidad tecnológica abre interesantes posibilidades. El reto no es solo captar Sol, sino hacerlo con el equipo adecuado, en el sitio adecuado y para una necesidad real. La energía solar térmica no es una solución automática, pero sí puede ser una pieza importante en el desarrollo de tecnologías más limpias, descentralizadas y sostenibles.

6.13 | IDEA CLAVE

La energía solar térmica aprovecha directamente el calor del Sol. Puede hacerlo mediante colectores simples o mediante concentradores solares capaces de alcanzar temperaturas más altas. Su importancia radica en elegir la tecnología adecuada según la temperatura, la aplicación y el contexto.

Lecturas recomendadas

IDAE. (2020). Guía técnica de energía solar térmica. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. <https://www.idae.es/publicaciones/guia-tecnica-de-energia-solar-termica>.

García Valladares, O., & Pilatowsky Figueroa, I. (2017). Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industrial. UNAM, IER-Fordecyt. <http://www.fordecyt.ier.unam.mx/pdf/pdfTermoSolar.pdf>

REFRIGERACIÓN SOLAR: PRODUCIR FRÍO APROVECHANDO ENERGÍA SOLAR

Nicolás Velázquez Limón, Saúl Islas Pereda y Luis Antonio López Martínez

7.1 | INTRODUCCIÓN

Cuando pensamos en energía solar, generalmente imaginamos paneles fotovoltaicos instalados en los techos para producir electricidad, o calentadores solares que elevan la temperatura del agua para uso doméstico. Sin embargo, la energía del sol también puede aprovecharse de una forma menos conocida y muy valiosa: para producir frío.

A primera vista, la idea parece contradictoria. ¿Cómo puede una fuente asociada al calor servir para enfriar? La respuesta radica en la capacidad de la ciencia y la ingeniería para convertir la energía disponible en un efecto útil. Así como una máquina puede convertir electricidad en movimiento, algunos sistemas pueden utilizar la radiación solar, ya sea en forma de electricidad o de calor, para extraer calor de un espacio, un alimento, un medicamento o un proceso industrial.

La refrigeración solar reúne un conjunto de tecnologías que permiten producir enfriamiento útil a partir de la energía del sol. Su interés ha crecido porque la demanda de refrigeración aumenta en viviendas, escuelas, hospitales,

industrias y comunidades rurales. Además, a menudo la mayor necesidad de frío se presenta justo cuando hay más radiación solar disponible: durante las horas de mayor calor.

Esta coincidencia convierte la refrigeración solar en una alternativa atractiva para reducir el consumo eléctrico, disminuir las emisiones contaminantes y ofrecer soluciones energéticas en lugares donde la red eléctrica es limitada o inexistente. También abre la puerta a aplicaciones innovadoras, como la producción de agua dulce mediante procesos que requieren frío, entre ellos la desalación por congelación.

7.2 | ¿QUÉ ES LA REFRIGERACIÓN SOLAR?

La refrigeración solar puede definirse como el uso de la energía solar para generar frío útil. El objetivo es similar al de un refrigerador doméstico o de un equipo de aire acondicionado: extraer calor de un espacio o de una sustancia para reducir su temperatura. La diferencia principal radica en la fuente de energía y en el tipo de proceso empleado para obtenerla.

En un sistema convencional, el equipo suele funcionar con electricidad proveniente de la red eléctrica. En cambio, en un sistema de refrigeración solar la energía inicial proviene del sol. Esta energía puede aprovecharse de dos maneras generales: transformándola primero en electricidad mediante paneles fotovoltaicos, o utilizándola directamente como calor mediante colectores solares térmicos.

En ambos casos, el resultado buscado es el mismo: producir un efecto de enfriamiento. Lo que cambia es el camino tecnológico que sigue la energía solar antes de convertirse en frío.

Existen dos estrategias principales para aprovechar la energía solar en sistemas de refrigeración: la ruta fotovoltaica y la térmica. Comprender esta diferencia es importante porque cada una tiene ventajas, limitaciones y aplicaciones particulares.

7.3 | REFRIGERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA

La refrigeración solar fotovoltaica utiliza paneles solares para convertir la luz solar en electricidad. Esa electricidad alimenta un equipo de refrigeración convencional, como un refrigerador, un congelador o un sistema de aire acondicionado. En términos sencillos, el sol sustituye, total o parcialmente, a la red eléctrica como fuente de energía.

Esta opción es cada vez más común debido a la disminución de los costos de los paneles solares y al desarrollo de equipos eléctricos más eficientes. Además, puede combinarse con baterías para almacenar electricidad y mantener la operación durante la noche o en periodos de baja radiación. Por ello, se utiliza en cámaras frigoríficas para productos agrícolas, en refrigeradores de vacunas, en congeladores solares y en sistemas de climatización de edificios.

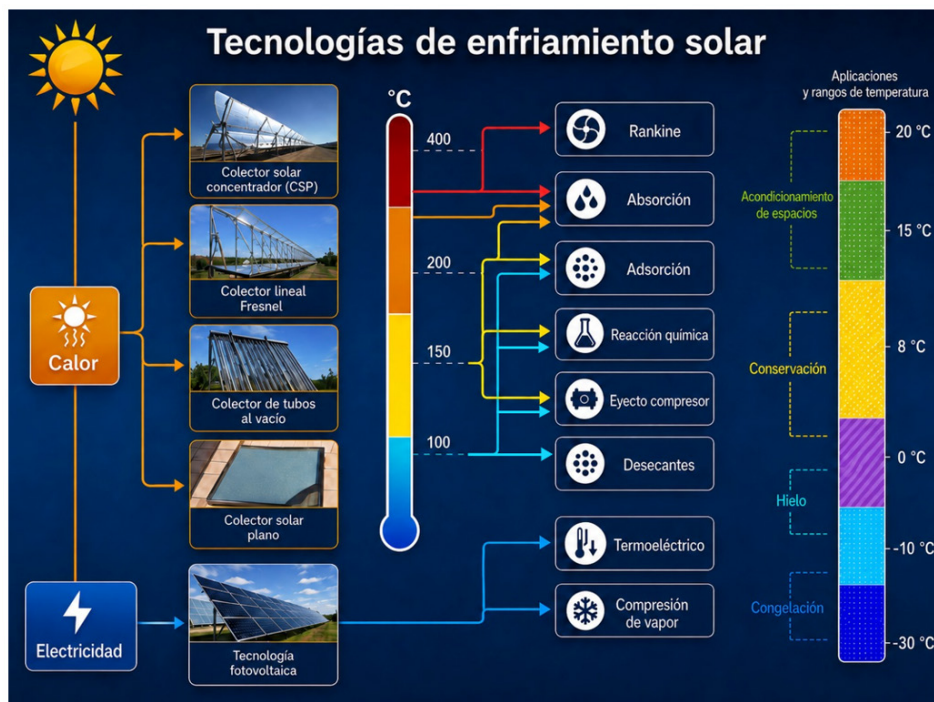
7.4 | REFRIGERACIÓN SOLAR TÉRMICA

La refrigeración solar térmica sigue un camino diferente. En lugar de convertir la radiación solar en electricidad, utiliza colectores solares para captar calor. Ese calor se transfiere a un fluido, como agua, aceite térmico u otro medio de transporte de energía, y luego se emplea para activar un ciclo de refrigeración, como se muestra en la figura 1.

En estos sistemas, el calor solar actúa como el impulso que desencadena el proceso de enfriamiento. Aunque parezca extraño, el calor puede utilizarse para mover un refrigerante en un ciclo que absorbe calor de una zona fría y lo libera en otra más caliente. Entre las tecnologías más estudiadas se encuentran los sistemas de absorción, adsorción, enfriamiento evaporativo, desecantes y algunos ciclos con eyectores.

7.5 | ¿CÓMO PUEDE EL CALOR PRODUCIR FRÍO?

Para entenderlo, conviene recordar que enfriar no significa “agregar frío”, sino retirar calor. Un refrigerador doméstico extrae calor de los alimentos y lo expulsa al ambiente; por eso, la parte trasera suele sentirse caliente. La refrigeración solar térmica busca lograr algo similar, pero utilizando el calor solar como fuente de energía de activación, como se muestra en la figura 1.



Una analogía cotidiana es la evaporación del sudor. Cuando sudamos, parte del agua en la piel se evapora y, al hacerlo, se lleva energía en forma de calor. Por eso sentimos enfriamiento. De manera similar, ciertos sistemas de refrigeración utilizan la evaporación y condensación de fluidos para absorber calor de un espacio o de una sustancia.

En los sistemas de absorción se emplean pares de sustancias, por ejemplo, un refrigerante y un absorbente, que permiten mover el refrigerante a través de un ciclo impulsado por calor. En los sistemas de adsorción se emplean materiales sólidos capaces de retener y liberar el vapor de manera controlada. Al calentarse, el material libera vapor; al enfriarse, vuelve a captarlo. Esta alternancia permite producir frío de forma cíclica.

La ventaja de muchas de estas tecnologías es que pueden operar a temperaturas moderadas, lo que las hace compatibles con colectores solares térmicos. Esto permite imaginar sistemas que no dependan completamente de electricidad y que aprovechen directamente el recurso solar disponible.

Idea clave: La refrigeración solar no genera frío de la nada. Lo que hace es usar energía solar para extraer calor de un lugar y transferirlo a otro. En otras palabras, aprovecha el sol para mover el calor.

7.6 | APLICACIONES DE LA REFRIGERACIÓN SOLAR

Las aplicaciones de la refrigeración solar son amplias y pueden adaptarse a distintas escalas. En zonas rurales o aisladas, puede contribuir a conservar alimentos, vacunas y medicamentos, especialmente cuando el acceso a electricidad es limitado. En el sector agrícola y pesquero, puede ayudar a reducir las pérdidas después de la cosecha o la captura, manteniendo los productos a bajas temperaturas durante más tiempo.

En edificios residenciales, escuelas, hospitales y oficinas, la refrigeración solar puede reducir el consumo eléctrico asociado al aire acondicionado. Esto es especialmente relevante en regiones cálidas, donde la demanda de climatización coincide con altos niveles de radiación solar. También puede utilizarse en procesos industriales que requieren enfriamiento, conservación de productos o control de temperatura.

Otra aplicación de interés es su integración en los procesos de producción de agua dulce. Algunos

métodos de desalación requieren frío para separar las sales del agua. En estos casos, la refrigeración solar puede convertirse en una pieza clave para integrar energía renovable, enfriamiento y acceso al agua.

7.7 | PRINCIPALES RETOS TÉCNICOS

Aunque la refrigeración solar ofrece ventajas importantes, su implementación requiere resolver varios retos técnicos. El primero es la variabilidad del recurso solar. La radiación cambia a lo largo del día: disminuye cuando hay nubes y desaparece durante la noche. Por ello, un sistema confiable requiere estrategias de almacenamiento o de apoyo auxiliar.

En la ruta fotovoltaica, el almacenamiento suele realizarse mediante baterías. En la ruta térmica, el calor puede almacenarse en tanques de agua caliente, materiales de cambio de fase u otros medios térmicos. También existe la posibilidad de almacenar el frío directamente, por ejemplo, produciendo hielo durante las horas de sol para utilizarlo posteriormente.

El segundo reto es la eficiencia. Cada

conversión de energía implica pérdidas, por lo que el diseño del sistema debe procurar que la mayor cantidad posible de energía solar se convierta en enfriamiento útil. Esto depende de la calidad de los colectores, del tipo de ciclo de refrigeración, de las temperaturas de operación, del aislamiento térmico y de la correcta integración de los componentes.

Un tercer reto es el control térmico. Para operar de forma estable, el sistema debe coordinar la captación solar, el almacenamiento, la generación de frío y la demanda real de enfriamiento. Esto exige sensores, válvulas, bombas, estrategias de control y, en muchos casos, simulaciones previas para prever cómo responderá el sistema ante días soleados, nublados o parcialmente nublados.

Finalmente, la confiabilidad es esencial. Un sistema destinado a conservar alimentos, vacunas o producir agua debe funcionar durante largos periodos con mantenimiento mínimo. Por ello, además de ser eficiente, debe ser robusto, seguro y sencillo de operar.

7.8 | REFRIGERACIÓN SOLAR Y DESALACIÓN POR CONGELACIÓN

La refrigeración solar también puede vincularse con uno de los desafíos más importantes de la actualidad: la disponibilidad de agua dulce. En regiones costeras y áridas, el agua de mar es abundante, pero no puede

consumirse directamente por su alto contenido de sales. La desalación busca separar esas sales para obtener agua apta para el consumo humano, el riego o las actividades productivas.

Los métodos más conocidos de desalación son la evaporación y la ósmosis inversa. Sin embargo, existe otra posibilidad: la desalación por congelación. Este proceso se basa en un principio sencillo: cuando el agua salada se congela, los cristales de hielo que se forman contienen poca sal, porque la mayor parte de las sales queda concentrada en la salmuera líquida. Si los cristales de hielo se separan, se lavan y luego se derriten, es posible obtener agua con un menor contenido salino.

Para que este proceso funcione, es necesario generar frío de forma controlada. Ahí surge la oportunidad de integrar la refrigeración solar. En zonas costeras con alta radiación solar, el sol puede proporcionar la energía necesaria para activar un sistema de refrigeración que forme hielo a partir de agua salada. De esta forma, una fuente asociada al calor puede contribuir indirectamente a la producción de agua dulce.

Esta integración resulta atractiva porque combina tres necesidades: aprovechar energías renovables, producir frío útil y obtener agua en lugares donde el recurso hídrico es limitado. Aunque todavía persisten retos de eficiencia, separación de cristales, almacenamiento y operación continua,

la refrigeración solar ofrece una ruta prometedora para desarrollar sistemas de desalación más sostenibles.

7.9 | MIRANDO HACIA EL FUTURO

La refrigeración solar demuestra que la energía del sol no se limita a producir electricidad o calentar agua. También puede convertirse en una herramienta para enfriar, conservar alimentos, proteger medicamentos, climatizar espacios y apoyar procesos de producción de agua dulce.

Su desarrollo dependerá de mejores materiales, equipos más eficientes, estrategias de almacenamiento

accesibles y sistemas de control capaces de operar de manera confiable en condiciones climáticas variables. A medida que estas tecnologías avancen, podrían desempeñar un papel importante en comunidades aisladas, regiones cálidas, zonas costeras y sectores productivos que requieren frío.

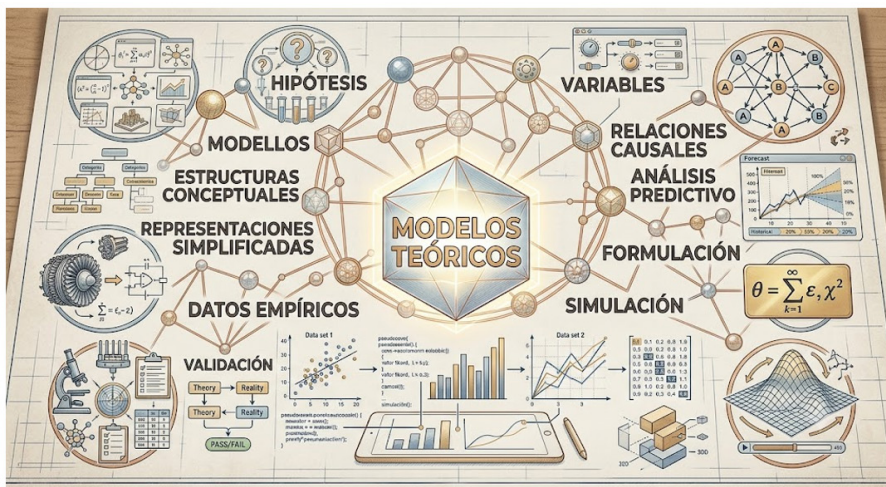
En un contexto marcado por el cambio climático, el aumento de la demanda energética y la escasez de agua, producir frío con energía solar deja de ser una curiosidad tecnológica y se convierte en una oportunidad para construir sistemas más resilientes, sostenibles y cercanos a las necesidades reales de la población.

Lecturas recomendadas

Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. (2011). Guía del frío solar. <https://www.ingenieros.es/files/proyectos/Guia-del-Frio-Solar-fenercom-2011.pdf>

Díaz-Torres, Y., et al. (2014). Sistemas de climatización solar de absorción: barreras y oportunidades. <https://www.redalyc.org/pdf/1470/147040026003.pdf>

Joel Kelly Gurubel Tun, Daniel Uribe Castillo y Rachid Marzoug



Incluir todos los factores posibles haría que el modelo resultara innecesariamente complejo y difícil de interpretar. Por eso, un buen modelo busca el equilibrio: debe ser lo suficientemente sencillo como para poder trabajarse, pero también lo suficientemente completo como para describir lo esencial del fenómeno observado.

En muchos casos, esta simplificación permite identificar con mayor claridad qué variables dominan el sistema y cuáles pueden omitirse sin perder información importante. Sin embargo, simplificar no significa ignorar. Si más adelante se observa que algún efecto pequeño sí influye en el resultado, puede incorporarse al modelo como un ajuste o una corrección adicional.

Estas ideas aparecen con frecuencia en la física y la ingeniería. Muchos fenómenos complejos pueden estudiarse primero mediante aproximaciones sencillas. Esto no quiere decir que el sistema real sea simple, sino que se busca una primera representación útil para entenderlo, medirlo y mejorarlo.

La abstracción es una parte fundamental del modelado. Consiste en pasar de la observación directa del fenómeno a una representación más general. En lugar de trabajar con todos los detalles del sistema real, se buscan relaciones entre las variables principales. Gracias a esto, distintos fenómenos pueden analizarse con herramientas similares, aunque su naturaleza física sea distinta.

En el caso de la desalación por congelación, por ejemplo, el modelo puede ayudar a estudiar cómo avanza el hielo, cómo cambia la temperatura, cómo se concentra la salmuera y qué condiciones favorecen una mejor separación de sales. No se trata solo de “hacer hielo”, sino de comprender un proceso en el que ocurren simultáneamente la transferencia de calor, el movimiento de sales, la formación de cristales y cambios en la concentración del líquido restante.

Otro elemento importante del modelo son las condiciones que se imponen al sistema. Estas condiciones permiten adaptar una descripción general a un caso específico. En física e ingeniería suelen llamarse condiciones iniciales o condiciones de frontera. Por ejemplo, en un sistema de congelación salina pueden incluir la temperatura inicial del agua, la concentración de sales, la geometría del recipiente, el tipo de enfriamiento, el tiempo de operación y la forma en que se mide la salinidad.

Estas condiciones le otorgan identidad al modelo. Sin ellas, la descripción sería demasiado general y no serviría para representar un sistema concreto.

Finalmente, los resultados del modelo deben expresarse de manera comprensible. Aunque las ecuaciones pueden contener información valiosa, muchas veces no basta con observarlas para entender qué está ocurriendo. Por eso se utilizan gráficas, simulaciones,

esquemas o representaciones visuales. Estas herramientas permiten analizar la evolución del fenómeno, identificar patrones, reconocer posibles inconsistencias y comunicar los resultados con mayor claridad.

De esta manera, el modelo deja de ser solo una construcción abstracta y se

convierte en una herramienta útil para comprender, predecir y comunicar el comportamiento de un sistema físico.

En términos sencillos, un modelo teórico es una representación simplificada de una realidad o sistema complejo, elaborada para facilitar su comprensión, explicación o predicción.

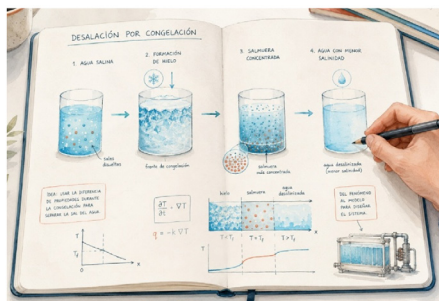
8.2 | ¿PARA QUÉ SIRVE UN MODELO?

Ahora que ya hemos respondido qué es un modelo, podemos analizar para qué sirve. Para estudiar un fenómeno físico, químico, biológico o social con rigor, no basta con observarlo. También es necesario saber qué se quiere medir, qué variables intervienen y cómo se relacionan entre sí.

Aquí es donde el modelo cobra relevancia. Un modelo ayuda a conectar las variables de interés y permite que las mediciones experimentales no se realicen al azar, sino con base en una idea previa sobre cómo debería comportarse el sistema.

Por eso, un modelo no solo funciona como una descripción del fenómeno. También sirve como guía para diseñar experimentos, identificar qué variables son relevantes, decidir qué instrumentos se necesitan y prever qué resultados podrían esperarse bajo ciertas condiciones.

Además, permite comparar los resultados experimentales con las predicciones teóricas. Si ambos coinciden razonablemente, se fortalece la confianza en el modelo. Si no coinciden, esas diferencias también son útiles porque pueden revelar errores de medición, limitaciones del experimento, efectos no considerados o aspectos del sistema que requieren un estudio más detallado.



Consecuentemente, un modelo no reemplaza al experimento, pero ayuda a orientarlo. Permite preguntar, medir y comprender mejor los resultados.

En la desalación por congelación, modelar puede ayudar a responder preguntas

concretas: ¿cómo se forma el hielo?, ¿cómo se mueve la sal?, ¿dónde se concentra la salmuera?, ¿cuánto frío se necesita?, ¿qué pasa si cambia la concentración inicial del agua?, ¿qué ocurre si cambia la forma del recipiente o la manera en que se enfría?

Estas preguntas son importantes porque el proceso no puede evaluarse únicamente al final, cuando el hielo ya se ha formado. Si solo observamos el resultado final, se pierde buena parte de la historia. Modelar ayuda precisamente a seguir esa historia: desde el enfriamiento inicial hasta la formación del hielo y la concentración de sales.

Así, el modelado se convierte en una herramienta para pensar antes de construir; esto ayuda a no complicar el proyecto con ecuaciones, sino, por el contrario, a evitar construir a ciegas.

8.3 | UN MAPA ANTES DEL VIAJE

Una forma sencilla de entender el modelado es imaginar un mapa. Cuando una persona planea un viaje, no necesita que el mapa muestre cada piedra del camino. Lo que necesita es conocer la ruta, las principales distancias, los posibles obstáculos y las mejores opciones para llegar.

Un modelo funciona de manera similar. No reproduce todo lo que ocurre en un sistema, pero sí permite identificar lo más importante. En una tecnología de desalación por congelación, el modelo ayuda a organizar el proceso: dónde entra el agua salina, dónde se retira el calor, cómo se forma el hielo, dónde queda la salmuera y qué condiciones podrían mejorar la separación.



Esto es especialmente útil cuando se quiere diseñar un sistema más grande porque, en el laboratorio se puede experimentar con pocos mililitros o con algunos litros de agua, pero si se piensa en una aplicación comunitaria o productiva, las preguntas cambian: ¿cuánta agua se desea tratar?, ¿cuánto hielo se necesita producir?, ¿qué tamaño debe tener el equipo?, ¿cuánta energía solar se requiere?, ¿durante

cuántas horas puede operar el sistema?

Por otro lado, construir primero y corregir después puede resultar costoso; por eso, aunque modelar antes no elimina todos los problemas, ayuda a reducir la incertidumbre. Entonces, aunque un buen modelo no sustituye al prototipo, al menos puede evitar construir a ciegas.

8.4 | QUÉ SE PUEDE MODELAR EN LA DESALACIÓN POR CONGELACIÓN

En la desalación por congelación ocurren varios fenómenos simultáneamente. Para explicarlo de forma sencilla, podemos imaginar tres grandes procesos.

El primero es el enfriamiento del agua salina. Ya se analizó que para que se forme hielo, el sistema debe ceder calor, pero no se trata solo de bajar la temperatura. A medida que el agua se congela, la salmuera restante se vuelve más concentrada y su comportamiento cambia. Por ejemplo, una salmuera más concentrada puede requerir temperaturas más bajas para seguir congelándose.

El segundo proceso es la formación del hielo, que no se produce de forma instantánea en todo el recipiente. Normalmente se forma poco a poco, avanzando desde las zonas más frías hacia el resto del líquido. A esa zona donde el agua pasa del estado líquido al sólido podemos llamarla frente de congelación. Entender cómo avanza ese frente es clave porque si el hielo crece demasiado rápido o de manera desordenada, puede atrapar parte de la salmuera.

El tercer proceso es la concentración de sales en la fase líquida; cuando se forman cristales de hielo, la estructura cristalina acomoda principalmente las moléculas de agua, pero muchas sales no entran con facilidad en esa estructura y tienden a permanecer en el líquido restante. Por eso la salmuera se vuelve más concentrada conforme avanza la congelación.

Un modelo puede ayudar a representar estos procesos y a relacionarlos entre sí. Por ejemplo, puede mostrar cómo cambia la temperatura con el tiempo, cómo se concentra la salmuera o qué zonas del sistema podrían formar hielo de mejor calidad.

8.5 | LO QUE UN MODELO SÍ PUEDE HACER... Y LO QUE NO

Un modelo ayuda a entender, comparar y anticipar, pero no reemplaza la realidad. Siempre habrá factores difíciles de representar, como imperfecciones del equipo, cambios ambientales, errores de medición o comportamientos inesperados.

Por eso, un modelo debe usarse con criterio. Si es demasiado simple, puede omitir aspectos importantes; si es demasiado complejo, puede resultar difícil de interpretar. El reto es lograr un equilibrio: que sea claro, útil y capaz de representar lo esencial.

Modelar antes de construir no complica el camino; lo hace más claro. En la desalación por congelación con energía solar térmica, el modelo permite relacionar la formación de hielo, la concentración de la salmuera y la demanda de energía con el diseño del sistema.

Así es posible comparar escenarios, anticipar problemas y evaluar si la tecnología puede funcionar a mayor escala o en un territorio específico. No sustituye al experimento, pero lo orienta.

Cuando se trata de agua, energía y sostenibilidad, improvisar puede salir caro. Modelar ayuda a convertir una buena idea en una tecnología mejor diseñada.

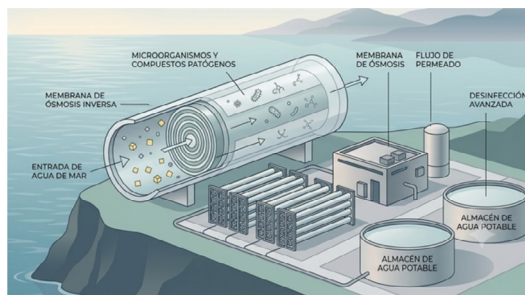
Lecturas recomendadas

Fritzson, P. (2015). Introducción al modelado y simulación de sistemas técnicos y físicos con Modelica. Linköping University Electronic Press. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:853769/fulltext01.pdf>

López López, M. G. (2023). Modelado, simulación y control de procesos. Tecnológico Nacional de México. https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/6450/1/RFS_Ma_Guadalupe_Lopez_Lopez_2023.pdf

CALIDAD DEL AGUA: MÁS ALLÁ DE QUITAR LA SAL

*Beatriz Melissa Aponte, José Antonio Rubio González y
Martha Fabiola Martín del Campo Solís*



Cuando hablamos de desalación, es común pensar que el objetivo principal es simplemente eliminar las sales disueltas del agua. Y, en efecto, reducir la salinidad constituye una de las metas fundamentales de cualquier proceso de desalación. Sin embargo, obtener un agua con una menor concentración de sales no implica, por sí solo, que esta sea apta o segura para cualquier aplicación.

La calidad del agua es un concepto mucho más amplio, ya que depende de un conjunto de características físicas, químicas, microbiológicas y, en algunos casos, incluso radiológicas. Entre los factores más importantes se encuentran la composición química del agua, la presencia de microorganismos patógenos, la materia orgánica, los metales pesados, los compuestos tóxicos, las partículas en suspensión y otros contaminantes que pueden afectar su inocuidad o limitar su uso. De igual manera, la calidad final está determinada por el tipo de tratamiento aplicado, las condiciones de operación del proceso y el manejo posterior del agua obtenida.

9.1 | NO TODA EL AGUA TRATADA TIENE EL MISMO DESTINO

Los requisitos de calidad del agua varían considerablemente según el uso al que esté destinada. El agua puede emplearse para consumo humano, riego, limpieza, procesos industriales, actividades productivas, laboratorios o servicios, y cada una de estas aplicaciones exige características específicas. Por ejemplo, el agua destinada al consumo humano

debe cumplir estrictos criterios de potabilidad para garantizar la protección de la salud pública. Además de presentar una baja concentración de sales, debe estar libre de microorganismos patógenos, sustancias tóxicas y otros contaminantes que puedan representar un riesgo para la salud.

En contraste, el agua utilizada en procesos industriales, agrícolas y, en algunos casos, farmacéuticos no

siempre debe ser potable, pero sí debe cumplir especificaciones particulares relacionadas con la eficiencia de los procesos, la protección de los equipos, la calidad del producto final o el cumplimiento de la normativa aplicable. En estos casos, un agua con menor salinidad puede ser suficiente, siempre que cumpla con los parámetros exigidos para la aplicación correspondiente.

Por esta razón, al evaluar cualquier tecnología de desalación, incluida la desalación por congelación, no basta con cuantificar el porcentaje de sales removidas ni la disminución de la conductividad. También es indispensable analizar las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua obtenida para

determinar si cumple con los criterios de calidad establecidos para su uso previsto. En este sentido, es importante distinguir entre desalación y potabilización. Mientras que la desalación tiene como objetivo principal reducir el contenido de sales disueltas, la potabilización comprende un conjunto más amplio de procesos destinados a eliminar microorganismos, compuestos químicos y otros contaminantes, con el fin de producir agua segura para el consumo humano. En consecuencia, el éxito de un proceso de desalación no debe evaluarse únicamente por su capacidad para eliminar sales, sino también por la generación de agua que cumpla con los requisitos de calidad exigidos para su aplicación final.



9.2 | LA SALINIDAD ES SOLO UNA PARTE DE LA CALIDAD

La desalación por congelación se basa en la congelación fraccionada, un proceso en el que los cristales de hielo incorporan principalmente moléculas de agua, mientras que la mayor parte de las sales y otros solutos permanecen concentrados en la fase líquida, denominada salmuera. Al separar y fundir el hielo, es posible obtener agua con un contenido de sales significativamente menor.



Una vez separado de la salmuera, el hielo puede fundirse para obtener agua con menor salinidad. La calidad de esa agua dependerá de qué tan controlada haya sido la congelación y de qué tan bien se haya separado el hielo, ya que pequeñas cantidades de salmuera atrapada o adherida pueden volver a aumentar el contenido de sales.

Por esta razón, la evaluación de la desalación por congelación no debe limitarse a observar la formación de hielo ni a la reducción aparente de la salinidad. Es indispensable caracterizar la calidad del agua producida mediante análisis fisicoquímicos que permitan verificar si el proceso alcanzó el nivel de purificación esperado y si el agua cumple con los requisitos establecidos para el uso al que será destinada.

Entre los parámetros de calidad del

agua más importantes se encuentra la conductividad eléctrica, una medida indirecta de la cantidad de sales disueltas presentes en el agua. En general, una disminución de la conductividad indica una mayor remoción de iones y, por tanto, una desalación más eficiente. Otro parámetro fundamental es el pH, que refleja la acidez o alcalinidad y puede influir tanto en la estabilidad química como en la aptitud para diversas aplicaciones.

De igual manera, la turbidez permite evaluar la presencia de partículas suspendidas que podrían afectar la apariencia del agua o interferir en procesos posteriores de tratamiento. Asimismo, el análisis de sólidos disueltos totales (SDT) proporciona una estimación de la cantidad total de sustancias disueltas, mientras que la determinación de iones específicos, como sodio (Na^+),

cloruros (Cl^-), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y sulfatos (SO_4^{2-}), permite evaluar qué tan efectiva fue la separación de los principales componentes responsables de la salinidad.

De esta forma, todos estos análisis en conjunto permiten determinar no solo si el proceso logró disminuir la salinidad, sino también si el agua obtenida posee las características necesarias para cumplir los criterios de calidad establecidos para aplicaciones como el consumo humano, el riego, los procesos industriales o el uso en laboratorios. Por ello, la caracterización de la calidad del agua constituye una etapa indispensable para evaluar el desempeño real de la desalación por congelación y su viabilidad como tecnología de tratamiento.

9.3 | EL RIESGO MICROBIOLÓGICO

En algunos casos, dependiendo del origen del agua y del uso previsto, también puede ser necesario evaluar otros parámetros, como la presencia de metales, materia orgánica, microorganismos o compuestos potencialmente tóxicos, ya que la congelación está diseñada principalmente para reducir el contenido de sales y no necesariamente elimina todos los contaminantes presentes.

Por lo tanto, además de los parámetros fisicoquímicos, la calidad microbiológica es esencial. El agua puede verse transparente y tener poca sal, pero

aun así contener microorganismos que representen un riesgo. Bacterias, virus, hongos o parásitos pueden estar presentes en fuentes naturales, recipientes, tuberías, superficies de contacto o durante la manipulación del hielo.



Esto es especialmente importante en procesos experimentales. Si el sistema no se limpia adecuadamente, si los recipientes no están bien controlados o si el hielo se manipula sin cuidado, el agua obtenida puede contaminarse después de la separación.

Por eso, cualquier propuesta de desalación debe considerar buenas prácticas de manejo, limpieza, almacenamiento y análisis microbiológico. La calidad del agua no depende únicamente del proceso de separación, sino también de todo lo que ocurre antes, durante y después del tratamiento.

9.4 | CALIDAD, SOSTENIBILIDAD Y CONFIANZA

En el laboratorio, la calidad del agua obtenida mediante desalación por congelación puede evaluarse en

condiciones controladas a partir de muestras de pequeño volumen. Como se mencionó anteriormente, se compara la conductividad eléctrica antes y después del proceso para estimar la reducción de sales, además de medir el pH, la salinidad del hielo fundido y de la salmuera, y observar características físicas como la turbidez o la presencia de partículas, lo que permite determinar la eficiencia del proceso y la calidad del agua producida.

Sin embargo, cuando se busca aplicar esta tecnología a mayor escala, la evaluación debe ser más integral. Además de la remoción de sales, es necesario considerar la calidad del agua de alimentación, la estabilidad del sistema, el almacenamiento del agua tratada, la limpieza de los equipos, el riesgo de recontaminación y los requisitos de calidad establecidos para el uso final del agua.

Asimismo, debe prestarse atención a la salmuera generada durante el proceso. Aunque el objetivo principal es recuperar agua con menor salinidad, la corriente concentrada también requiere un manejo adecuado, ya que contiene las sales y otros solutos rechazados durante la congelación. Su composición dependerá de la calidad del agua de alimentación y de la eficiencia del proceso, por lo que su disposición o posible aprovechamiento debe considerarse parte de una operación sostenible.

Una tecnología sostenible no solo debe ser eficiente desde el punto de vista técnico, sino también demostrar que sus resultados son consistentes, reproducibles y confiables. En el caso de la desalación por congelación, esta confianza se basa en la evaluación objetiva de la calidad del agua obtenida. Contar con datos medibles permite comprobar el desempeño real del proceso y sustentar su viabilidad en distintas aplicaciones.



Por ello, no basta con afirmar que un sistema produce agua con menor salinidad. Es necesario cuantificar el grado de reducción de las sales mediante parámetros como la conductividad eléctrica o los sólidos disueltos totales, así como caracterizar

las propiedades fisicoquímicas del agua obtenida. Asimismo, debe determinarse si el agua cumple con los requisitos de calidad para el uso al que se destinará o si requiere tratamientos complementarios antes de su uso.

Lejos de disminuir el potencial de la desalación por congelación, este enfoque fortalece su desarrollo y su aceptación. La evaluación sistemática de la calidad del agua permite validar la eficiencia del proceso, comparar su desempeño con el de otras tecnologías de desalación e identificar oportunidades de mejora. En consecuencia, la generación de evidencia experimental sólida favorece la implementación responsable de esta tecnología y evita conclusiones o expectativas no respaldadas por resultados verificables.

Idea clave

Reducir la salinidad no implica automáticamente obtener agua potable. La calidad del agua debe evaluarse según su uso final, mediante parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y de manejo del proceso.

Lecturas recomendadas

Comisión Nacional del Agua. (2025). Calidad del agua en México. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>

Organización Mundial de la Salud. (2017). Guías para la calidad del agua de consumo humano. OMS. <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241549950>

DESALACIÓN POR FRÍO: RETOS, APRENDIZAJES Y VISIÓN DE FUTURO

*Abril Adriana Angulo Sherman, Valentín Flores Payán,
Espicio Monteros Curiel y Jesús Barrera Rojas*

La búsqueda de soluciones sustentables para mitigar la escasez global de agua dulce ha impulsado a la ciencia a explorar alternativas tecnológicas que desafíen los paradigmas tradicionales de la desalinización. Aunque la evaporación térmica y la filtración por membranas han dominado el panorama industrial, la termodinámica nos invita a dirigir la mirada hacia una ruta alternativa y prometedora: la desalación por congelación. El propósito de este capítulo es ofrecer un recorrido interdisciplinario que abarca desde la escala nanométrica del laboratorio hasta la complejidad de las plantas industriales. A través de este análisis, se desglosan los fundamentos físicos que rigen la pureza de los cristales de hielo, las ventajas energéticas de optar por el frío, los desafíos ingenieriles del escalamiento y las oportunidades ambientales que se derivan del manejo de sus residuos bajo un enfoque de economía circular.

10.1 | PROCESOS DE NUCLEACIÓN Y CRISTALIZACIÓN: EL RETO DE FORMAR HIELO SIN ATRAPAR LA SAL

En el agua de mar conviven dos sustancias muy particulares que, curiosamente, comparten una característica: en su estado sólido, ambas pueden organizarse en estructuras geométricas perfectas, conocidas como cristales. Por un lado, tenemos las sales disueltas y, por otro, el agua.

El agua es una sustancia fascinante. Es considerada el solvente universal de la naturaleza gracias a dos propiedades estructurales. La primera es su diminuto tamaño; es la segunda molécula más pequeña que existe. La segunda es la

increíble versatilidad de interacción que proporcionan los puentes de hidrógeno, enlaces moleculares que les permiten unirse, rodear y desarmar a otros compuestos, incluyendo los cristales de sal, manteniéndolos integrados en su forma líquida a temperatura ambiente.

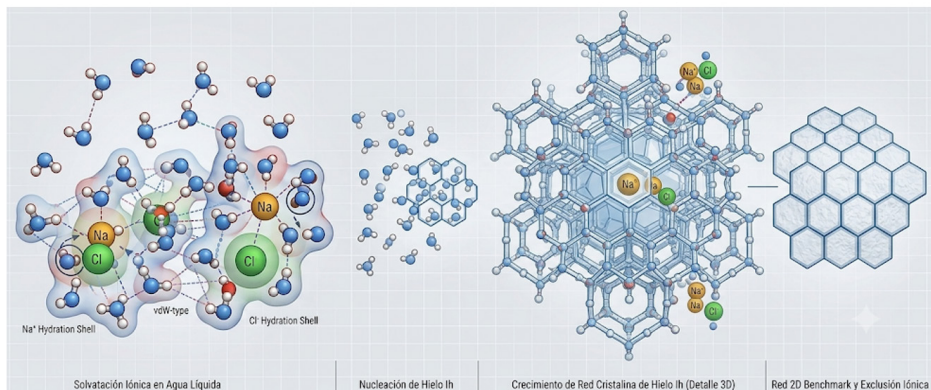
Sin embargo, cuando la temperatura desciende y se aproxima a su punto de congelación (0 °C), el juego cambia por completo. Las moléculas de agua forman puentes de hidrógeno más estables, dando origen a fragmentos de hielo, también conocidos como hielo I hexagonal, un fenómeno que llamamos nucleación. A medida que este cristal de hielo crece, las moléculas de agua se vuelven sumamente selectivas,

prefieren la compañía de sus iguales y, como consecuencia de su estricta geometría, comienzan a desalojar los componentes de las sales disueltas.

Este comienzo representa el primer reto para los procesos de laboratorio. La cristalización está gobernada por la tasa de enfriamiento, es decir, la cantidad de grados por minuto con la que se puede disminuir la temperatura. Si el agua se enfría muy rápidamente, la cristalización ocurre de forma caótica y acelerada, lo que impide la salida de las sales de los cristales de hielo y favorece la aparición de pequeñas gotas de agua extremadamente salada (salmueras) rodeadas de capas de hielo. Si esto fuera la evacuación de un vagón de tren, el equivalente

sería no permitir que los pasajeros salgan antes de que la nueva multitud intente entrar a toda prisa; sin orden ni tiempo, muchas personas quedarían atrapadas adentro.

Por lo tanto, el reto tecnológico no es lograr que el agua se congele, sino manipular la velocidad de enfriamiento para controlar cómo se forman y crecen los cristales. Se requiere diseñar un proceso lo suficientemente lento como para que el hielo aproveche su propia geometría y expulse hasta la última partícula de sal, y también lo bastante eficiente como para que sea viable producir agua potable a gran escala. Se trata de un delicado equilibrio entre el tiempo, la temperatura y las leyes de la física.



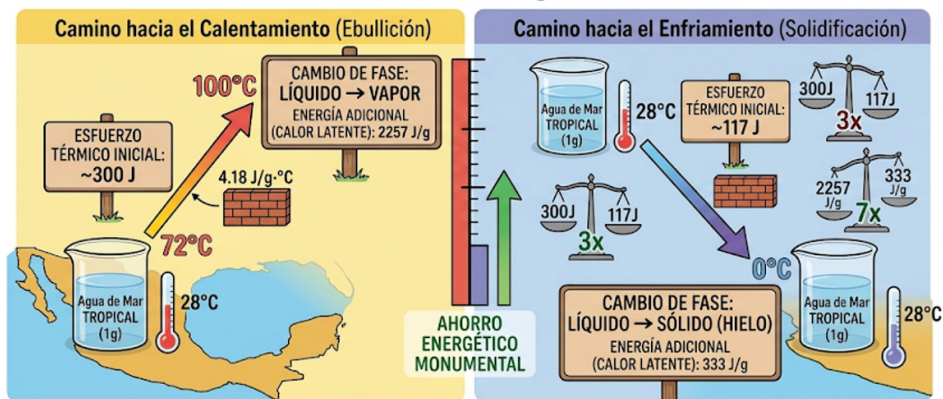
10.2 | EVALUANDO LA EFICIENCIA: EL BALANCE ENERGÉTICO Y EL CAMINO MÁS CORTO

Cuando pensamos en desalar agua, posiblemente la primera idea que nos venga a la cabeza sea hervirla para evaporarla y luego recuperar el vapor, como observamos en la naturaleza a través del ciclo del agua. Sin embargo, desde el punto de vista termodinámico, esta alternativa implica un costo energético sumamente elevado.

Para entenderlo, imaginemos que partimos de agua de mar en una zona tropical como las costas de México, donde la temperatura promedio de la superficie ronda los 28 °C. Para llevar un gramo de esta agua hasta su punto de ebullición (100 °C), primero debemos elevar su temperatura a lo largo de un recorrido de 72 °C. Debido al calor específico del agua, se requiere aproximadamente 4.18 J de energía para elevar un grado la temperatura de un solo gramo de la sustancia, este trayecto consume una cantidad considerable de calor, aproximadamente 300 J. En contraste, el camino hacia el punto de solidificación (0 °C) requiere un descenso de 28 grados, el equivalente a retirar cerca de 117 J. Considerando lo anterior, el esfuerzo térmico inicial para aproximarse al cambio de fase es casi tres veces menor si decidimos enfriar en lugar de calentar.

Además, es indispensable considerar la energía requerida para la transición de fase, el cambio de estado que ocurre de líquido a vapor o a sólido, en el que el calor latente de evaporación (2257 J/g) es casi siete veces el calor latente de fusión (333 J/g). A nivel global, existe un ahorro energético monumental al optar por el frío. Sin embargo, es indispensable evaluar la eficiencia real de todo el sistema.

LA FÍSICA DEL AGUA DE MAR: ¿CALENTAR O ENFRIAR?



Aunque congelar el agua requiere mucha menos energía de transición, hacer funcionar los sistemas de refrigeración comercial, accionar las bombas que mueven el agua salina a presiones óptimas y operar los mecanismos mecánicos para separar y lavar los cristales de hielo requieren energía secundaria que debe contabilizarse con precisión. Si el diseño experimental no es lo suficientemente minucioso, el ahorro al elegir la ruta del frío podría disiparse en ineficiencias mecánicas. Evaluar la eficiencia energética es, por lo tanto, la brújula que nos indica si esta alternativa es verdaderamente viable para satisfacer la necesidad de agua dulce en el mundo real.

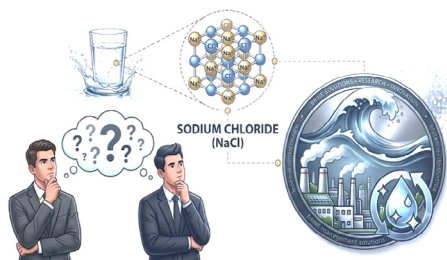
10.3 | EL DESAFÍO EN EL ESCALAMIENTO TECNOLÓGICO

Llevar una tecnología desde el ambiente controlado del laboratorio y las pruebas piloto hasta una escala industrial ideal representa un reto multidimensional que abarca factores técnicos, económicos, operativos y regulatorios. En el caso específico de la desalación por congelación, el escalamiento no es una cuestión meramente de construir tanques más grandes, sino de abordar problemas de reproducibilidad, rendimiento y compatibilidad entre etapas. Controlar una tasa de enfriamiento lenta y homogénea en unos cuantos mililitros de agua dentro de un tubo de ensayo es relativamente sencillo; lograr ese mismo control térmico y geométrico en volúmenes de miles de litros expuestos a las condiciones climáticas reales es un desafío de ingeniería mayúsculo.

Desde la perspectiva económica, la viabilidad técnico-financiera sostenida determina si este tipo de innovación puede salir con éxito de la planta piloto y comercializarse. Los costos asociados a la fabricación de sistemas de refrigeración industrial, a la distribución y al manejo operativo de los fluidos pueden incrementarse significativamente, lo que complica el retorno de la inversión si el diseño no se optimiza previamente. Por ello, se requieren análisis tecnoeconómicos escalonados que utilicen datos industriales reales para evaluar el rendimiento, priorizar

las mejoras mecánicas y asegurar un equilibrio sistémico que mitigue los impactos ambientales sin incrementar los costos de producción.

10.4 | EL DILEMA DE LAS SALMUERAS: ¿QUÉ HACER CON LA SAL SOBRANTE?



El principal residuo generado en la desalinización de agua de mar es la salmuera, un efluente de alta concentración salina cuyo manejo plantea serios dilemas técnicos, económicos y ambientales. Tradicionalmente, verter este residuo directamente al mar sin tratamiento previo altera drásticamente los ecosistemas costeros, ya que incrementa la salinidad local, reduce el oxígeno disuelto y afecta a los organismos bentónicos. Además, estas descargas suelen contener residuos de productos químicos (biocidas o coagulantes) empleados en la operación de las plantas.

No obstante, una de las grandes ventajas ambientales de la desalación por congelación es que produce salmuera mecánicamente puras, libres de aditivos químicos, lo que facilita enormemente su reaprovechamiento en un enfoque de economía circular.

Hoy en día, la ingeniería ambiental está transformando la percepción de la salmuera, pasando de considerarla un desecho problemático a una valiosa materia prima para la recuperación de recursos. Debido a su alta concentración, este efluente es ideal para la recuperación de sales y minerales de alto valor económico como el cloruro de sodio, magnesio, calcio, potasio e incluso litio, mediante procesos avanzados de cristalización. Asimismo, puede utilizarse en la industria química para la producción de cloro, hidrógeno e hidróxido de sodio por electrólisis, como base nutricional para el cultivo de microalgas y la acuicultura adaptada, o en la estabilización de materiales de construcción sustentables. Al mitigar el impacto ambiental mediante la valorización de sus residuos, la ruta del frío consolida su posición como una alternativa verdaderamente sustentable para el futuro del agua dulce.

10.5 | MODELACIÓN Y VALIDACIÓN DE SISTEMAS DE CONGELACIÓN

El diseño de sistemas de desalación por congelación no comienza en el congelador, sino en la computadora. Modelar matemáticamente el comportamiento del agua salada antes de experimentar es una herramienta indispensable para optimizar los recursos. Mediante ecuaciones de transferencia de calor y de masa, el investigador puede simular cómo se comportará la tasa de enfriamiento en un prototipo.

El verdadero valor de la modelación radica en la predicción geométrica: el software permite estimar el tamaño y la velocidad de crecimiento de los cristales de hielo bajo distintas condiciones termodinámicas, simulando el avance del frente de congelación. Si la simulación matemática advierte que el enfriamiento será caótico y atraparé salmuera, el científico puede ajustar las variables del código en cuestión de segundos, evitando el ensayo y error destructivo en el laboratorio.

Finalmente, la validación empírica cierra el ciclo científico. Al trasladar los parámetros optimizados de la pantalla al experimento real, se contrastan los tiempos de congelación y las curvas de temperatura reales con las teóricas. Esta concordancia entre el modelo numérico y la práctica de laboratorio es la que fortalece el diseño tecnológico antes de intentar su escalamiento industrial.

10.6 | EL VALOR INTERDISCIPLINARIO EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

El desarrollo de tecnologías sustentables para la obtención de agua dulce es un desafío que trasciende las fronteras de una sola disciplina. Resolver el equilibrio entre la termodinámica del hielo y la viabilidad económica de un sistema de desalación requiere un diálogo constante entre físicos, ingenieros y químicos. Mientras la física aporta el entendimiento de la cinética de cristalización y de los balances de calor latente, la ingeniería ambiental y la

química permiten proyectar la gestión de los residuos (salmueras) y optimizar los materiales de los equipos.

Más allá de los hitos técnicos, el mayor impacto de estos proyectos radica en su función como incubadoras de talento científico. Al involucrar a estudiantes en investigaciones que combinan la rigurosidad de la simulación computacional con la experimentación de laboratorio, se promueve una formación científica activa

y adaptativa. Los futuros investigadores no solo memorizan y aplican las leyes de la termodinámica, sino que desarrollan resiliencia ante modelos virtuales que fallan y aprenden a comunicar ideas complejas con expertos de otras áreas. La colaboración interdisciplinaria es, en última instancia, el motor humano que transforma las ciencias básicas en soluciones para el mundo real.

10.7 | CONCLUSIÓN Y VISIÓN A FUTURO

A lo largo de este capítulo se evidencia que la desalación por congelación no es meramente un concepto teórico de laboratorio, sino una alternativa viable y estratégicamente competitiva para el futuro del agua dulce. El éxito de esta transición tecnológica no depende únicamente de la optimización individual de las tasas de enfriamiento o de la eficiencia de los sistemas mecánicos, sino también de nuestra capacidad para conectar de forma armónica los modelos matemáticos con la práctica empírica. Al reflexionar sobre los aprendizajes obtenidos, queda claro que el verdadero motor del cambio radica en la colaboración interdisciplinaria y en la formación de nuevas generaciones de científicos capaces de transformar las ciencias básicas en soluciones para la comunidad. Mirar hacia el futuro implica consolidar la desalación por frío como un pilar de la sustentabilidad, donde el cuidado de la física del hielo y el respeto por los ecosistemas costeros se unan para responder a uno de los desafíos más humanos de nuestro siglo.

Lecturas recomendadas

Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación de Chile. (2022). Desalinización: oportunidades y desafíos para abordar la inseguridad hídrica en Chile. https://minciencia.gob.cl/uploads/filer_public/e0/48/e048f6f8-ca73-4d90-b108-8ca5976565c1/desalinizacion__oportunidades_y_desafios_para_abordar_la_inseguridad_hidrica_en_chile.pdf

Fundación We Are Water. (2023). La desalinización frente a sus retos. <https://www.wearewater.org/es/insights/la-desalinizacion-frente-a-sus-retos/>

SOBRE LAS AUTORAS Y AUTORES

- ☼ Dra. Abril Adriana Angulo Sherman. Física especializada en termodinámica aplicada a la ciencia del agua. Su trabajo se orienta al estudio de procesos a baja temperatura, de cristalización y de soluciones sustentables para el suministro de agua de calidad, así como a la preservación de materiales biológicos y a la optimización de la cadena de frío.
- ☼ Dr. Alfredo Domínguez Niño. Profesor investigador adscrito al Instituto de Energías Renovables de la UNAM. Su trabajo se enfoca en el análisis de propiedades fisicoquímicas, microbiológicas, nutrimentales, organolépticas y funcionales de alimentos procesados mediante ecotecnologías solares, especialmente en procesos de secado y aprovechamiento térmico.
- ☼ Dra. Belkis Sulbarán Rangel. Profesora investigadora de Tiempo Completo de la Universidad de Guadalajara y Coordinadora de la Maestría en Ciencias en Ingeniería del Agua y la Energía. Perteneció al SNII, nivel II, y a la Academia Mexicana de Ciencias. Sus líneas de investigación incluyen biomateriales, biocombustibles, bioeconomía circular, tratamiento de agua y almacenamiento de energía.
- ☼ Dra. Beatriz Castillo Téllez. Profesora investigadora de la Universidad de Guadalajara. Su trabajo se enfoca en energía solar térmica, desalación por congelación, transferencia de calor y desarrollo de alternativas sostenibles para el acceso al agua, con énfasis en tecnologías aplicadas a contextos rurales, costeros y con limitaciones energéticas.
- ☼ Ing. Beatriz Melissa Aponte. Ingeniera Farmacéutica y estudiante de la Maestría en Ciencias en Biomedicina y Biotecnología Molecular de la ENCB-IPN. Su formación se orienta al control de calidad, validación, seguridad y procesos farmacéuticos. Su trabajo se vincula con la innovación, la evaluación de insumos y la calidad en procesos relacionados con agua y salud.
- ☼ Mtro. Carlos Javier Hernández Estrella. Ingeniero en Energía y Maestro en Energías Renovables y Eficiencia Energética. Sus líneas de trabajo se orientan al aprovechamiento de tecnologías solares, el secado solar de biomasa, la valorización de algas, la eficiencia energética y el desarrollo de sistemas de refrigeración solar aplicados a procesos de desalación por congelación.
- ☼ Dra. Carolina Livier Recio Colmenares. Profesora investigadora del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. Es doctora en Agua

- y Energía. Su trabajo se enfoca en el nexo agua-energía, la desalación, el aprovechamiento de energías renovables y el desarrollo de procesos sostenibles para aplicaciones ambientales.
- Dr. César Alejandro García García. Profesor investigador de la Universidad de Guadalajara. Su trabajo se centra en inteligencia artificial, ciencia de datos y desarrollo de sistemas inteligentes aplicados a la sostenibilidad ambiental, el análisis de información y la transformación digital, con énfasis en el uso ético y responsable de tecnologías emergentes.
 - Lic. en Física y Matemáticas Daniel Uribe Castillo. Adscrito a la Escuela Superior de Física y Matemáticas del Instituto Politécnico Nacional. Actualmente cursa la Maestría en Ciencias Físico-Matemáticas. Sus líneas de investigación se orientan a la física matemática, la gravitación, la relatividad general, la modelación matemática de fenómenos físicos y el cálculo de modos cuasinormales mediante métodos analíticos.
 - M.C. Dryden Gilberto Estrada Téllez. Estudiante del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería Electrónica en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Es profesor de Ingeniería en la Universidad La Salle Cuernavaca. Sus líneas de investigación se enfocan en sistemas multiagente, control cooperativo de vehículos aéreos no tripulados, comunicación basada en eventos y transporte cooperativo de cargas suspendidas.
 - Dr. Erick César López Vidaña. Investigador del Centro de Investigación en Materiales Avanzados. Su trabajo se enfoca en sistemas de energía solar térmica, ingeniería de procesos sustentables y análisis técnico-económico de soluciones tecnológicas para el aprovechamiento de recursos renovables, especialmente en aplicaciones térmicas y energéticas.
 - Dr. Espicio Monteros Curiel. Ingeniero y académico especializado en geociencias, geoquímica y procesos fisicoquímicos. Su trabajo se orienta al análisis termodinámico, la generación de biocombustibles y el desarrollo de soluciones sostenibles vinculadas con energías alternativas, innovación tecnológica y aprovechamiento responsable de recursos naturales.
 - Dr. Gerardo Alberto Mejía Pérez. Académico y gestor universitario de la Universidad de Guadalajara. Desde su labor institucional ha impulsado proyectos académicos, ambientales y de sustentabilidad, promoviendo la vinculación entre investigación, formación estudiantil y solución de problemas relacionados con agua, energía

y territorio. Sus líneas de investigación se orientan a energías renovables, sustentabilidad, gestión ambiental y desarrollo tecnológico aplicado.

- ☉ Dra. Hasbleidy Palacios Hinestroza. Profesora investigadora del Centro universitario de Tlajomulco, de la Universidad de Guadalajara, Doctora en Agua y Energía y miembro del SNII Nivel I. Su investigación se enfoca en biotecnología ambiental, bioenergías, economía circular, nanocelulosa bacteriana, biomateriales y tratamiento sostenible de aguas.
- ☉ Lic. Héctor Salomón Lobera Castillo. Adscrito al Centro Universitario de Tlaquepaque de la Universidad de Guadalajara. Actualmente cursa la Maestría en Gestión y Políticas de la Educación Superior. Su formación se orienta al análisis de la gestión universitaria, las políticas educativas y el fortalecimiento institucional, con interés en proyectos académicos vinculados con sostenibilidad, territorio y responsabilidad social.
- ☉ Dr. Jesús Águila León. Profesor investigador del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara, adscrito al Departamento de Estudios del Agua y la Energía. Sus líneas de investigación incluyen energías renovables, microrredes eléctricas, generación distribuida, electrónica de potencia, inteligencia artificial, algoritmos de optimización, internet de las cosas, monitoreo y análisis de datos energéticos.
- ☉ Dr. Jesús Barrera Rojas. Ingeniero Ambiental y Profesor Investigador Asociado del Departamento de Estudios del Agua y de la Energía del Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara. Coordina el Laboratorio de Bioingeniería del Agua. Sus líneas de investigación integran tratamiento de agua, biotecnología ambiental, sistemas aerobios y anaerobios, y caracterización de comunidades microbianas.
- ☉ Dr. Joel Kelly Gurubel Tun. Profesor investigador de tiempo completo en la Universidad de Guadalajara y doctor en Ingeniería Eléctrica por el CINVESTAV. Sus líneas de investigación se enfocan en energías renovables, tratamiento de aguas residuales, sistemas de monitoreo, control de procesos y desarrollo de soluciones tecnológicas aplicadas a problemas ambientales.
- ☉ Mtro. Jorge A. Escobedo Bretado. Ingeniero Mecánico y Maestro en Ciencia y Tecnología Ambiental. Su trabajo se orienta al diseño, simulación y optimización de sistemas energéticos mediante simulación dinámica, con aplicaciones en procesos de transformación de productos del sector primario y en el aprovechamiento eficiente de recursos.

- ☼ Ing. José Armando Becerra Hernández. Ingeniero en Nanotecnología y estudiante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería del Agua y la Energía del Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara. Su investigación se centra en el desarrollo de puntos cuánticos de carbono para concentradores solares luminiscentes y aplicaciones relacionadas con energía.
- ☼ Dr. José Antonio Rubio González. Profesor de Tiempo Completo del Departamento de Estudios del Agua y de la Energía del Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara. Sus líneas de trabajo se orientan a la eficiencia energética, la gestión de energía y la optimización de procesos, con interés en su aplicación a sistemas de tratamiento, calidad y uso responsable del agua.
- ☼ M.I. Luis Antonio López Martínez. Investigador del Centro de Estudio de las Energías Renovables del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California. Su trabajo se enfoca en el desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de energías renovables, especialmente en desalinización, enfriamiento termosolar y sistemas de captación y almacenamiento de energía térmica.
- ☼ Dra. Margarita Castillo Téllez. Investigadora de la Universidad Autónoma de Campeche y miembro del SNII. Especialista en energías renovables, secado solar, gestión del agua y tecnologías sostenibles. Ha impulsado proyectos de vinculación, gestión ambiental y aprovechamiento sustentable de los recursos, y ha participado activamente en iniciativas académicas y profesionales orientadas al desarrollo sostenible.
- ☼ Dra. Martha Fabiola Martín del Campo Solís. Profesora investigadora del Centro Universitario del Norte de la Universidad de Guadalajara. Es Ingeniera Química, con Maestría y Doctorado en Ciencia y Tecnología con orientación en Biotecnología Productiva. Sus líneas de trabajo se vinculan con procesos biotecnológicos, salud comunitaria, formación transdisciplinar y aplicaciones científicas para el desarrollo regional.
- ☼ Dr. Nicolás Velázquez Limón. Investigador y Jefe del Centro de Estudio de las Energías Renovables del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California. Su trabajo se enfoca en energía solar térmica, desalación, enfriamiento termosolar y desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de energías renovables en aplicaciones hídricas y energéticas.
- ☼ Dr. Octavio García Valladares. Investigador Titular C del Instituto de Energías Renovables de la UNAM y miembro del SNII, nivel III. Ha sido reconocido con

el Premio al Mérito Ecológico por sus aportes al conocimiento ambiental y la sustentabilidad. Sus líneas de investigación incluyen calentamiento solar de agua y aire, así como secado solar de alimentos.

- ☼ Dr. Rachid Marzoug. Físico, Maestro en Instrumentación y Telecomunicaciones y Doctor en Física Computacional por la Universidad Mohammed V, en Rabat, Marruecos. Es Profesor Investigador de Tiempo Completo en el Centro Universitario del Norte de la Universidad de Guadalajara y miembro del SNII. Sus líneas de investigación incluyen modelado y simulación de sistemas complejos, sistemas de transporte y autómatas celulares.
- ☼ Dra. Roxana Berenice Recio Colmenares. Profesora investigadora del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. Es doctora en Agua y Energía. Su trabajo se enfoca en el aprovechamiento de la energía solar, redes neuronales artificiales y desarrollo de tecnologías sostenibles para aplicaciones agroindustriales y ambientales.
- ☼ Dr. Saúl Islas Pereda. Investigador del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California. Su trabajo se enfoca en energías renovables, microrredes, agrovoltaica, sistemas inteligentes de energía y desarrollo tecnológico para comunidades aisladas, con énfasis en soluciones sustentables para los sectores energético, hídrico y agrícola.
- ☼ Dr. Valentín Flores Payán. Profesor investigador del Centro Universitario de la Ciénega de la Universidad de Guadalajara, miembro del SNII, nivel I, y Coordinador de Ingeniería Mecatrónica. Su trabajo se orienta a la ingeniería ambiental con enfoque mecatrónico, incluyendo microplásticos, producción de biogás, tecnologías ambientales y desarrollo sustentable.
- ☼ Dr. Víctor Hugo Romero Arellano. Investigador de la Universidad de Guadalajara. Sus líneas de investigación se orientan al desarrollo de materiales avanzados aplicados a la energía, incluyendo concentradores solares luminiscentes, nanogeneradores triboeléctricos y celdas solares nanoestructuradas.

Prometeo Editores, S.A. de C.V.
Libertad 1457, Col. Americana,
C.P. 44160, Guadalajara, Jalisco

Hecho en México / *Made in Mexico*



Este libro de divulgación científica surge con el propósito de acercar al lector a una línea de investigación que integra agua, energía solar, refrigeración y desalación por congelación. Es un intento de explicar, de manera clara y accesible, cómo la ciencia permite estudiar fenómenos conocidos —como la formación de hielo, la concentración de sales o el aprovechamiento del calor solar— para explorar nuevas alternativas ante problemas reales.

A lo largo de los capítulos se aborda el nexo agua-energía, la desalación como estrategia para obtener agua con menor salinidad, la desalación por congelación como proceso emergente, la energía necesaria para separar sales, el aprovechamiento de la energía solar térmica, la posibilidad de producir frío mediante refrigeración solar y la importancia del modelado antes de construir sistemas experimentales o de pensar en su escalamiento. El recorrido concluye con una reflexión sobre los retos técnicos, energéticos, ambientales y sociales que aún deben abordarse.

El objetivo de esta obra es comunicar de manera sencilla conceptos clave que pueden resultar útiles para estudiantes, docentes, investigadores en formación, tomadores de decisiones y público interesado en tecnologías sostenibles. Por ello, se ha buscado un lenguaje claro, con ejemplos, figuras y explicaciones conceptuales que faciliten la comprensión sin perder el rigor científico.



Prometeo Editores