

E

N

E

R



G

I

A



NOEMÍ  
SOGARI



S

O



L

A

R

APUNTES DE CÁTEDRA • CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
y AGRIMENSURA



## Aplicaciones térmicas de la energía solar

Construcción de sistemas para  
calentar agua y secar productos  
frutihortícolas

T

É

R



M

I

C

A



## **Aplicaciones térmicas de la energía solar**

Construcción de sistemas  
para calentar agua y secar  
productos frutihortícolas



---

Sogari, Noemí

Aplicaciones de la energía solar : construcción de sistemas para calentar agua y secar productos frutihortícolas / Noemí Sogari ; contribuciones de Carlos Alejandro Gómez. - 1a edición para el alumno - Corrientes : Editorial de la Universidad Nacional del Nordeste EUDENE, 2022.

Libro digital, PDF/A - (Apuntes ; 1)

Archivo Digital: descarga

ISBN 978-950-656-207-6

1. Energía Solar. 2. Energía Térmica. 3. Energía Térmica Solar. I. Gómez,  
Carlos Alejandro , colab. II. Título.

CDD 621.47

---

**Edición:** Natalia Passicot

**Corrección:** Irina Wandelow

**Diseño y diagramación:** Julia Caplan



© EUDENE. Secretaría de Ciencia y Técnica,  
Universidad Nacional del Nordeste, Corrientes, Argentina, 2022.

Queda hecho el depósito que marca la ley 11.723.  
Reservados todos los derechos.

25 de Mayo 868 (cp 3400) Corrientes, Argentina.  
Teléfono: (0379) 4425006  
[eudene@unne.edu.ar](mailto:eudene@unne.edu.ar) / [www.eudene.unne.edu.ar](http://www.eudene.unne.edu.ar)

# **Aplicaciones térmicas de la energía solar**

## Construcción de sistemas para calentar agua y secar productos frutihortícolas

NOEMÍ SOGARI

GIESMA - DPTO. DE FÍSICA  
FACENA - UNNE



.....  
.....



*A María Elena y Manuel, mis padres, a quienes les debo la vida y lo que soy.  
A mi hermana Elena, que siempre está a mi lado.*

# Índice

|   |    |
|---|----|
| Presentación.....   | 8  |
| Capítulo 1. <b>Energía y medioambiente</b> .....          | 10 |
| La crisis del petróleo .....                              | 10 |
| El efecto invernadero.....                                | 12 |
| El cambio climático .....                                 | 15 |
| Protocolo de Kioto.....                                   | 16 |
| Capítulo 2. <b>Las energías renovables</b> .....          | 20 |
| Fuentes de las energías renovables.....                   | 20 |
| La energía solar .....                                    | 21 |
| La energía eólica .....                                   | 22 |
| La energía geotérmica.....                                | 25 |
| La energía hidráulica.....                                | 26 |
| La energía de biomasa .....                               | 27 |
| Capítulo 3. <b>Energía solar</b> .....                    | 30 |
| <i>Noemí Sogari y Carlos Alejandro Gómez</i>              |    |
| El Sol como fuente de energía.....                        | 30 |
| La constante solar .....                                  | 31 |
| La radiación solar .....                                  | 33 |
| Conceptos básicos .....                                   | 34 |
| Ángulos de posición solar e influencia sobre la radiación | 36 |
| Definiciones de los ángulos de posición .....             | 37 |
| Relaciones entre los ángulos de posición .....            | 39 |
| Capítulo 4. <b>Calefón solar</b> .....                    | 42 |
| Colectores solares planos .....                           | 42 |
| Partes de un colector .....                               | 43 |
| Funcionamiento .....                                      | 44 |
| Balance energético.....                                   | 45 |
| Coeficiente total de pérdidas de calor.....               | 47 |
| Construcción e instalación .....                          | 52 |
| Descripción general del sistema .....                     | 53 |
| Recomendaciones .....                                     | 57 |
| Capítulo 5. <b>Secaderos solares</b> .....                | 59 |
| Secado de productos frutihortícolas .....                 | 59 |
| Contenido de humedad .....                                | 60 |
| Velocidad de secado.....                                  | 61 |
| Actividad del agua.....                                   | 62 |
| Isotermas de sorción.....                                 | 64 |

|   |    |
|---|----|
| Secaderos solares.....                            | 65 |
| Clasificación.....                                | 65 |
| Secadero solar indirecto tipo gabinete.....       | 67 |
| Construcción del secador .....                    | 68 |
| Armado del colector solar .....                   | 68 |
| Armado de la cámara de secado .....               | 69 |
| Preparación de los productos frutihortícolas..... | 70 |
| Algunos tratamientos previos al secado .....      | 71 |
| Envasado .....                                    | 72 |

# Presentación

La sostenibilidad y el desarrollo sustentable regional presentan una estrecha relación entre el mantenimiento y la mejora de la calidad de vida de las comunidades, pero, para alcanzar estos objetivos, se necesitan cambios políticos, socioeconómicos, educativos y ambientales.

Desde el punto de vista energético, se requiere de la implementación de políticas nacionales concretas que introduzcan criterios de eficiencia energética, evitando así el consumo desmedido y de gestión del cuidado de los recursos naturales.

Con relación al aspecto socioeconómico, el uso de las energías renovables contribuye al desarrollo sustentable de las comunidades; sin embargo, la adquisición de un sistema térmico o fotovoltaico que aproveche la energía solar en el mercado resulta oneroso para muchas familias que no pueden invertir sumas importantes de dinero para comprar un calefón o un secadero solar. Por ello, los programas de extensión y publicaciones sobre transferencia tecnológica promovidos por el gobierno nacional y ejecutado a través de las universidades son un medio de gran utilidad para acercar a las distintas comunidades el conocimiento y la técnica necesaria para emplear los sistemas que aprovechan las energías no convencionales.

Respecto al punto de vista educativo-ambiental, el uso de las energías renovables es un tema investigado y tratado ampliamente a nivel nacional e internacional, aunque en Argentina se despertó el interés en los últimos 10 años con mayor intensidad. Las instituciones educativas constituyen un medio de difusión y capacitación de las comunidades en el uso y aprovechamiento de las energías renovables.

Este libro transfiere información sobre el uso de tecnología simple para mejorar la calidad de vida de las comunidades. Contiene los fundamentos teóricos y los conocimientos necesarios para construir dos sistemas térmicos que utilizan energía solar para calentar agua y para deshidratar productos frutihortícolas.

Los estudiantes avanzados de Ingeniería, Licenciatura en Ciencias Físicas y estudiantes de escuelas técnicas interesados en estudiar en profundidad sus funcionamientos y



mejorar el rendimiento de cada dispositivo encontrarán en este manual las expresiones matemáticas necesarias para cumplir sus objetivos.

Para la comunidad en general, interesada en construir un sistema que aproveche la energía solar para calentar agua o secar productos frutihortícolas, las indicaciones de los capítulos 4 y 5 serán de gran utilidad al personal de apoyo técnico.



# Capítulo 1

## Energía y medioambiente

El universo en su totalidad requiere de energía, el movimiento de los planetas, el crecimiento de las plantas, el vuelo de las aves. Todo, absolutamente todo, funciona gracias a algún tipo de energía.

### LA CRISIS DEL PETRÓLEO

Hasta fines del siglo XVIII, el hombre utilizó la madera como principal fuente de energía para uso doméstico (cocina y calefacción) y es por ello que a este periodo se lo denominó era de la madera.

La llegada del siglo XIX marcó el inicio de la era industrial que propició la era del carbón con la máquina de vapor, esta fuente de energía suplantó a la madera para dar movimiento a los barcos, trenes y a la industria en general.

El siglo XX fue testigo de la aparición del petróleo, una nueva fuente de energía que facilitaría el dinamismo industrial, pero llevaría al mundo entero a la dependencia.

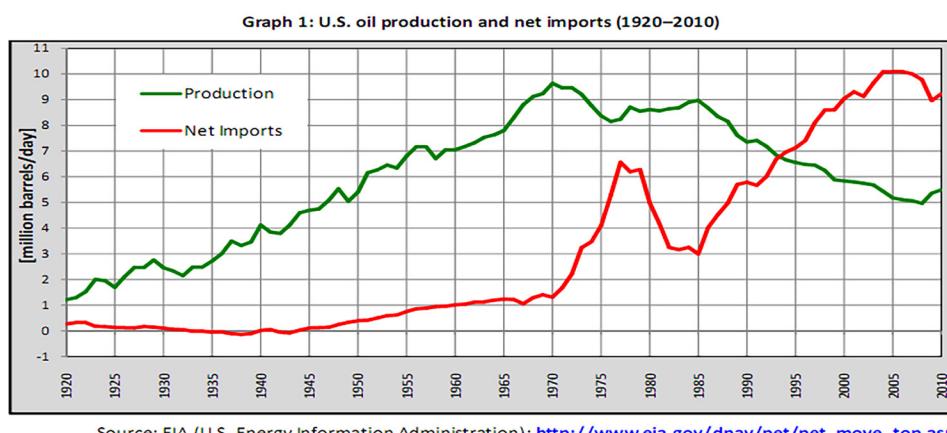
Esta historia se inició en la década de 1850, cuando los primeros pozos fueron perforados y se extrajo «aceite de las rocas» (*petra oleum*). Sin embargo, ya desde entonces se advirtió que el petróleo era un recurso finito.

Marion King Hubbert (1903-1989), geólogo petrolero que trabajaba en el laboratorio de investigación de Shell en Houston, Texas, presentó en 1956 una ponencia en el American Petroleum Institute, en San Antonio, Texas, indicando que la producción de EE.UU. de petróleo alcanzaría su punto máximo alrededor de 1970 (Deffleyes, 2002; Hubbert King, 1956):

De acuerdo con la mejor información actualmente disponible, la producción de petróleo y gas natural en una escala mundial llegará probablemente a su clímax dentro de medio siglo, mientras que, tanto para los Estados Unidos como para Texas, el cenit de sus producciones puede esperarse que ocurran dentro de los próximos 10 o 15 años. (Hubbert King, 1956)



Hubbert fue duramente criticado y ridiculizado por su contundente pronóstico, incluso por sus contemporáneos, pero en 1970 su pronóstico empezó a parecer acertado. A partir de 1973, la cantidad de petróleo importado aumentó estrepitosamente respecto del producido en Estados Unidos (ver Figura 1.1). Desde entonces, a pesar de los intentos frenéticos de EE.UU. por obtener petróleo, la producción ha estado en declive terminal. Las importaciones netas de petróleo, en 1993, superaron a la producción nacional y para 2005 las importaciones netas fueron inclusive superiores a la producción nacional de petróleo del 70.



**Figura 1.1.** Importación neta y producción de petróleo en Estados Unidos (US Energy Information Administration-EIA, 2017).

La estampida brusca del precio del crudo en 1973 fue un fuerte llamado de atención para la humanidad respecto a la dependencia de una fuente energética cuyo consumo, para esa época, ya había sido de un octavo de su riqueza en crudo accesible (Campbell y Laherrere, 1998).

La crisis del petróleo en la década del 70 fue un claro aviso de que tal fuente no era inagotable y que, de seguir con el consumo desmedido existente, el recurso no duraría más de 40 años.

Sin embargo, el llamado de atención no sirvió para que se definieran políticas tendientes a disminuir o al menos mantener invariable la producción anual de petróleo en el mundo.

Las fuentes de energía primaria suministran electricidad, transporte y energía necesaria para procesos industriales y acondicionamiento térmico de las viviendas. La producción, transformación y consumo irracional final de tal cantidad de energía es la causa principal de la degradación ambiental.

No obstante, el agotamiento de los combustibles fósiles en un tiempo inmediato no es el único problema, a pesar de que el consumo actual es 100 000 veces más rápido que su velocidad de formación, sino que la verdadera cuestión es el calentamiento global

provocado por la acumulación en la atmósfera de dióxido de carbono y otros gases de invernadero.

El calentamiento global y sus graves consecuencias, la disminución del suministro del petróleo y del gas natural, como también el aumento desmedido de sus precios, indican que resulta necesario redirigir nuestro enfoque hacia una economía basada en reducciones en el uso del elemento carbono, principal componente de los gases causantes del efecto invernadero. Además del carbón, el petróleo y el gas natural constituyen las fuentes principales del aporte de dióxido de carbono y otros gases causantes del efecto invernadero.

## **EL EFECTO INVERNADERO**

El efecto invernadero es un proceso natural por el que los gases que están presentes en la atmósfera «atrapan» la radiación que la Tierra, a su vez, reemite al espacio. Esta emisión de la Tierra es producto del calentamiento de su superficie por la radiación solar. Así, el efecto invernadero hace que la temperatura media de la Tierra sea alrededor de 33 °C mayor que si este proceso no ocurriera.

La radiación solar que llega a la Tierra pertenece, principalmente, al espectro visible y al infrarrojo cercano y, en menor proporción, al ultravioleta. De la energía que llega a la Tierra, aproximadamente un 26% es devuelto al espacio por reflexión en la atmósfera. El 19%, aproximadamente, es absorbido por las nubes, gases y partículas de la atmósfera. El 55% restante, luego de atravesar la atmósfera, alcanza la superficie terrestre, la que refleja un 4%. El 51% restante es responsable del calentamiento de la Tierra, la fotosíntesis de las plantas, etc. Al aumentar la temperatura de la superficie terrestre, esta emite radiación electromagnética de longitud de onda del espectro infrarrojo. La mayor parte de esta radiación emitida la absorben los gases presentes en la atmósfera. Las moléculas de esos gases se excitan por el efecto de la radiación absorbida y emiten, a su vez, radiación que absorbe la superficie terrestre. Este es el efecto invernadero, el que naturalmente hace que la temperatura en la Tierra sea templada. Sin embargo, cuando el balance entre la radiación absorbida y la emitida se altera por una variación del efecto de barrera de la atmósfera, debido a la concentración de los gases, el desequilibrio provoca el aumento de la temperatura de manera significativa. El incremento de la temperatura induce al cambio climático y ello, a los grandes desastres «naturales» que debe enfrentar la humanidad.

El Sol emite energía en forma de radiación de onda corta que calienta la superficie terrestre, los océanos y los hielos, y la energía devuelta en dirección al espacio exterior corresponde a la radiación de onda larga que es retenida momentáneamente por el vapor de agua, el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ) y otros gases como los clorofluorocarbonos, los hidrofluorocarbonos, los perfluorocarbonos, el óxido nitroso y el hexafluoruro de azufre, entre los más importantes (ver Figura 1.2). Los gases que tienen esta propiedad se denominan Gases de Efecto Invernadero (GEI).

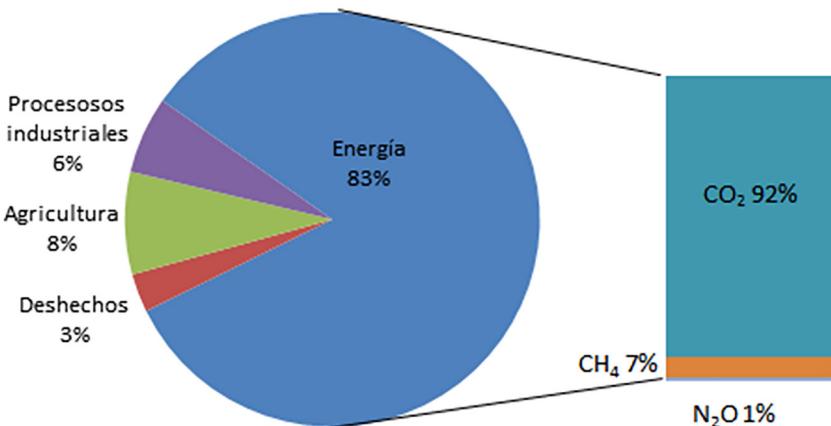
Los productos de muchas de las actividades humanas contribuyen en forma sustancial al incremento del efecto invernadero como, por ejemplo, la quema de combustibles fósiles, la agricultura, la ganadería, la deforestación, algunos procesos industriales y los depósitos de residuos urbanos, que provocan el aumento de las concentraciones de estos gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera.

El aumento de las concentraciones de los GEI hace que la capacidad de la atmósfera de retener parte de la energía reflejada por la Tierra aumente, lo que produce finalmente el calentamiento global, propiciando además una modificación radical del clima mundial.



**Figura 1.2.** Efecto invernadero (Eduardo Ricciardi y Noemí Sogari, Grupo de investigación, desarrollo y transferencias de energías sustentables y del medioambiente [Giesma]).

Entre las múltiples actividades humanas que producen gases de efecto invernadero, el uso de la energía representa por lejos la mayor fuente de emisiones. La energía representa más del 80% de los gases de efecto invernadero en el mundo, con las emisiones resultantes de la producción, transformación, manipulación y consumo de todo tipo de productos energéticos (ver Figura 1.3). Las actividades correspondientes a la agricultura o a la cría de ganado, como los procesos industriales no relacionados con la energía, producen solo el 8%, principalmente  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y gases fluorados.



**Figura 1.3.** Contribución a la concentración de gases de efecto invernadero (datos de la Statistical Review of World Energy, BP, 2017, citados por Noemí Sogari).

Dos sectores, electricidad y calor y transporte, producen alrededor de las dos terceras partes del 83% de emisión del CO<sub>2</sub> en el mundo. La generación de electricidad y calor fue desde siempre el mayor productor de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

La creciente demanda mundial de energía a partir de los combustibles fósiles desempeña un rol fundamental en la tendencia alcista de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Desde la Revolución industrial, las emisiones procedentes de la quema de combustibles aumentaron dramáticamente y, sumado a la deforestación, han contribuido a la creciente incorporación de gases de efecto invernadero y con ello el aumento de temperatura media global.

La relación entre el cambio climático y la energía consumida es una parte del desafío más amplio del desarrollo sostenible. La grave crisis ambiental y el agotamiento de los recursos son factores que obligan a encarar una nueva política energética. A corto plazo, la prioridad es incrementar la eficiencia energética, aunque esta tiene unos límites económicos y termodinámicos, por lo que a más largo plazo solo el desarrollo de las energías renovables permitirá resolver los grandes retos del futuro.

El Estado juega un rol fundamental, puesto que es quien debe implementar leyes que reglamenten el uso racional y sustentable de la energía. La propuesta debe basarse en diversificar los suministros de energía y en promover la eficiencia energética incrementando la participación de las fuentes de energías renovables.

Las concentraciones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera son naturalmente reguladas por muchos procesos que forman parte del ciclo global del carbono. Si bien los procesos naturales como la fotosíntesis de las plantas pueden absorber algunas de las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub> producidas cada año, las emisiones han excedido la capacidad de estos procesos para absorber carbono. Este desequilibrio entre las emisiones de gases de efecto invernadero y la capacidad de los procesos naturales para absorber

dichas emisiones ha dado lugar a un aumento continuo de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero. Las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera han aumentado en un 40% desde mediados del siglo XIX.

La combustión de un litro de gasolina (95 o 98) en promedio aporta 2,4 kg de CO<sub>2</sub>. Un automóvil consume en promedio 7 l de gasolina cada 100 km. Eso significa que, tras recorrer 100 km, se aportaron 16,8 kg de CO<sub>2</sub> al ambiente.

## EL CAMBIO CLIMÁTICO

Los expertos calculan con certeza virtual que el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero tiende a calentar el planeta. En modelos computarizados, las crecientes concentraciones de gases de efecto invernadero producen un aumento en la temperatura media de la superficie de la Tierra a lo largo del tiempo. El aumento de las temperaturas puede producir cambios en los patrones de precipitación, la severidad de la tormenta y el nivel del mar. Colectivamente, estos cambios se conocen comúnmente como *cambio climático*.

Las evaluaciones del Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC), en el informe presentado a los gobiernos parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), aseguran que el aumento de la temperatura global de 1 °C es un hecho y que la actividad humana que afecta a la atmósfera es probablemente un importante factor impulsor:

Es muy probable que más de la mitad del incremento observado en la temperatura media global de la superficie de 1951 a 2010 haya sido causado por el aumento antropogénico de las concentraciones de gases de efecto invernadero y otros forzamientos antropogénicos juntos. (IPCC, 2014)

En el informe, además, se estableció la meta de limitar el calentamiento global por debajo de 2 °C, dado que esto traería consecuencias insalvables para la vida en la Tierra. Los impactos del cambio climático aumentarán el riesgo de formación de huracanes, inundaciones y deslizamientos de tierra en las zonas urbanas debido a las precipitaciones extremas, la disminución en la disponibilidad del agua en las zonas semiáridas y las regiones que dependen del derretimiento de los glaciares, la disminución de la producción y la calidad de los alimentos, y la propagación de enfermedades transmitidas por vectores (IPCC, 2014).

El cambio climático, consecuencia del calentamiento global, es uno de los mayores desafíos que deberá enfrentar la humanidad en los próximos años. Incremento de las temperaturas, deshielo de los glaciares, multiplicación de las sequías y de las inundaciones, todo apunta a que el cambio climático, sin lugar a dudas, ha comenzado. Los riesgos son inmensos para el planeta hoy y para las generaciones futuras, por lo tanto, se debe actuar de forma urgente.

El incremento de la temperatura media no resulta homogéneo sobre el planeta, ya que en algunas regiones llega a ser bastante mayor. Como consecuencia, el sistema climático global se presenta alterado con aumento de temperaturas, modificaciones en los regímenes de precipitaciones en muchas regiones e incrementos de la frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos, generadores de inundaciones y sequías.

El calentamiento global tiene impacto también sobre el nivel del mar. En el último siglo, este ha crecido 20 cm y, según se desprende de los escenarios del IPCC, este ritmo de crecimiento se podría incrementar en el futuro.

La magnitud y velocidad de ocurrencia del cambio climático alteraría la biosfera a corto plazo, provocando la emigración y extinción de numerosas especies. Los cambios en la biosfera también afectarían las actividades humanas en general y, muy particularmente, las que son críticamente dependientes del clima como la agricultura. Además, provocarían efectos adversos sobre la salud humana debido al desplazamiento de algunos vectores transmisores de enfermedades.

Se define como cambio global, entonces, a la integración de los problemas ambientales causados por hechos que tienen su origen en las actividades humanas y que dependen de la cantidad de la población planetaria, su nivel de consumo (en particular energético) y la elección de las tecnologías. Estas causas son las que conducen, entre otras, al calentamiento terrestre, al adelgazamiento de la capa de ozono, a la modificación de la biodiversidad, a la desertificación, a las precipitaciones ácidas y a la eutrofización de las aguas.

La Unión Europea (UE) lleva varios años en la lucha contra el cambio climático, tanto a escala europea como internacional, que figura entre las prioridades de su programa y queda reflejada en su política climática. A diferencia de otros continentes, ha integrado el control de los gases de efecto invernadero en el conjunto de sus ámbitos de actuación para alcanzar los siguientes objetivos: consumir de forma más racional una energía menos contaminante, disponer de medios de transporte más limpios y equilibrados, responsabilizar a las empresas sin poner en peligro su competitividad, obrar de manera que el ordenamiento territorial y la agricultura estén al servicio del medio ambiente, y crear un entorno favorable para la investigación y la innovación.

## **PROTOCOLO DE KIOTO**

El Protocolo de Kioto es uno de los instrumentos jurídicos internacionales más importantes destinado a luchar contra el cambio climático. Tiene su origen en la Convención

Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático que fue aprobada en la sede de las Naciones Unidas en Nueva York, el 9 de mayo de 1992.

El sucesor de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático fue adoptado en diciembre de 1997 por los países industrializados y la UE. Contiene los compromisos asumidos por los países industrializados de reducir sus emisiones de algunos gases de efecto invernadero, responsables del calentamiento global.

El objetivo fundamental del protocolo apunta a que las emisiones totales de los países desarrollados deben reducirse durante el periodo 2008-2012 al menos en un 5% respecto a los niveles de 1990.

La entrada en vigor del Protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1998) es un primer paso esencial para combatir el cambio climático. Es el único acuerdo a nivel mundial para limitar la contaminación causante del calentamiento del planeta.

Para cumplimentar el objetivo del protocolo, la Comisión expuso la necesidad de asumir las siguientes obligaciones:

1. La adopción de objetivos jurídicamente vinculantes relacionados con la reducción de las emisiones de 6 gases de efecto invernadero: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ );
2. Los Estados miembros cumplen conjuntamente sus obligaciones distribuyéndose la carga («burbuja comunitaria»);
3. La existencia de «mecanismos flexibles»;
4. El refuerzo de las obligaciones en materia de comunicación de la información.

La reducción de las emisiones de dióxido de carbono exige la adopción de medidas que afectan a la energía, los transportes, la agricultura, la industria, etc. Al respecto, la Comisión presentó una serie de iniciativas que deberán seguir desarrollándose:

- Sector de la energía: fomento de la utilización de las energías renovables y de una utilización más racional de la energía.
- Sector del transporte: medidas sobre emisiones de los vehículos particulares, mejor tarificación, realización del mercado interior de transporte ferroviario, desarrollo de un transporte modal integrado.
- Sector de la agricultura: intensificación de la investigación en virtud del Quinto Programa Marco, medidas de reforestación adecuadas, promoción de los cultivos destinados a la producción de energías renovables en el marco de la retirada voluntaria de tierras, mejora de la alimentación del ganado, reducción del uso de fertilizantes.
- Sector industrial: promoción de tecnologías innovadoras limpias.

El comercio internacional de los derechos de emisión permite a las partes signatarias del protocolo que consiguen un nivel de emisiones inferior a la cantidad que les ha sido atribuida: vender una parte de sus derechos de emisión a otras partes. En el contexto comunitario,

el comercio de los derechos de emisión o *burbuja comunitaria* permite distribuir el esfuerzo entre los Estados miembros.

Las partes que cumplan con el acuerdo serán beneficiadas con los mecanismos flexibles, entre los que se encuentran el Comercio de Emisiones, el Desarrollo Limpio (ejecución de proyectos en países en desarrollo) y la Aplicación Conjunta (ejecución de proyectos en países industrializados como Rusia, Asia, etc.)

Europa mantiene un fuerte compromiso en favor del cuidado del medio ambiente (la protección de la calidad del aire y el agua, la conservación de los recursos y de la biodiversidad, etc.) proponiendo medidas correctoras concretas, estableciendo disposiciones transversales e integradas en otras políticas, como la política europea de medioambiente, basada en el artículo 174 del Tratado de la Comunidad Europea, cuyo objetivo es garantizar un desarrollo sostenible del modelo europeo de sociedad. La Comisión Europea, en los programas de cooperación y en sus intervenciones conjuntas con otros organismos de ayuda (Banco Europeo de Reconstrucción y Desarrollo, Banco Europeo de Inversiones y Banco Mundial) propuso adoptar medidas para que el proceso de transformación económica integre y complete la realización de los objetivos relacionados con el clima y el cuidado del medioambiente.

Resulta imprescindible determinar de qué manera corregiremos nuestro comportamiento como consumidores, ahondar esfuerzos en invertir en la generación de energía limpia y lograr una reeducación general de la humanidad para que use la energía en forma responsable y aprenda a coexistir nuevamente con su medio en un equilibrio natural.



## Referencias bibliográficas

- BP (2017). «Renewables energy». *Statistical Review of World Energy*. Disponible en <https://stanford.io/3PoSBof> Consulta: 15/12/2017.
- CAMPBELL, Colin y Laherrere, Jean (1998). «Fin de la era del petróleo barato». *Investigación y Ciencia*, (260), 66-71.
- DEFFLEYES, Kenneth (2002). *Hubbert's Peak: The Impending Oil Shortage*. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press.
- HUBBERT, King M. (1956). «Nuclear Energy and the Fossil Fuels». *Shell Development Company, Exploration and Production Research Division*, (95). Houston, Texas: American Petroleum Institute. Disponible en <https://bit.ly/3OLQiOY>
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2014). «Climate Change 2014. Synthesis Report». En Core Writing Team, Parhauri, R.K. y Meyer, Leo (eds.) *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ginebra, Suiza: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y Organización Meteorológica Mundial. Disponible en <https://bit.ly/2Kf8rac> Consulta: 12/2017.
- \_\_\_\_\_ (2001). «Climate Change 2001: Synthesis Report». En Core Writing Team y Watson, R. (eds.) *Contribution of Working Groups I, II and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Reino Unido: Cambridge University Press. Disponible en <https://bit.ly/3afK7DS>
- Naciones Unidas (1998). *Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. Naciones Unidas.
- US Energy Information Administration (2017). *Annual Energy Outlook 2017 with projections to 2050*. EE.UU.: AEO Working Groups. Disponible en <https://stanford.io/3yG54Bl> Consulta: 10/12/2017.
- The European Forum for Renewable Energy Sources [Eufores] (2012). *Energy bulletin*. Recuperado de [www.eufores.es](http://www.eufores.es) Consulta: 12/2017.



## Capítulo 2

# Las energías renovables

### FUENTES DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

El desarrollo socioeconómico de un país indiscutiblemente está vinculado en la actualidad al tecnológico. Dicho desarrollo tecnológico requiere del uso de ciertos tipos de energía, entre ellas, la eléctrica. Los sistemas de información y comunicación, los equipos eléctricos y electrónicos contribuyen exponencialmente al hacer más cómodas las tareas del hogar, como también a las labores industriales.

La demanda energética mundial crece también en forma exponencial y esto nos lleva a pensar en la disponibilidad de los recursos naturales existentes. Esos recursos naturales, fuentes de energía convencional y no convencional, deben ser usados en forma sustentable y sostenible no solo para su conservación en el tiempo, sino para evitar alterar el ambiente contaminando la atmósfera y atentando contra la biodiversidad.

Las fuentes de energía no renovables están almacenadas en cantidades fijas y finitas. Su consumo conlleva al agotamiento. La factibilidad técnica y económica de su explotación son los límites del ritmo de extracción, obtención y consumo.

Las energías renovables son aquellas formas de energía no consumibles que no dependen de recursos finitos y que no tienen una relación desequilibrada entre su consumo y producción. Este tipo de energía puede explotarse ilimitadamente, puesto que administrándola adecuadamente puede utilizarse sin disminuir su disponibilidad. Particularmente, se consideran como tales la energía hidroeléctrica, la eólica, la solar, tanto térmica como fotovoltaica, la biomasa y la energía geotérmica. Al mismo tiempo, los residuos urbanos y otros residuos orgánicos, aunque consumibles, también suelen clasificarse como fuentes de energía renovables. La enumeración de los diferentes tipos de energías renovables incluye, además, toda una serie de tecnologías aún en vías de experimentación o de demostración de su viabilidad económica, como son la energía de las olas, de las mareas (mareomotriz), de rocas calientes y secas, o las pilas de combustible (hidrógeno).

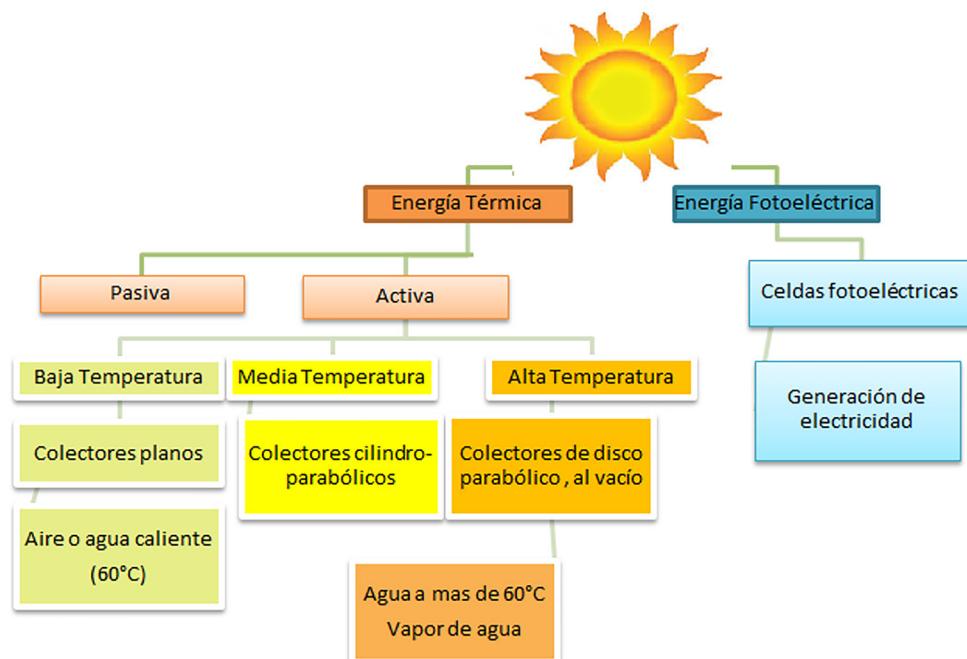


La World Commission on Environment and Development (WCED, 1987) indica en su informe que la *tecnología* es un enlace imprescindible entre nosotros los humanos y la naturaleza. Cabe agregar que la tecnología desempeña un rol importante en el aprovechamiento y explotación de los recursos naturales. Para lograr un desarrollo sustentable, se necesita asimismo que la tecnología empleada lo sea. Vanamente se puede promocionar el uso de las energías renovables para lograr un desarrollo sustentable de las comunidades, si la tecnología empleada resulta contaminante y produce alteraciones en las biodiversidades regionales.

Por tanto, la decisión de usar las energías renovables debe acompañarse de elegir sistemas tecnológicos sustentables, lo menos contaminantes posibles, y este análisis deben realizarlo en forma conjunta los distintos actores profesionales, usuarios, comunidad, gobernantes, etc.

### **La energía solar**

Poder aprovecharla requiere de dispositivos que capten la energía proveniente del Sol para ser transformada en térmica aprovechada en forma de calor (energía térmica) o bien para ser convertida en electricidad (energía fotoeléctrica).



**Figura 2.1.** Aplicaciones de la energía solar (Giesma).

El aprovechamiento de la energía solar se puede llevar a cabo de dos modos: pasivo y activo.

El aprovechamiento pasivo no requiere de ningún dispositivo para captarla. La luz solar puede ser usada en forma directa para iluminar recintos. En arquitectura puede usarse en forma de energía térmica, para calefaccionar los recintos situados en climas fríos (la orientación de la vivienda, dimensión de las ventanas, elección de materiales de construcción adecuados, etc., son estudiados y elegidos convenientemente según la ubicación geográfica). Otras aplicaciones comunes son el secado natural de productos agrícolas y de ropa.



**Figura 2.2.** Uso pasivo de la energía solar (datos aportados por la consultora Roland Berger).

El aprovechamiento activo de la energía solar se basa en la captación de la radiación solar por medio de un dispositivo denominado colector. Este dispositivo capta la radiación solar y la convierte en energía térmica. Si la captación se realiza mediante celdas fotovoltaicas, la energía del Sol se convierte en eléctrica, sin pasar por un efecto térmico.

### La energía eólica

Es la que se genera aprovechando las corrientes de aire mediante aerogeneradores que permiten bombear agua o hacen funcionar un generador y, al girar, producen energía eléctrica.

Un aerogenerador capta la energía cinética contenida en el viento y la transforma mediante el trabajo de un rotor en energía mecánica. El movimiento del rotor acciona el sistema de generación que transforma la energía de movimiento rotacional en eléctrica.



**Figura 2.3.** Generadores eólicos (Leaflet, en es.wikipedia.org).

La potencia disponible para los aerogeneradores en la transformación de la energía cinética del aire en movimiento en energía eléctrica está determinada por tres características fundamentales del viento:

**La velocidad del viento.** La energía eléctrica generada es una función de la tercera potencia de la velocidad del viento. Por lo tanto, es relevante contar con datos fiables de velocidad del viento, como también con la dirección y frecuencia para ubicar correctamente los aerogeneradores.

**Turbulencia.** Se refiere al alejamiento de la velocidad del viento de su valor medio en un lapso de tiempo corto. Esta característica incide negativamente sobre la estructura del generador, reduciendo su vida útil.

**Densidad del aire.** La energía cinética del viento es directamente proporcional a la densidad del aire, y esta depende de la temperatura y de la presión. Cuanto mayor es la densidad del aire, mayor es la fluidez de las moléculas en un volumen de aire determinado, lo que significa un rendimiento mayor para una velocidad de viento.

La energía cinética de las partículas de aire se calcula:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Vv^2 \quad (2.1)$$

Donde:  $\rho$  es la densidad del aire a una temperatura dada y  $V$  es el volumen de la masa de aire que atraviesa un área transversal a la dirección del viento.

La potencia del viento disponible se obtiene como:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.2)$$

Esta expresión se asocia a la potencia, a la velocidad media del viento y, para tener un mejor ajuste de la potencia, se debe considerar la distribución de frecuencias de velocidades del viento de un lugar. La densidad de potencia del lugar se calcula:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} * \rho * \sum p(v_i) * v_i^3 \quad (2.3)$$

Donde:  $p(v_i)$  es la probabilidad del viento.

Sin embargo, una turbina no transforma toda la energía cinética del viento en energía eléctrica. Cuando el viento incide sobre las palas de la turbina, reduce su velocidad debido al obstáculo que encuentra a su paso, parte de la energía se transforma en mecánica al poner en movimiento el rotor y parte se transforma en eléctrica. El teorema de Betz indica que la máxima potencia que puede extraer un generador es aquella en que la velocidad del viento, al atravesarla, es un tercio de la que tenía inicialmente sin la perturbación. Se calcula de acuerdo con la expresión:

$$P_{\text{útil máxima}} = 59.3\% * P_{\text{disponible viento}}$$

$$P_{\text{útil máxima}} = 0.593 * \frac{\rho}{2} * A * \sum p(v_i) * v_i^3$$

Las ventajas de los generadores eólicos son aquellas que permiten la obtención de una elevada potencia en un espacio relativamente pequeño y que funcionan tanto de día como de noche. Sin embargo, hay una gran aleatoriedad a la hora de producir electricidad, dado que las corrientes de aire no son constantes y puede haber días en que se genere al máximo de capacidad y días en que los molinos estén prácticamente parados.

Otra ventaja importante es que la energía eólica es renovable y no emite dióxido de carbono, por lo tanto, no contribuye a la contaminación de la atmósfera, resultando un aporte relevante en la lucha contra el cambio climático.

A la hora de proyectar la instalación de enormes y potentes turbinas eólicas, resulta necesario el análisis exhaustivo del impacto que causaría en la biodiversidad especialmente sobre la fauna.

Una de las desventajas de los parques eólicos es que pueden generar impactos adversos directos e indirectos en la biodiversidad marina y terrestre en la fase de construcción,

durante su funcionamiento y mantenimiento (Strickland *et al.*, 2011). Entre los ejemplos de este impacto, pueden citarse las muertes de aves y murciélagos por colisión, muertes de murciélagos por barotrauma pulmonar provocado por cambios en la presión del aire (Baerwald *et al.*, 2008; Hötker, Thomsen y Jeromin, 2006). Las turbinas pueden alterar la circulación diaria de aves y murciélagos (por ejemplo, desde sus lugares de alimentación a posaderos o zonas de cría) y pueden suponer una barrera en las pautas migratorias de determinadas especies de animales (Drewitt y Langston, 2006; Masden *et al.*, 2009).

Estos impactos negativos sobre la biodiversidad podrían reducirse enormemente si previamente se realizara una adecuada evaluación del territorio donde se ubicarán los sistemas. Es decir, deben realizarse estudios de impacto ambiental, teniendo en cuenta distintos períodos del año. Estos estudios deben proporcionar datos reales sobre las clases, la densidad y la distribución de grupos de cada especie animal. Resultaría óptimo que la instalación de los sistemas eólicos se realice en zonas desérticas y despobladas, evitando sobre todo zonas con mayor densidad de animales.

### **La energía geotérmica**

La energía geotérmica es el calor generado entre la corteza y el manto superior de la Tierra. Esta energía se transfiere a la superficie por difusión, por movimientos de convección en el magma (roca fundida) y por circulación de agua en las profundidades. Sus manifestaciones hidrotérmicas superficiales son, entre otras, los manantiales calientes, aguas termales, los géiseres y las fumarolas. Las altas temperaturas en el centro de la Tierra (superiores a los mil grados centígrados) provocan gradientes térmicos que en promedio alcanzan los 25° C por cada kilómetro. El potencial geotérmico almacenado en los 10 km exteriores de la corteza terrestre es aproximadamente 2000 veces mayor que la reserva mundial de carbón.



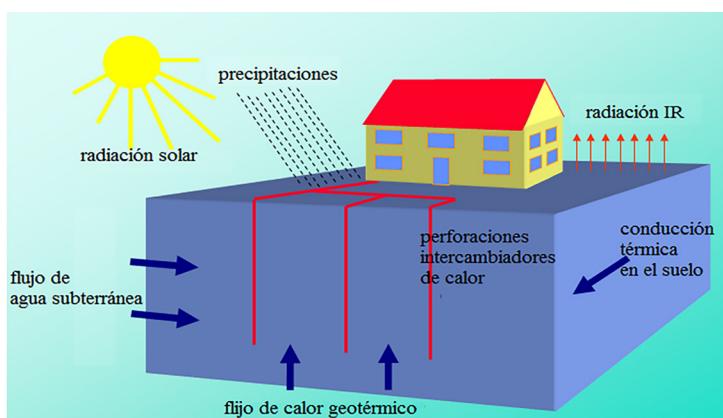
**Figura 2.4.** Geiser (<https://energiasrenovables.com.ar>).

La temperatura de trabajo varía entre 70 y 450 °C, obteniéndose agua caliente para calefacción o vapor de agua para procesos industriales y generación de electricidad.

La otra forma de aprovechar la energía geotérmica es mediante la capacidad de intercambio de calor que ofrece el suelo. Esta nueva tecnología de aprovechamiento de una energía renovable es conocida como almacenamiento subterráneo de energía térmica. Esta tecnología tiene una historia de 50 años, comenzó con el almacenamiento en frío en acuíferos en China. Fuera de China, la idea se empezó a aplicar a principios de la década de 1970.

En este sistema, las temperaturas de almacenamiento pueden variar entre 0 °C y un máximo de 40-50 °C, es decir que el almacenamiento de energía térmica es usado para refrigeración, calefacción y refrigeración combinada, como también para calefacción a baja temperatura.

Los sistemas de almacenamiento subterráneo de energía térmica de alta temperatura tienen temperaturas de almacenamiento superiores a 40 y 50 °C. Las fuentes de calor típicas son colectores solares o de calor residual.



**Figura 2.5.** Sistema artificial intercambiador de calor (proyecto BTES por el Dr. Manfred Reuss).

### Energía hidráulica

Es aquella que se obtiene de las energías cinética y potencial de la corriente de ríos, saltos de agua, etc.

La generación de esta energía, como aprovechamiento del recurso hídrico para la generación de energía, comenzó con el uso de ruedas hidráulicas muy rudimentarias que permitían la producción de fuerza motriz para aliviar el trabajo manual del hombre.

La energía potencial, durante la caída, se convierte en cinética. El agua pasa por las turbinas a gran velocidad, provocando un movimiento de rotación que finalmente se transforma en energía eléctrica por medio de los generadores.

Esta tecnología ha sido optimizada hasta alcanzar un desarrollo tal que se alcanzan altísimos niveles de eficiencia en la conversión de la energía hidráulica en energía eléctrica.

Un ejemplo resulta la central hidroeléctrica Itaipú, cuya potencia instalada es de 12 600 MW.



Figura 2.6. Sistema generador de energía (<https://www.eby.gov.py/>).

Sin embargo, las áreas rurales pobladas, alejadas de las redes de distribución, con requerimientos energéticos insatisfechos constituyen un ámbito propicio donde la pequeña hidrogenación eléctrica puede aplicar su potencial, en tanto se cuente con recursos hídricos locales suficientes.

### La energía de biomasa

Biomasa es toda la materia orgánica contenida en productos de origen vegetal y animal –incluyendo los desechos orgánicos– que puede ser capturada y usada como una fuente de energía química almacenada. La energía que se obtiene de la biomasa proviene de la luz solar, la que gracias al proceso de fotosíntesis es aprovechada por las plantas verdes mediante reacciones químicas en las células, las que toman CO<sub>2</sub> del aire y lo transforman en sustancias orgánicas, según una reacción del tipo:

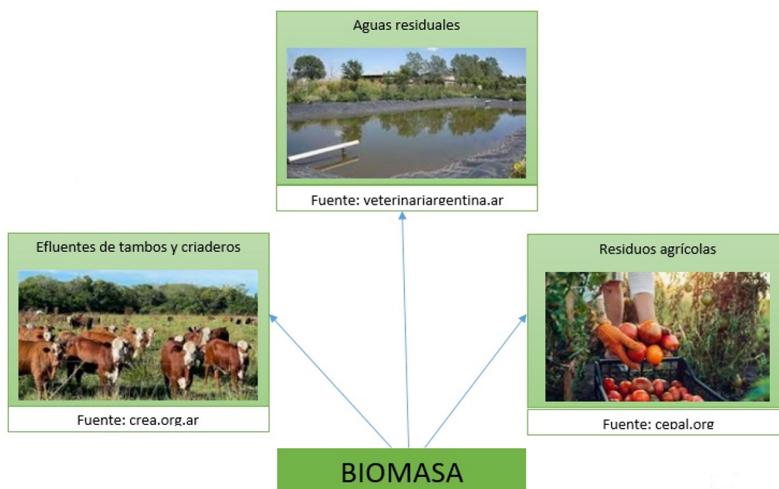
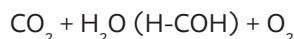


Figura 2.7. Energía de biomasa.

En estos procesos de conversión, la energía solar se transforma en energía química que se acumula en diferentes compuestos orgánicos (polisacáridos, grasas) y que es incorporada y transformada por el reino animal, incluyendo al ser humano, el que invierte la transformación para obtener bienes de consumo.

Una de las tecnologías de gran utilidad usada para el tratamiento de aguas cloacales, efluentes de criaderos y tambos, residuos agrícolas y agroindustriales, usada por India, China y países de Europa era la fermentación anaeróbica.

La fermentación anaeróbica es un proceso natural que se presenta en forma espontánea en la naturaleza y forma parte del ciclo biológico. El denominado «gas de los pantanos» brota en aguas estancadas; este mismo fenómeno puede ser aprovechado bajo condiciones controladas. En este proceso intervienen las denominadas bacterias metanogénicas.

El biogás es un gas producto de la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno por directa acción de microorganismos metanogénicos. Básicamente, está compuesto de gas metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ácido sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), entre otros. La generación de biogás es una de las tecnologías óptimas para obtener energía limpia cuidando el ambiente.

La actividad agropecuaria y agroindustrial genera gran cantidad de residuos orgánicos. En el caso de los criaderos de animales, el estiércol recogido contiene bacterias provenientes de los tractos digestivos de los animales y resultan buena materia prima para la generación de biogás.

La capacidad de generación de biogás puede aumentarse significativamente mezclando el estiércol con restos de alimentos de animales. Los alimentos de consumo animal tienen un elevado potencial de generación de biogás. Se denomina cogeneración a la mezcla de estiércol con otros residuos de alto potencial de generación de biogás.

Un metro cúbico de estiércol porcino genera aproximadamente 1-2  $\text{m}^3$  de biogás, mientras que 2 kg de silaje de maíz genera aproximadamente la misma cantidad de biogás.

Existen distintos tipos de digestores. En cualquier caso, básicamente un sistema generador consta de un fermentador, donde se acumula y degrada la materia, y un acumulador del biogás.



Figura 2.8. Biodigestor instalado en Freising, Alemania (Noemí Sogari).

Las dimensiones del sistema generador dependen de la cantidad de materia disponible y de los requerimientos energéticos. La velocidad de carga del digestor depende de la tecnología instalada en la planta. La temperatura óptima en el interior de la biomasa es alrededor de 36°C, también es necesaria una buena agitación de la materia prima para evitar una sedimentación y/o un efecto de una capa flotante de materias livianas en la superficie de la biomasa.

## Referencias bibliográficas

- BAERWALD, Erin, D'Amours, Genevieve, Klug, Brandon y Barclay, Robert (2008). «Barotrauma is a Significant Cause of Bat Fatalities at Wind Turbines». *Current Biology*, 18(16), R695-R696.
- DREWITT, Alan y Langston, Rowena (2006). «Assessing the Impacts of Wind Farms on Birds», *Ibis*, 148, 29-42.
- HÖTKER, Hermann, Thomsen, Kai-Michael y Jeromin, Heike (2006). *Impacts on Biodiversity of Exploitation of Renewable Energy Sources: The Example of Birds and Bats. Facts, gaps in knowledge, demands for further research, and ornithological guidelines for the development of renewable energy exploitation*. Bergenhusen, Alemania: Michael-Otto-Institut im NABU.
- MASDEN, Elizabeth, Haydon, Daniel, Fox, A.D. Furness, Robert, Bullman, Rhys y Desholm, Mark (2009). «Barriers to Movements: Impacts of Wind Farms on Migrating Birds». *Ices. Journal of Marine Science*, (66), 746-753.
- STRICKLAND, M.D., Arnett, E.B., Erickson, W.P., Johnson, D.H., Johnson, G.D., Morrison, M.L., Shaffer, J.A. y Warren-Hicks, W. (2011). *Comprehensive Guide to Studying Wind Energy/Wildlife Interactions*. Washington, DC: National Wind Coordinating Collaborative.



# Capítulo 3

## Energía solar

CLOTILDE NOEMÍ SOGARI Y CARLOS ALEJANDRO GÓMEZ

### EL SOL, FUENTE DE ENERGÍA

La estructura del Sol y sus características definen la naturaleza de la energía que radia al espacio. Esta energía es debida a la radiación electromagnética que emite el Sol como producto de reacciones termonucleares.

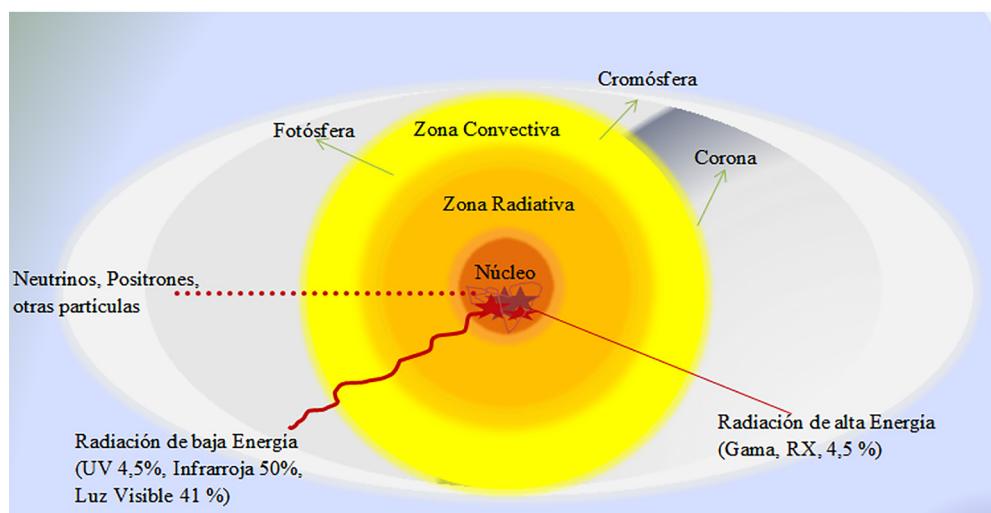


Figura 3.1. El Sol y la radiación solar (Noemí Sogari y Carlos Gómez).

El centro del Sol está formado mayormente por núcleos de hidrógeno que se unen mediante fusión nuclear para formar núcleos de deuterio y tritio: isótopos del hidrógeno y de helio.

Cada vez que ocurre una reacción termonuclear en el centro del Sol, una gran cantidad de energía electromagnética se libera y sale del núcleo solar, atraviesa la capa solar



llamada radiativa y la capa solar de convección para dispersarse fuera del astro, hacia el espacio sideral. Esta energía viaja a 300 000 km por segundo y está formada por ondas y por partículas (fotones).

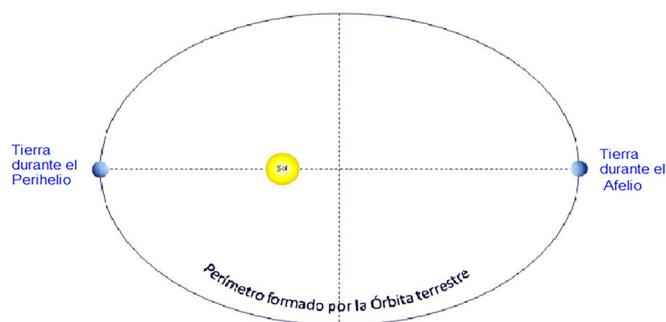
La energía liberada por reacciones termonucleares abandona el Sol en forma de radiación infrarroja, ultravioleta y lumínica, que son las principales formas de energía electromagnética que alcanzan, en mayor o menor proporción, a todos los planetas del sistema solar.

El Sol es una masa gaseosa intensamente caliente de diámetro igual a  $1,39 \times 10^6$  km distante de la Tierra en promedio 149 600 000 km. Y su luz recorre esta distancia en 8 minutos y 19 segundos.

El Sol emite radiación actuando como un cuerpo negro. La temperatura en la región central interior es aproximadamente  $1,36 \times 10^6$  °K y la densidad central es estimada aproximadamente 100 veces la del agua. La radiación emitida pertenece al amplio rango de longitudes de onda del espectro electromagnético. Por lo tanto, se compone de radiación visible, infrarroja y ultravioleta.

### La constante solar

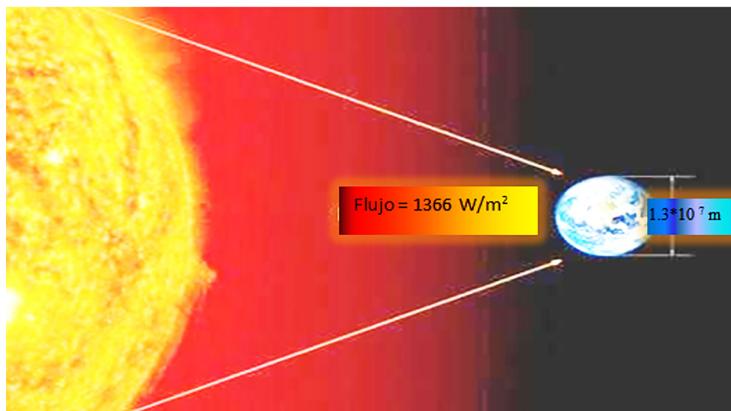
La radiación solar extraterrestre es la radiación solar diaria que se recibe sobre una superficie horizontal situada en el límite superior de la atmósfera. El valor se define a partir del valor de la constante solar. Recordamos que la constante solar se define como la cantidad de radiación que se recibe en la capa superior de la atmósfera, sobre una superficie unidad perpendicular a los rayos solares y a una distancia del Sol media. En consecuencia, para calcular la radiación solar extraterrestre, se debe corregir la constante solar considerando que la distancia Sol-Tierra varía a lo largo del año y pasando también de una superficie perpendicular a los rayos solares a una horizontal a la Tierra (ver Figura 3.2).



**Figura 3.2.** La órbita terrestre no es perfectamente circular, y el Sol no se encuentra en el centro de la elipse descrita por la Tierra en su movimiento alrededor del Sol (datos de Wikipedia adaptados por Giesma).

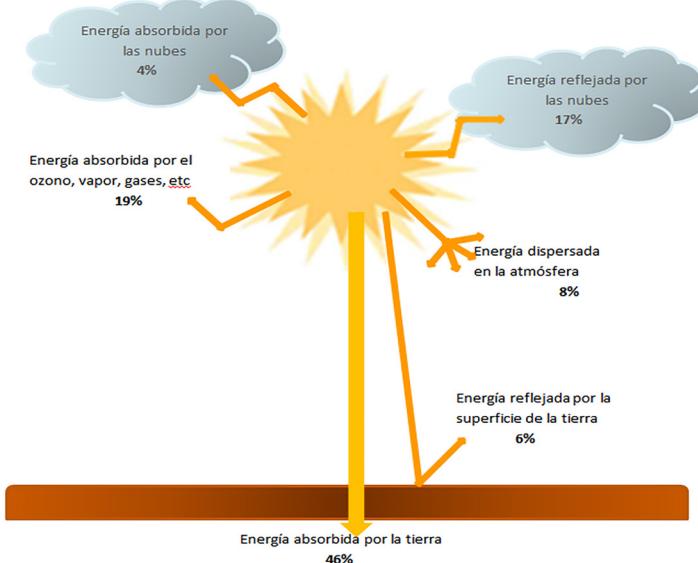
La esfera exterior está formada por la órbita terrestre y la irradiación solar en todas las direcciones. El promedio del radio exterior de la esfera es de 149 500 000 km. El Sol irradia la misma potencia hacia todas direcciones, y la esfera exterior recibe la misma potencia solar en cada metro cuadrado de la superficie.

Nuestro planeta, por encontrarse en el perímetro de la esfera exterior, recibe 1367 W/m<sup>2</sup> de potencia solar por metro cuadrado (valor adoptado por el World Radiation Center) y a esta magnitud se le denomina constante solar.



**Figura 3.3.** Promedio del flujo de energía por unidad de tiempo que llega a la Tierra (Nasa.gov).

La constante solar es el promedio de las cantidades de potencia recibida por cada metro cuadrado de superficie de la esfera exterior a lo largo de un año, poniendo énfasis en que, durante el perihelio, cuando la Tierra está más cerca del Sol, la atenuación de la potencia debida a la distancia es mucho menor que durante el afelio, cuando la Tierra está más alejada del Sol.



**Figura 3.4.** Distribución de la radiación solar (Noemí Sogari).

## LA RADIACIÓN SOLAR

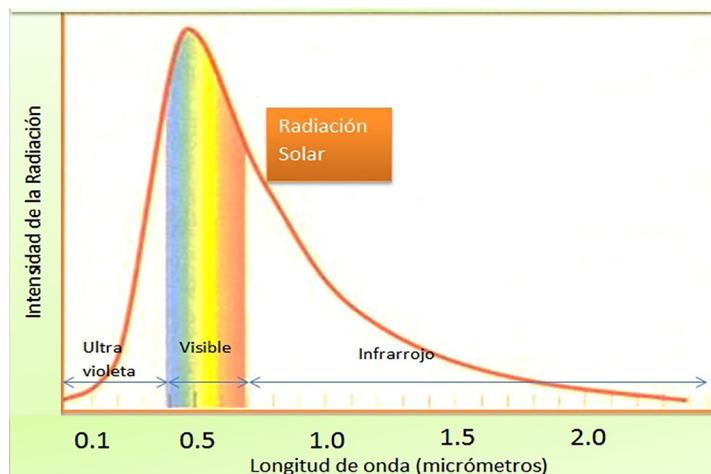
La energía que llega a la Tierra –en forma de ondas electromagnéticas– es el motor de la dinámica de la vida.

La radiación solar es la fuente primaria de energía para procesos dinámicos de la atmósfera global, para la definición de condiciones climáticas y para procesos biológicos naturales. La existencia de los animales tampoco sería posible en ausencia de los organismos fotosintéticos, y estos no existirían si nuestro planeta no tuviese un aporte continuo y efectivo de radiación solar.

La energía proveniente del Sol es una de las alternativas naturales de fuentes renovables y «limpias» (no contaminantes del medio ambiente) en el contexto del consumo energético de la sociedad. En el ámbito agrícola y en el de ecosistemas, ella es componente fundamental del balance de energía superficial, determina tasas de evaporación/evapotranspiración e incide en la disponibilidad de agua en el suelo.

El Sol emite radiación en toda la gama del espectro electromagnético. Sin embargo, para los fines de aprovechamiento energético, resulta de interés la denominada radiación térmica, que considera el ultravioleta (UV), el visible (EV) y el infrarrojo (IR).

Los rayos ultravioletas, junto a los rayos X y gamma, transportan un 9% de la energía total; los rayos visibles transportan casi el 50%, los rayos infrarrojos con longitudes de onda entre 0,780 y 3,0 mm transportan el 41% restante. Las radiaciones infrarrojas que alcanzan la superficie terrestre se transforman en calor. De toda esta radiación que se dirige hacia la Tierra, solo una fracción alcanza la superficie terrestre. En efecto, al atravesar la atmósfera terrestre, intervienen los procesos de reflexión, difusión y absorción. Del total de radiación, el 50% o 60% es reflejado por las nubes; por otro lado, las partículas del aire difunden en todos los sentidos la radiación, a la vez que absorben selectivamente un elevado porcentaje de la radiación, siendo el ozono, el vapor de agua y el dióxido de carbono los componentes principales que intervienen.



**Figura 3.5.** Rango del espectro de la radiación solar incidente sobre la superficie de la atmósfera terrestre (HyperPhysics, Depto. de Física y Astronomía (UGA)).



El diagrama de la Figura 3.5 muestra el espectro de un rayo de sol en las afueras de la entrada en la atmósfera terrestre. El pico del espectro está dentro del espectro visible, pero todavía hay una cantidad significativa de longitudes de onda más cortas presentes.

### Conceptos básicos

Se exponen a continuación algunas definiciones básicas de magnitudes usadas, por ejemplo, en el cálculo de la cantidad de energía solar incidente sobre una superficie.

**Masa de aire.** Relación de la masa de la atmósfera atravesada por la radiación directa y la masa que pasaría si el Sol se encontrara en el cenit (los rayos inciden perpendicularmente a una superficie horizontal). Así, en el nivel del mar,  $m = 1$ , cuando el Sol está en el cenit, y  $m = 2$ , para un ángulo cenital de  $60^\circ$ . Para ángulos cenitales entre  $0^\circ$  y  $70^\circ$  a nivel del mar, la siguiente expresión resulta una buena aproximación:

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z}$$

**Radiación solar directa.** Radiación proveniente del Sol sin que haya interactuado con las moléculas de la atmósfera.

**Radiación solar difusa.** Radiación recibida del Sol, cuya dirección ha sido cambiada debido a la interacción con las moléculas de la atmósfera.

**Radiación solar de albedo.** Radiación solar incidente sobre una superficie, resultado de la reflexión-emisión de los cuerpos expuestos al Sol.

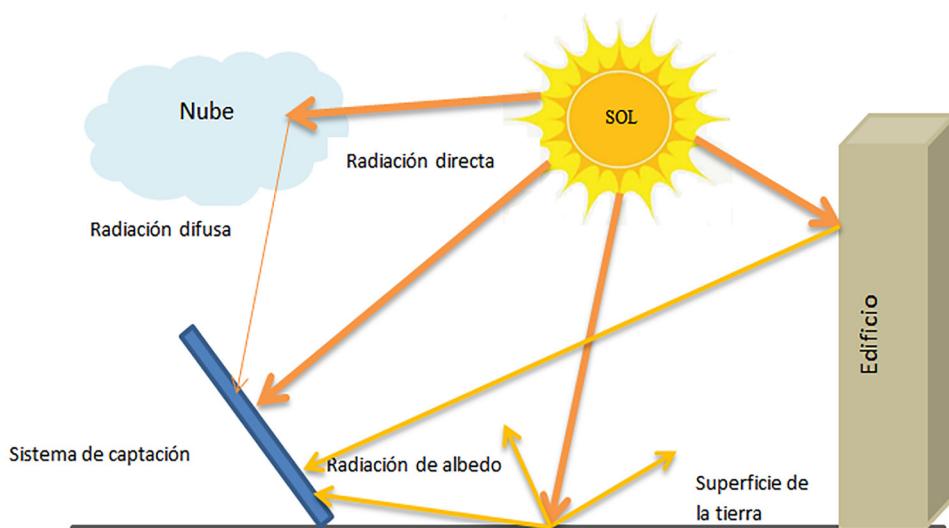


Figura 3.6. Radiación solar directa, difusa, reflejada (Noemí Sogari).

En la siguiente tabla se exponen valores del porcentaje de radiación albedo, proveniente de distintos elementos.

**Tabla 1.** Porcentaje de radiación albedo proveniente de distintos elementos

| SUPERFICIE   | ALBEDO (%) | SUPERFICIE                     | ALBEDO (%) |
|--------------|------------|--------------------------------|------------|
| Nieve fresca | 80-85      | Agua (sol cerca del horizonte) | 50-80      |
| Arena        | 20-30      | Agua (sol cerca del cenit)     | 3-5        |
| Pasto        | 20-25      | Nube gruesa                    | 70-80      |
| Bosque       | 5-10       | Nube delgada                   | 25-30      |
| Suelo seco   | 15-25      | Tierra y atmósfera global      | 30         |

**Radiación solar total o global.** La suma de la radiación solar directa y difusa incidente sobre una superficie.

**Irradiación.** Es la energía radiante incidente sobre una superficie en la unidad de tiempo por unidad de área. Se expresa en W/m<sup>2</sup> en el sistema MKSA. El símbolo G se utiliza para la irradiancia solar, con subíndices apropiados para diferenciar radiación directa (b), difusa (d) o albedo (a).

**Irradiancia (I).** Es la energía radiante incidente sobre una superficie por unidad de área, obtenida por integración para un tiempo determinado. Se expresa en J/m<sup>2</sup> en el sistema MKSA.

$$I = \int_{t_2}^{t_1} G(t) dt \quad (3.2)$$

**Radiatividad (W/m<sup>2</sup>).** Es la proporción de energía radiante que emite una superficie por unidad de área debido a la combinación de emisión, reflexión y transmisión.

**Emisividad (W/m<sup>2</sup>).** Es la proporción de energía radiante que emite una superficie por unidad de área debido solo a la emisión.

**Tiempo solar (Hs).** Tiempo basado en el movimiento angular aparente del Sol a través del cielo, tal que el mediodía solar ocurre cuando el Sol atraviesa el meridiano del observador. La hora solar no coincide con la hora local. La relación entre ambas está dada por la siguiente expresión:

$$\text{Hora solar} - \text{Hora local} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (3.3)$$

Donde: L<sub>st</sub> es el meridiano estándar que caracteriza el tiempo del lugar, L<sub>loc</sub> es la longitud del lugar en cuestión y E es un factor de corrección que depende del día del año (Duffie y Beckman, 2013; Spencer, 1971, citado por Iqbal, 1983).

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868\cos B - 0.32077\sin B - 0.014615\cos 2B - 0.04089\sin 2B) \quad (3.4)$$

$$B = (n - 1)\frac{360}{365} \quad (3.5)$$

Donde: n es el día del año, así 1 ≤ n ≤ 365

**Tabla 2.** Expresiones para convertir el día del mes en el número del día del año

| MES     | N PARA EL I-ÉSIMO DÍA DEL AÑO | MES        | N PARA EL I-ÉSIMO DÍA DEL AÑO |
|---------|-------------------------------|------------|-------------------------------|
| Enero   | i                             | Julio      | 181 + i                       |
| Febrero | 31 + i                        | Agosto     | 212 + i                       |
| Marzo   | 59 + i                        | Septiembre | 243 + i                       |
| Abril   | 90 + i                        | Octubre    | 273 + i                       |
| Mayo    | 120 + i                       | Noviembre  | 304 + i                       |
| Junio   | 151 + i                       | Diciembre  | 334 + i                       |

## ÁNGULOS DE POSICIÓN SOLAR E INFLUENCIA SOBRE LA RADIACIÓN

La cantidad de energía solar que llega a un punto de la superficie terrestre depende de la inclinación con que los rayos solares inciden en la superficie, ya que cuanto más perpendiculares sean dichos rayos (a la superficie terrestre), mayor será la intensidad de radiación solar. La dirección de los rayos solares depende de la ubicación del Sol, de la ubicación geográfica del lugar en estudio (latitud del lugar), de la época del año y de la hora del día.

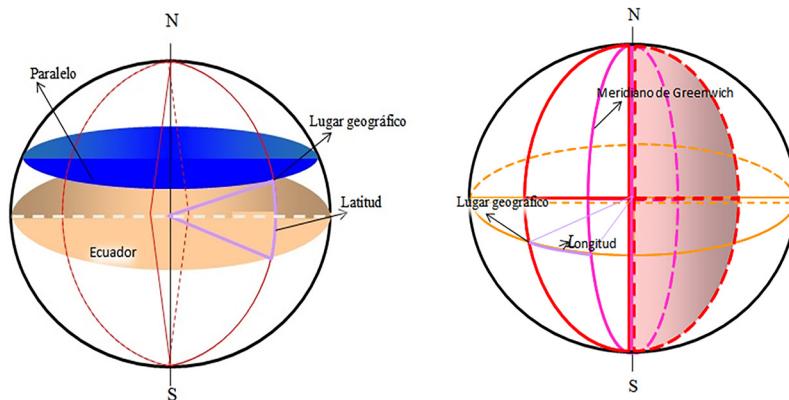
### Definiciones de los ángulos de posición

**Paralelo.** Círculo determinado por la intersección entre la esfera terrestre y un plano paralelo al ecuador.

**Latitud.** Ángulo determinado desde el centro de la Tierra por un radio dirigido al lugar de interés y otro radio dirigido al punto del ecuador sobre el mismo meridiano. La latitud varía entre  $0^\circ$  en el ecuador y  $90^\circ$  en los Polos (positivo en el Polo Norte y negativo en el Polo Sur).

**Meridiano.** Círculo determinado por la intersección entre la esfera terrestre y todo plano que pasa por los polos.

**Longitud.** Ángulo determinado por el plano de un meridiano con respecto a otro tomado como referencia.



**Figura 3.7.** Representación de paralelo, latitud, meridiano, longitud (Noemí Sogari).

**Declinación ( $\delta$ ).** Posición angular del Sol al mediodía solar respecto al plano del ecuador. Varía entre  $-23.45^\circ$  y  $+23.45^\circ$  (positivo para el hemisferio norte).

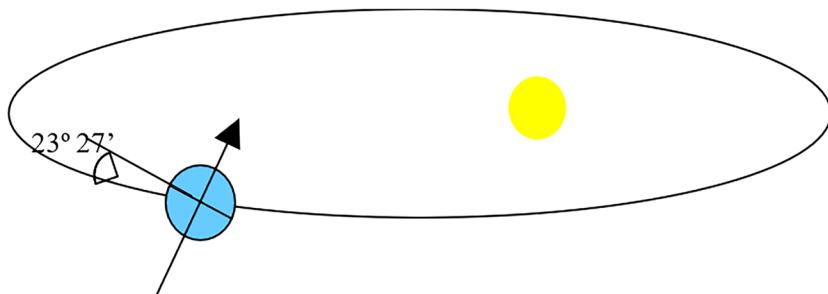


Figura 3.8. Representación del ángulo de declinación (Noemí Sogari).

El eje de rotación de la Tierra se encuentra inclinado unos  $23.45^\circ$  respecto del plano orbital de la Tierra, por lo que, a medida que gira alrededor del Sol, expone perpendicularmente a los rayos del Sol y de forma cíclica, el hemisferio norte, el ecuador y el hemisferio sur. De esta manera, visto desde la superficie de la Tierra, el Sol se «ve más alto» en el verano (con mayor ángulo de elevación) durante el verano y «más bajo» en el invierno.

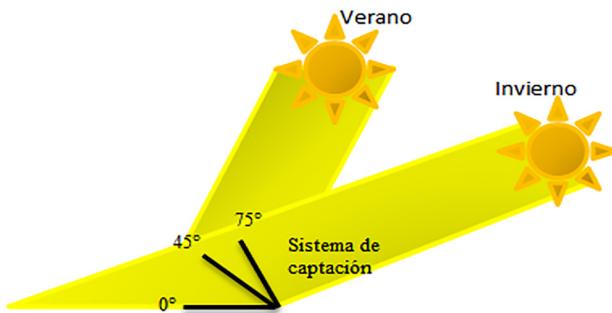


Figura 3.9. El Sol se «ve más alto» en el cielo (con mayor ángulo de elevación) durante el verano y «más bajo» en el invierno (Noemí Sogari).

La declinación puede calcularse aplicando la ecuación de Cooper (1969):

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen}(360 \frac{284+n}{365}) \quad (3.6)$$

Donde:  $n$  es el número del día en el año.

El comportamiento de la declinación solar se aproxima a un coseno con amplitud igual al ángulo de la eclíptica y periodo igual al de un año tropical solar, de modo que su máximo corresponde al solsticio de verano, el mínimo al solsticio de invierno y los equinoccios a los pasos por cero.

**Ángulo de incidencia ( $\theta$ ).** Ángulo determinado por la radiación solar directa sobre una superficie y la normal a dicha superficie.

**Ángulo acimutal de la superficie ( $\Upsilon$ ).** Desviación angular respecto del meridiano local, de la proyección de la normal a la superficie sobre el plano horizontal.

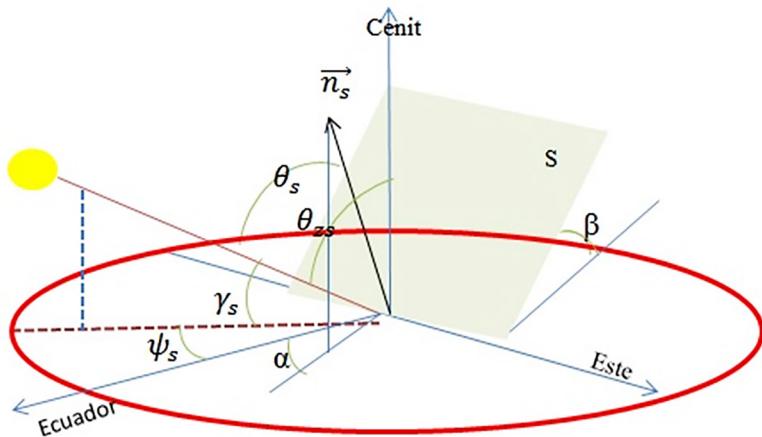
**Ángulo horario ( $\omega$ ).** Desplazamiento angular del Sol hacia el este o el oeste respecto del meridiano local. Consecuencia de la rotación terrestre a  $15^\circ$  cada hora. Por definición, el mediodía solar es  $\omega=0^\circ$ . El ángulo horario solar expresa la rotación diaria de la Tierra. Como la Tierra gira  $360^\circ$  en 24 horas, cada hora agrega  $15^\circ$  al ángulo horario. Cuando el Sol está en su punto más alto en el cielo, el ángulo de hora solar es igual a cero. Los ángulos antes del mediodía toman valor negativo y después del mediodía, positivo.

**Ángulo cenital ( $\theta_z$ ).** Ángulo determinado por la vertical del lugar y la línea del Sol.

**Altitud solar ( $\alpha_s$ ).** Ángulo entre la horizontal del lugar y la línea solar.

**Ángulo acimutal solar ( $\Upsilon_s$ ).** Desplazamiento angular respecto del sur de la proyección de la radiación solar directa incidente sobre una superficie horizontal. Desplazamiento hacia el este es positivo.

**Inclinación ( $\beta$ ).** Ángulo determinado por la superficie en cuestión y la horizontal del lugar ( $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ ).



**Figura 3.10:** Ángulos de posición (datos provenientes de la Universidad de Jaén, adaptados por Noemí Sogari).

La relación geométrica entre el plano de un sistema con una determinada orientación relativa a la Tierra y la radiación solar directa incidente sobre dicha superficie podrá ser descrita en términos de los ángulos antes definidos.

### Relaciones entre los ángulos de posición

La dirección de la radiación solar incidente sobre una superficie orientada respecto de las coordenadas locales se calcula mediante las siguientes relaciones matemáticas.

Ángulo de incidencia:

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \sin\delta \cdot \sin\phi \cdot \cos\beta - \sin\delta \cdot \cos\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \\ &+ \cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \cdot \cos\omega \\ &+ \cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega \end{aligned} \quad (3.7)$$

Ángulo cenital:

$$\cos\theta_z = \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin\phi \cdot \sin\delta = \sin\alpha \quad (3.8)$$

Ángulo horario:

$$\cos\omega_s = \frac{-\sin\delta \cdot \sin\Phi}{\cos\delta \cdot \cos\Phi} = -\tan\delta \cdot \tan\Phi \quad (3.9)$$

Calcular el ángulo de incidencia de la radiación directa incidente sobre una superficie horizontal ubicada en Corrientes, Argentina, a las 10:30 hora solar del 17 de abril.

### Solución

- Ubicación del lugar

Lugar de estudio: Corrientes. Entonces, su ubicación estará dada por los siguientes ángulos:

Latitud:  $27^{\circ} 27' S$  ( $27.45^{\circ}$ )

Longitud:  $58^{\circ} 49' O$

- Número de día en el año

Día seleccionado: 17 de abril. Corresponde al día número  $n=107$  del año.

- Posición del Sol

La posición angular del sol al mediodía solar respecto al plano del ecuador, es decir, la declinación será igual a:

$$\delta = -23.45 \operatorname{sen}\left(360 \frac{284+107}{365}\right) = -10.15^{\circ} \quad (1)$$

- Cálculo del ángulo horario

Hora seleccionada: 10.5, entonces  $\omega=15^{\circ} \times 10.5=157.5^{\circ}$   $-180^{\circ}=-22.5^{\circ}$  (2)

- Duración astronómica del día

$$\cos \omega_s = -\tan(-10.15) \cdot \tan 27.45 \quad (3)$$

$$\omega_s = 84.6^{\circ}$$

Y como la Tierra gira  $360^{\circ}$  en 24 horas, entonces,  $84.6^{\circ} = 5.64$  horas.

Es decir que la salida del Sol ocurre 5.64 horas antes del mediodía solar y el ocaso, 5.64 horas después del mediodía solar. Este dato resulta útil para conocer con precisión el tiempo durante el cual un sistema de colección podría aprovechar la radiación solar.



## Referencias bibliográficas

«Promedio del flujo de energía por unidad de tiempo que llega a la Tierra» (Sin fecha). En *Ciencia Nasa*. Disponible en <https://ciencia.nasa.gov/ciencias-espaciales>

DUFFIE, John A. y Beckman William A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. USA: Wiley.

IQBAL, Muhammad (1983). *An Introduction to Solar Radiation*. Toronto: Academic press

WHILLIER, A. (1956). «The Determination of Hourly Values of Total Radiation from Daily Summations». *Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. B*, 7, 197.



# Capítulo 4

## Calefón solar

### COLECTORES SOLARES PLANOS

El consumo de energía proveniente de los combustibles fósiles (gas, petróleo; recursos no renovables) está aumentando en forma desmedida, comprometiendo así el futuro de nuestro planeta. Consecuentemente, nuestro clima está cambiando muy rápidamente a causa de la contaminación de la atmósfera, debido a la permanente contribución de gases que ayudan al efecto invernadero.

El consumo desmedido de combustibles produjo en las últimas décadas un notable aumento en los precios de los mismos, haciendo esto necesaria la búsqueda de otros recursos energéticos, tales como la energía solar.

De acuerdo con el World Energy Council (2007), un metro cuadrado de la superficie terrestre recibe al año un equivalente a 5.4 Gigajoules de energía ( $5,4 \times 10^9$  Joules), aproximadamente la misma cantidad que puede ser obtenida de un barril de petróleo, 200 kg de carbón o 140 m<sup>3</sup> de gas natural.

La energía solar es un recurso renovable con diversos potenciales de uso. Uno de ellos es la capacidad térmica de la energía del sol para calentar agua para uso doméstico a través de un tipo de dispositivo conocido como calefón solar.

El calentamiento de agua mediante energía solar resulta una solución cuando no se cuenta con suministro energético eléctrico o de gas, siendo además una opción económicamente atractiva y competitiva para el resto.

El calefón solar consta fundamentalmente de un colector solar y un tanque almacenador.

Un colector solar plano es un intercambiador de calor que transforma la energía radiante en térmica. La energía radiante se transfiere desde la fuente, el Sol, hacia un fluido (agua o aire) que circula por los conductos del colector. La máxima irradiancia incidente sobre la superficie del colector, en condiciones óptimas, es de 1100 W/m<sup>2</sup>. La energía radiante aprovechada por el colector corresponde al rango de longitudes de onda de 0.3 a 3 μm. El análisis del comportamiento térmico de un colector solar significará relacionar flujos de energías variables.



Los colectores solares de placas planas son diseñados para aplicaciones donde se requiere soportar temperaturas de trabajo de hasta 100 °C.

Frente a otros tipos de colectores, el de placas planas presenta las siguientes ventajas: aprovechan la radiación directa y difusa y, desde el punto de vista mecánico, es la construcción más simple que contribuye a facilitar las tareas de operación y mantenimiento.

El colector de placa plana se suele integrar en los llamados sistemas de energía solar de baja temperatura que se caracterizan por emplearlo como elemento receptor de energía. Al tratarse de un sistema simple de construir y operar, se usan principalmente en el calentamiento de agua para uso sanitario, calentamiento de viviendas y deshidratación de productos frutihortícolas.

### Partes de un colector

Las partes constitutivas de un colector solar de placas planas son la cubierta transparente, la placa absorbente, el aislante y la carcasa (ver Figura 4.1).

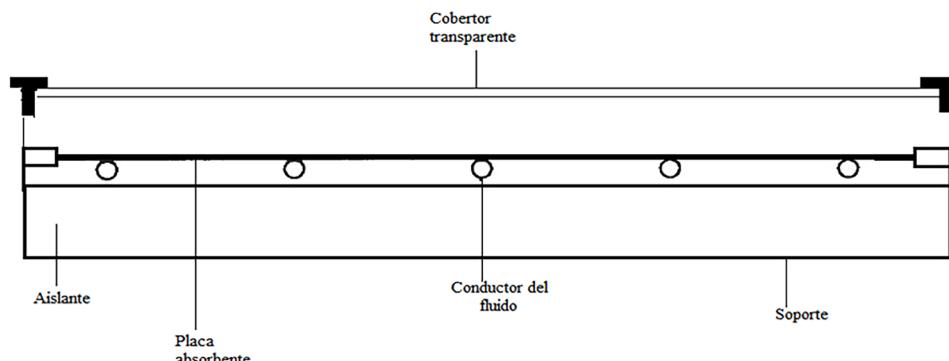


Figura 4.1. Partes de un colector solar de placas planas (Duffie y Beckman, 2013: 237).

#### a) Cubierta transparente

Este elemento produce el efecto invernadero en el sistema y reduce las pérdidas por convección. El efecto invernadero consiste en que la fracción de radiación que ha atravesado la cubierta e incide sobre la placa absorbente es reflejada hacia la superficie transparente, en una longitud de onda para la que resulta opaca, lo que ayuda a la retención de la radiación en el interior del colector. Los principales materiales utilizados son vidrio, policarbonato, etc. Las características que la cubierta debe reunir para que el efecto invernadero provocado sea óptimo son:

- Coeficiente de transmisión de la radiación solar alto, en la banda de 0.3 a 3  $\mu\text{m}$ , y bajo para las ondas largas, es decir, superiores a 3  $\mu\text{m}$ .
- Coeficiente de conductividad térmica bajo, que dificulte el paso de calor desde la superficie interior hacia la exterior, minimizando así las pérdidas.

- Coeficiente de reflexión alto para la longitud de onda larga de la radiación emitida por la placa captadora, a fin de que esta retorne a la placa.
- Coeficiente de dilatación bajo, para evitar la rotura o deformación.

#### b) Placa captadora

Es el elemento que absorbe la radiación solar y la transfiere al fluido caloportador en forma de calor. Si esta placa es de color negro, funciona como un «cuerpo negro», absorbe energía y la emite en igual proporción.

#### c) Aislamiento térmico

La aislación térmica protege la placa captadora en su parte posterior y lateral para evitar las pérdidas de calor hacia el exterior.

Los materiales más usados son la fibra de vidrio, la espuma rígida de poliuretano y el poliestireno expandido.

#### d) Carcasa

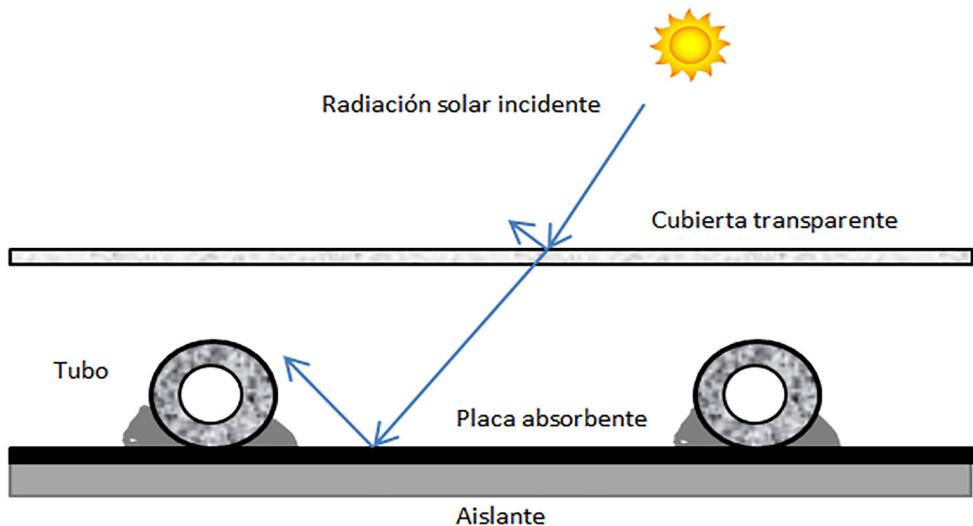
Este elemento debe proteger y soportar a las otras partes constituyentes del colector solar, por lo tanto, es necesario que reúna las siguientes características:

- Rigididad y resistencia estructural que asegure la estabilidad.
- Resistencia a la intemperie, a los efectos corrosivos de la atmósfera y a la inestabilidad química debido a las inclemencias del tiempo.
- Aireación del interior del colector para evitar la condensación del agua.
- Facilitar el desmontaje de la cubierta para poder tener fácil acceso a la placa captadora.

### **Funcionamiento**

Expuesto el colector al sol, la radiación incide sobre la superficie transparente y es transmitida hasta llegar a la placa captadora, la que actúa como un cuerpo negro absorbiendo energía y, por lo tanto, aumentando su temperatura. Al igual que un cuerpo negro, esta última emite radiación en igual proporción a la absorbida. La radiación emitida es de longitud de onda larga, la que queda atrapada en el interior del colector. Por consiguiente, la superficie transparente permite el paso de la radiación de cortas longitudes de onda, pero es opaca a la radiación infrarroja. De esta forma, se produce una «trampa energética de radiaciones» que impide que la energía radiante que ha atravesado el vidrio vuelva a salir. Esta trampa constituye el denominado *efecto invernadero*.

El fluido que circula por el colector recibe el calor de la placa absorbente y aumenta su temperatura, mientras que la temperatura de la placa disminuirá.



**Figura 4.2.** Colector solar de placas planas (Noemí Sogari).

### Balance energético

En estado estacionario, el rendimiento de un colector solar se describe mediante un balance de energía que considera la distribución de la energía solar incidente en ganancia de energía útil, pérdidas térmicas y pérdidas ópticas.

A los efectos de analizar el comportamiento térmico de un colector solar de placas planas, de manera relativamente sencilla se expone un modelo matemático que permitiría simplificar los cálculos de las energías incidente, absorbida, útil y perdida.

El modelo matemático requiere de las siguientes condiciones:

- El colector opera en estado estacionario
- Los conductos proveen de flujo uniforme
- La energía absorbida por el cobertor es despreciable
- El flujo de energía a través de la cubierta es unidimensional
- El cobertor es opaco a la radiación infrarroja
- La irradiación incidente sobre la superficie de las placas es uniforme
- El gradiente de temperatura en la dirección del flujo se trata en forma independiente del gradiente en otras direcciones
- El gradiente de temperatura en la dirección perpendicular al flujo del fluido se considera despreciable
- El cielo se comporta como un cuerpo negro que emite radiación infrarroja a la temperatura equivalente.

La radiación solar absorbida por unidad de área del absorbedor  $S$  es igual a la diferencia entre la radiación solar incidente y las pérdidas ópticas (ecuación 4.1.) La energía térmica

perdida por el colector por conducción, convección y radiación infrarroja se puede representar como el producto de un coeficiente de transferencia  $U_L$  multiplicado por la diferencia entre la temperatura media de la placa absorbente  $T_{pm}$  y la temperatura ambiente  $T_a$ . En estado estacionario, la energía útil del colector del área  $A_c$  es la diferencia entre la radiación solar absorbida y la pérdida térmica.

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_{pm} - T_a)] \quad (4.1)$$

Las unidades en el SI de las magnitudes relacionadas en la ecuación (4.1) son:

$$Q_u: [W] \quad S: \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad U_L : \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

El rendimiento térmico del colector se define como el cociente entre la ganancia útil respecto a la energía solar incidente. Bajo condiciones constantes, para un periodo, el rendimiento térmico puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{Q_u}{I_T A_c} \quad (4.2)$$

Donde:  $I_T$  es la irradiancia solar total incidente sobre la superficie del colector. Expresión a la que se llega considerando: la energía solar total incidente (directa + difusa + albedo).

$$Q_I = I_T A_c \quad (4.3)$$

La energía calorífica absorbida por el colector:

$$Q_{abs} = I_T A_c (\tau \alpha) \quad (4.4)$$

Donde:  $\tau \alpha$  es el producto de la transmitancia del cobertor transparente y la absorptancia de la placa absorbente.

La energía útil que se transfiere al fluido puede obtenerse:

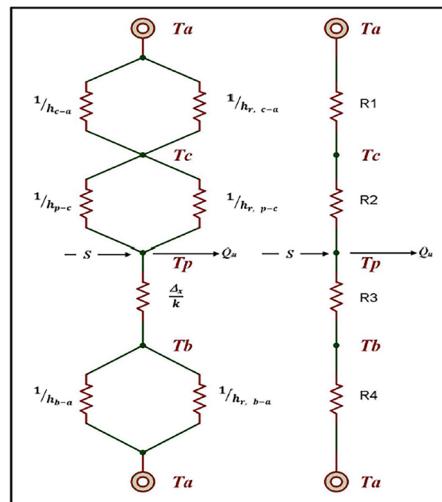
$$Q_u = mc_p \frac{dT}{dt} \quad (4.5)$$

Donde:  $mc_p$  es la capacidad calorífica del fluido y  $dT/dt$  es el cambio de temperatura con el tiempo.

## Coeficiente total de pérdidas de calor

El valor del coeficiente  $U_L$  resulta de gran utilidad para evaluar las pérdidas de calor. El proceso de cálculo se basa en la equivalencia entre los circuitos térmico y eléctrico (ver Figura 4.2).

La energía solar total incidente sobre el cobertor transparente es  $I_T$ , solo una parte es transmitida por el cobertor transparente y absorbida por la placa colectora ( $I_T(\tau\alpha)$ ), la que se distribuye entre el calor útil y las pérdidas térmicas por las superficies superior e inferior del colector.



**Figura 4.3.** Circuito térmico de un colector de un solo cobertor transparente (Duffie-Beckman adaptado por Ricciardi, 2013: 241).

La energía perdida por unidad de área entre la parte superior de la placa colectora y el cobertor ocurre por convección y radiación del calor.

$$q_{L,p-c} = q_{conv,p-c} + q_{rad,p-c} \quad (4.6)$$

$$q_{L,p-c} = (h_{c,p-c} + h_{r,p-c})(T_p - T_c) \quad (4.7)$$

Siendo:  $h_{c,p-c}$  el coeficiente convectivo de transferencia de calor entre la placa y el cobertor,  $h_{r,p-c}$  el coeficiente radiativo de transferencia de calor entre la placa y el cobertor,  $T_p$  la temperatura de la placa absorbente y  $T_c$  la temperatura del cobertor.

La resistencia al paso del calor es inversa al coeficiente de transferencia, por lo tanto:

$$R_2 = \frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} \quad (4.8)$$

El coeficiente convectivo de transferencia de calor es:

$$h_{c,p-c} = Nu * \frac{L}{k} \quad (4.9)$$

Donde: es el número de Nusselt,  $L$  el espacio entre la placa y el cobertor, y  $k$  la conductividad térmica.

El coeficiente radiativo de transferencia de calor entre dos superficies planas paralelas (absorbente-cobertor) queda expresado de la siguiente forma:

$$h_{r,p-c} = \frac{\sigma(T_p + T_c)(T_p^2 + T_c^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \quad (4.10)$$

La transferencia de calor entre la cubierta y el entorno es igual al calor transferido por convección y radiación al medio:

$$q_{L,c-a} = q_{conv,c-a} + q_{rad,c-a} \quad (4.11)$$

$$q_{L,c-a} = (h_{c,c-a} + h_{r,c-a})(T_c - T_a) \quad (4.12)$$

La resistencia entre el cobertor y el ambiente  $R_1$  tiene la misma forma que  $R_2$ :

$$R_1 = \frac{1}{h_{c,c-a} + h_{r,c-a}} \quad (4.13)$$

El coeficiente de transferencia del calor por convección depende de la velocidad del viento y se calcula de la siguiente forma:

$$h_{c,c-a} = 5.7 + 3.8 v \quad (4.14)$$

El coeficiente de transferencia del calor por radiación de la cubierta hace referencia al intercambio de radiación con el cielo. Así,  $T_s$  es la temperatura de cielo, que es equivalente a la temperatura de un cuerpo negro que emite la misma radiación de onda larga que la atmósfera sobre una superficie horizontal. Dado que la temperatura ambiente  $T_a$  es una

magnitud que puede registrarse, resulta de utilidad referir la temperatura de la cubierta a la del ambiente. Por lo tanto, el coeficiente  $h_{r,c-a}$  queda expresado de la siguiente forma:

$$h_{r,c-a} = \frac{\sigma \varepsilon_c (T_c + T_s) (T_c^2 + T_s^2) (T_c - T_s)}{T_c - T_a} \quad (4.15)$$

El coeficiente de pérdida por la parte superior del colector desde la placa colectora hasta el ambiente es:

$$U_t = \frac{1}{R_1 + R_2} \quad (4.16)$$

El coeficiente de pérdida por la parte inferior del colector es igual a:

$$U_b = \frac{1}{R_3 + R_4} \quad (4.17)$$

Donde:  $R_3$  representa la resistencia al flujo de calor por conducción a través del aislamiento y  $R_4$  la resistencia al flujo de calor por convección y radiación desde el aislante al exterior. Los valores de ambas resistencias permiten despreciar el valor de  $R_4$  lo que también significa que el aislante cumple la función de evitar las pérdidas de calor a través de él.

Por lo tanto, el coeficiente de pérdida por la parte inferior del colector es:

$$U_b = \frac{1}{R_3} = \frac{k}{L} \quad (4.18)$$

Donde:  $k$  es la conductividad térmica del aislante y  $L$ , su espesor.

El coeficiente de pérdida de calor por conducción por los lados del colector es:

$$U_e = \frac{kHP}{L'A_c} \quad (4.19)$$

Donde:  $L'$  es el espesor,  $H$  es la altura del aislante en los costados del colector y  $P$  es el perímetro del colector.

Por lo tanto, el coeficiente total de pérdida de calor es:

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (4.20.)$$

Debido a la dependencia de la temperatura de las placas, los coeficientes cambian en el tiempo. Por ello, para efectuar un análisis exhaustivo, es conveniente realizar los cálculos durante un lapso de tiempo en distintas épocas.

### Ejemplo del cálculo de los coeficientes de pérdida

Calcular el coeficiente total de pérdidas de calor  $U_L$  para un colector plano con una sola cubierta de policarbonato y que mide 2 m de largo por 0.80 m de ancho. Las características de los componentes se enumeran a continuación:

|  |            |
|--|------------|
| Emitancia de la placa absorbente (pintura negra) | 0.90       |
| Emitancia del policarbonato en el infrarrojo     | 0.85       |
| Temperatura promedio de la placa absorbente      | 80 °C      |
| Temperatura del aire y del cielo                 | 20 °C      |
| Temperatura del cobertor                         | 35 °C      |
| Velocidad del viento                             | 1.0 m/s    |
| Espacio entre la placa absorbente y el cobertor  | 3 cm       |
| Espesor del aislante                             | 2.5 cm     |
| Conductividad térmica del aislante               | 0.04 W/m°K |
| Inclinación del colector                         | 45 °       |

Constante de Stefan-Boltzmann:  $\sigma = 5.669 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

#### Solución

El coeficiente de pérdida de calor por la parte superior del colector se calcula mediante la expresión:

$$U_t = \left( \frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_v + h_{r,c-a}} \right)^{-1} \quad (4.21)$$

Cálculo de los coeficientes de transferencia del calor por convección.

Entre el cobertor y el ambiente:

$$h_{c,c-a} = h_v = 5.7 + 3.8 * 1.0 = 9.50 \text{ W/m}^2 \text{ K} \quad (4.22)$$

Entre la placa absorbente y el cobertor:

$$h_{c,p-c} = Nu * \frac{L}{k} \quad (4.23)$$

El número de Nussel para superficies inclinadas entre 0° y 75° se calcula mediante la expresión (Duffie y Beckman, 2013):

$$Nu = 1 + 1.44 \left[ 1 - \frac{1708(\sin 1.8\beta)^{1.6}}{Ra \cos \beta} \right] \left[ 1 - \frac{1708}{Ra \cos \beta} \right] + \left[ \left( \frac{Ra \cos \beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (4.24)$$

Donde:  $Ra$  es el número de Raley y se calcula usando la expresión:

$$Ra = \frac{g \beta' \Delta T L^3}{\nu \alpha} \quad (4.25)$$

El número de Prandtl es la relación:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (4.26)$$

Donde:  $g$  es la constante gravitacional,  $\beta'$  es el coeficiente volumétrico de expansión (para el gas ideal  $\beta' = 1/T$ ),  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura entre placas,  $\nu$  es la viscosidad cinemática,  $\alpha$  es la difusión térmica.

Los valores de las propiedades del aire son:  $\nu = 1.96 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $k = 0.0293 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,  $T = 340.5 \text{ K}$ ,  $Pr = 0.7$

Por lo tanto, se tiene:

$$Ra = \frac{9.81 * (80 - 35) * (0.03)^3 * 0.7}{340.5 * (1.96 \times 10^{-5})^2}$$

$$Ra = 6.38 \times 10^4$$

$$Nu = 3.31 \quad (4.27)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección entre las placas es:

$$h_{c,p-c} = 3.31 * \frac{0.03}{0.0293} = 3.39 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C} \quad (4.28)$$

Los coeficientes de transferencia del calor por radiación son iguales a:

$$h_{r,p-c} = 3.65 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C} \quad (4.29)$$

$$h_{r,c-a} = 5.23 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

Los coeficientes de pérdida son:

$$\begin{aligned}
 U_t &= 4.76 \text{ W/m}^2\text{°C} & U_b &= 1.60 \text{ W/m}^2\text{°C} & U_e &= 0.24 \text{ W/m}^2\text{°C} \\
 U_L &= 6.60 \text{ W/m}^2\text{°C} & & & & \\
 & & & (4.30) & &
 \end{aligned}$$

Para calcular la eficiencia del colector, a manera de una primera aproximación, puede realizarse de la siguiente forma:

$$Q_u = A_c [S(\tau\alpha) - U_L (T_{pm} - T_a)]$$

$$\tau\alpha \cong 1.01 \tau\alpha$$

$$Q_u = 1.6 [950(0.77) - 6.60(80 - 20)]$$

$$Q_u = 536.8 \text{ W}$$

$$\eta = 35\%$$

$$(4.31)$$

Donde:  $S(\tau\alpha)$  representa la energía que es transmitida por el cobertor y la absorbida por la placa absorbente.

## CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN

En la práctica, el colector debe orientarse hacia el norte en dirección al ecuador (considerando que se instalará en el hemisferio sur), el eje del colector debe mantener la dirección N-S. En cuanto a la inclinación del mismo, para obtener un óptimo rendimiento, debe ser igual a la latitud del lugar  $\pm 15^\circ$ .

Entre los criterios que deben tenerse en cuenta en el diseño del sistema en su conjunto, se destacan:

- Facilidad constructiva: se aconseja el uso de materiales de fácil acceso (disponibles en el mercado local) y sencillez en la construcción, de manera que puedan ser replicados y reparados por los usuarios.
- Mantenimiento simple: la tecnología transferida debe ser de fácil manejo y el mantenimiento del sistema debe ser simple para el usuario.
- Equipos transportables: la construcción con materiales livianos y flexibles facilita su manipulación y transporte.
- Bajo costo: el uso de materiales económicos permite la reposición y reparación de los equipos con pocos recursos.

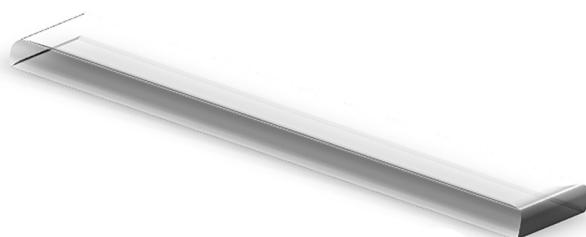
## DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

El sistema cuya construcción se describe opera por circulación natural, es decir, la circulación del agua entre colector y tanque es producida por el principio de termosifón, presentado cuando una masa de fluido es calentada a través de la base de un recipiente. En otros términos, el agua al entrar al colector por la parte inferior se calienta, lo que disminuye su densidad debido al incremento de la temperatura, entonces la columna de agua fría en la tubería de retorno al colector y la columna de agua caliente dentro del mismo se desequilibran haciendo que por gravedad la primera baje y empuje el agua caliente hacia el tanque.

Este sistema de calentamiento de agua puede usarse en viviendas de tipo unifamiliar. La utilización de agua caliente es solo para cubrir las necesidades básicas del baño, por lo que el consumo de agua caliente por persona, a una temperatura de 40 °C, es de alrededor de los 50 l y resulta necesario concientizar respecto a la necesidad de cambiar este hábito y consumir alrededor de 20 l. La temperatura es alta durante los días despejados, cuando la radiación solar es buena, la mezcla con el agua fría proveniente de la red de acueducto permite un mayor rendimiento del agua caliente almacenada en el tanque acumulador del sistema.

El sistema por construir es muy simple, básicamente se trata de:

- **Construcción del marco soporte del sistema.** La construcción del colector tiene como eje fundamental el marco que contiene a todo el sistema. El marco de madera (o metálico) sostiene al sistema que conduce y calienta el agua durante el día. Para la construcción del mismo, se puede utilizar madera o aluminio. Es importante que mantenga la rigidez necesaria para soportar al resto de los componentes en su interior. La madera es de menor costo y fácil de manipular, sin embargo, requiere buen tratamiento, pues deberá soportar las inclemencias climáticas. Es decir, es necesario aplicar barniz para exterior o bien pintura sintética para exteriores a los efectos de proteger el marco. Las dimensiones del marco son 2.00 m por 0.80 m.



**Figura 4.4.** Esquema del marco del colector solar (Noemí Sogari).

- **Construcción de la cubierta.** Es una lámina de material transparente (policarbonato alveolar cristal) montada en la parte superior del colector, existiendo una distancia de 2-3

cm entre la placa y la parrilla de conducción del agua. La función de la cubierta es permitir el paso de la radiación solar que será absorbida por la placa y disminuir la cantidad de radiación infrarroja que se escapa al exterior, puesto que de esta forma disminuye la pérdida térmica del colector. Debe cortarse la plancha de manera que los extremos lleguen hasta los extremos de los marcos del colector. Se colocarán listones de aluminio sobre la placa cobertora y se atornillarán al marco del colector.

- *Construcción de la parrilla de caños.* El agua circula por una parrilla de caños de color negro que permite absorber una mayor cantidad de energía del sol. Esta parrilla absorbe la radiación y transfiere el calor al agua. La parrilla mide 0.7 m de ancho por 1,80 m de largo. Se arma uniendo las piezas T macho-macho-hembra de media pulgada.



**Figura 4.5.** Esquema de la unión de las piezas T macho-macho-hembra (Noemí Sogari).

Se cortan 8 caños de  $\frac{1}{2}$  pulgadas de PVC y 1.60 m de largo. Los extremos de cada caño se insertan en una pieza T.



**Figura 4.6.** Esquema de la unión de las piezas T y el caño PVC de  $\frac{1}{2}$  pulgada (Noemí Sogari).

De esta manera, la parrilla queda armada de la siguiente forma:



**Figura 4.7.** Esquema de la parrilla (Noemí Sogari).

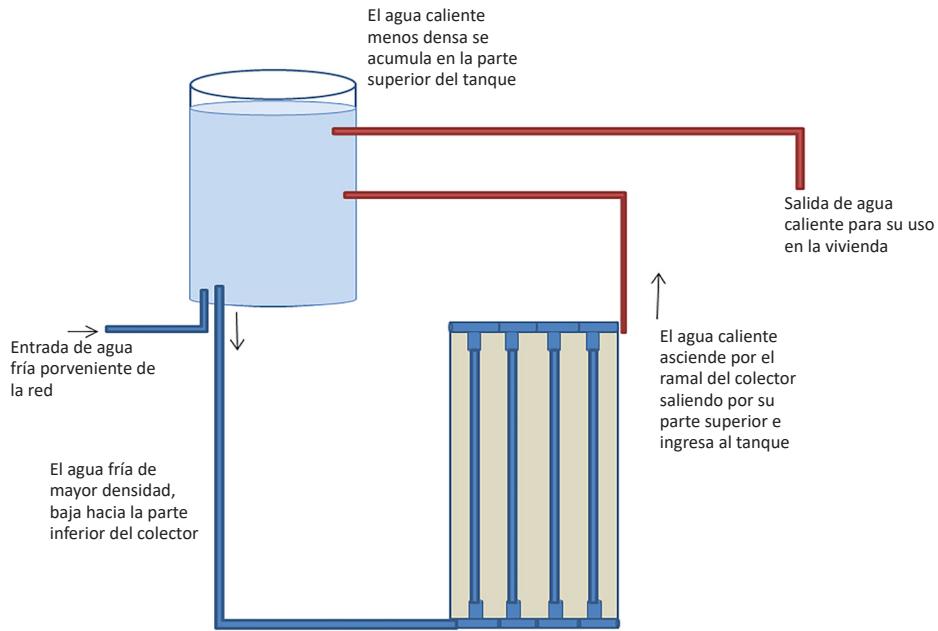


**Figura 4.8.** Parrilla conductora de agua (Noemí Sogari).

Recordar que en toda unión es necesario que se utilice sellador siliconado para evitar pérdidas, los caños no deben estar en contacto con la placa absorbente y se debe mantener la parrilla a una distancia de aproximadamente 1 cm.

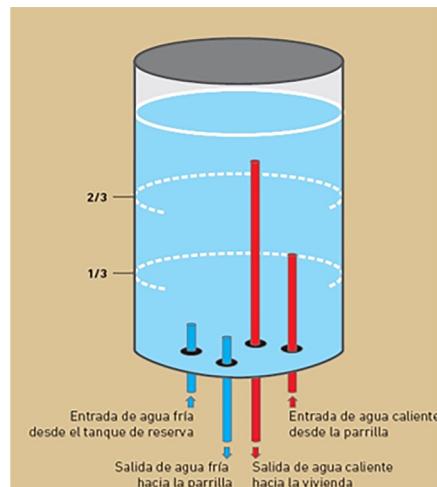
- *Construcción de la placa de absorción.* Es el elemento encargado de absorber la energía disponible del sol y transformarla en energía térmica. Es una placa lisa galvanizada, pintada de color negro mate. Funciona como un cuerpo negro que emite la energía que absorbe. Como la radiación no puede escapar hacia el exterior por la parte superior, queda atrapada en el interior del colector, contribuyendo a calentar el agua que circula por la malla de caños. Se coloca bajo la parrilla de caños, dejando una distancia de 1-2 cm de los caños, evitando el contacto directo a fin de no contribuir con su deterioro, dado que los caños son de PVC.
- *Construcción del aislante térmico.* Es fundamental para disminuir las pérdidas de calor por conducción en la parte inferior y lateral del colector. El poliestireno expandido es de 2-2.5 cm de espesor, este material es fácil de conseguir, simple de adosar al marco como a la placa absorbente, además es económico.
- *Construcción del tanque de almacenamiento.* El agua caliente proveniente del colector se recoge y almacena en el tanque. El mayor requerimiento técnico del tanque es su total aislamiento, con el objeto de conservar la temperatura requerida en el agua.

El sistema se conecta de acuerdo con el siguiente esquema:



**Figura 4.9.** Esquema de la disposición de los componentes del sistema para su instalación (Noemí Sogari).

Al realizar las conexiones en el tanque, respetar las alturas de la entrada y salida del agua caliente como se muestra en el siguiente esquema:



**Figura 4.10.** Esquema de la disposición de los caños dentro del tanque (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [Inta]).



## **RECOMENDACIONES**

- Verificar que no existan pérdidas en ninguna parte de las conexiones ni de los caños. Esto contribuirá al funcionamiento eficiente del sistema.
- La parrilla de conductores deberá permanecer cargada de agua, de otra forma se deteriorará rápidamente debido a las altas temperaturas existentes dentro de la caja.
- Limpiar periódicamente la superficie cobertora transparente, de esta forma se asegura el aprovechamiento de la mayor cantidad de radiación solar.
- Utilizar el agua caliente en forma racional y preferentemente por la tarde noche.



**Figura 4.11.** Calefón solar construido por los integrantes del GIEMA-FaCENA



## Referencias bibliográficas

DUFFIE, John A. y Beckman William A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. USA: Wiley.

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA]. *Esquema de disposición de caños para calefón solar*. Buenos Aires.



# Capítulo 5

## Secadores solares

### EL SECADO DE PRODUCTOS FRUTIHORTÍCOLAS

El contenido de agua en los alimentos favorece el desarrollo de reacciones químicas y la fomentación de microorganismos que deterioran al producto.

La deshidratación es una de las técnicas más utilizadas, desde la antigüedad para conservar los alimentos hasta su ingreso a los centros de consumo. Si bien existen productos comercializados en forma fresca, su deshidratación resulta una alternativa para el agricultor a la hora de introducirlo al mercado, sobre todo cuando existe sobreproducción. El secado de productos frutihortícolas es una de las actividades que consume importantes cantidades de energía. Si la energía utilizada es convencional, el costo se suma al del producto encareciéndolo.

El proceso de secado más antiguo es la exposición directa al sol del producto distribuido en el suelo. Si bien este procedimiento es el más económico, la calidad del producto seco se afecta negativamente debido al ataque de insectos, roedores y pájaros, además de la contaminación con polvo, hongos, etc.

La incidencia directa de la radiación solar sobre muchos productos perjudica su calidad, por lo que resulta de utilidad que se distribuyan en lugares protegidos.

Durante el proceso de secado, se extrae agua del producto, por ejemplo, poniéndolo en contacto con flujos de aire a temperatura ambiente o precalentado. De esta forma, el aire fluye sobre el producto a secar transfiriéndole calor y vaporizando la humedad que es arrastrada por el aire. Este proceso de transferencia de masa y energía ocurre en forma simultánea. El calor del flujo de aire se transfiere al producto y la humedad de este último al aire, produciéndose de esta forma un aumento de la humedad relativa del aire y una disminución de la temperatura.

La eficiencia del proceso aumenta si se utiliza flujo de aire seco precalentado. Si la humedad relativa del aire en condiciones ambientales es del 60% a 25 °C, disminuyendo la humedad a 30% e incrementando la temperatura a 30 °C se logra aumentar la capacidad de arrastre de humedad.



## CONTENIDO DE HUMEDAD

Los alimentos contienen agua en mayor o menor proporción. El porcentaje de contenido varía entre un 60 y 95% en los alimentos naturales. Los tejidos vegetales y animales contienen agua en dos formas: «libre» o «ligada». La primera se libera fácilmente, la segunda se halla absorbida sobre la superficie de partículas coloidales o combinada, ligada a las proteínas y moléculas de sacáridos.

Todo producto alimentario consta de agua más materia seca. La masa de agua (*magua*) presente en un producto puede medirse en forma directa, para ello, se determina la masa total del producto, luego se lo expone al calor, a temperatura constante de 104 °C, por ejemplo, en una estufa, para eliminar el agua mediante su evaporación, y cuando la masa alcanza un valor constante, se toma ese valor como masa seca.

$$m_{\text{agua}} = m - m_s \quad (5.1)$$

El mecanismo del proceso de remoción de la humedad de un alimento depende de la forma en el que el agua esté ligado al sólido, cuanto más compacto y unido al alimento esté, más difícil resulta su extracción.

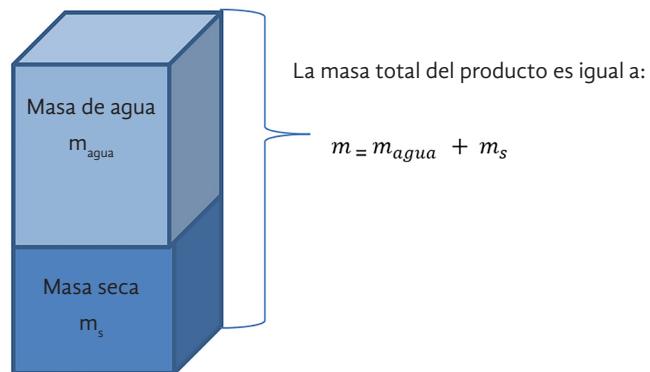
Si bien este método es simple y muy usado, se debe tener en cuenta que a ciertas temperaturas el alimento es susceptible de descomponerse y se volatilizan otras sustancias además de agua, por otro lado, también pueden perderse otras materias volátiles aparte de agua.

El contenido de humedad en base húmeda ( $X_{bh}$ ) se define como la masa de agua presente en un producto por unidad de masa del elemento sin secar.

$$X_{bh} = \frac{m_{\text{agua}}}{m_i} = \frac{m - m_s}{m_i} \quad (5.2)$$

Donde:  $X_{bh}$  es contenido de humedad en base húmeda [kg de agua/kg de materia húmeda],  $m$  es la masa total del producto [kg],  $m_s$  es la masa del producto seco [kg] y  $m_i$  es la masa inicial del producto [kg].

En el instante inicial, y coincidirán; con el paso del tiempo, el agua del producto se evapora, por lo que la masa inicial del producto disminuirá.



**Figura 5.1.** Representación de la proporción de agua y masa seca de un producto (Noemí Sogari).

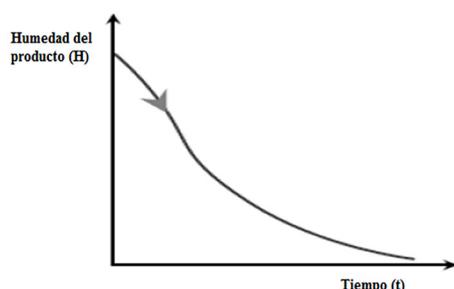
## VELOCIDAD DE SECADO

Se obtiene determinando la variación de la masa del producto a intervalos regulares de tiempo. La expresión matemática es:

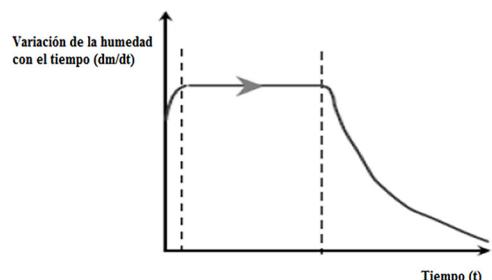
$$V_s = \frac{dm}{dt} = \frac{(m_{t+dt} - m_t)}{dt} \quad (5.3)$$

Donde:  $V_s$  es la velocidad de secado [kg agua/kg materia seca/hora],  $m$  es la masa del producto en el instante  $t$  [kg agua/kg materia seca] y  $dt$  es la variación del tiempo [hora].

La representación gráfica de la variación de la humedad y la velocidad de secado se muestran en la Figura 5.2.



**Figura 5.2.a.** Variación de la humedad del producto con el tiempo (Roman, 1992).



**Figura 5.2.b.** Velocidad de secado del producto (Roman, 1992).

La Figura 5.2.a muestra que el producto expuesto al calor vaporiza el agua interior, por lo tanto, a medida que transcurre el tiempo el contenido de humedad disminuye.

La Figura 5.2.b. muestra las tres fases presentes en el proceso de secado:

**Fase 1.** En este corto periodo, el producto recibe el calor del aire que lo rodea, la velocidad aumenta.

**Fase 2.** Durante este periodo, la velocidad permanece constante y está determinada por la temperatura, humedad absoluta y velocidad del flujo de aire circundante. La superficie del producto permanece saturada, dado que el agua en el interior del producto se mueve rápidamente hacia la superficie manteniéndola saturada. El proceso de secado en un producto alimentario, durante este periodo, se asemeja a la evaporación de un líquido.

**Fase 3.** En este periodo, la velocidad de deshidratación decrece. Cuando el producto pierde de la mayor cantidad de agua de la superficie, el resto debe difundirse del interior del producto a su superficie para evaporarse, esto da lugar al periodo de velocidad de secado decreciente, durante el que se dificulta la pérdida de agua. La duración de esta fase depende del contenido de agua inicial en el producto.

## ACTIVIDAD DEL AGUA

El agua es la materia prima para la reproducción de microorganismos, causantes de la degradación de los alimentos, cuanto mayor disponibilidad de agua exista en el alimento, menor será el tiempo de vida útil del mismo.

Por lo tanto, la cantidad de agua existente en un producto no es el factor relevante en la proliferación de microorganismos, sino la disponibilidad de agua que contribuya con el crecimiento de los mismos. El concepto de contenido de humedad es insuficiente para indicar lo perecedero que es un alimento, al no considerar las interacciones del agua con otros componentes del mismo.

Los principales microorganismos que contribuyen a los daños de frutas y verduras son las bacterias y hongos (mohos y levaduras). Cada microorganismo tiene una temperatura óptima para su crecimiento, pero además requiere de una cantidad de agua disponible para su desarrollo.

El objetivo principal del secado, en cuanto a aumentar la estabilidad del producto, se define en términos de la depresión de la actividad de agua, dado que es una medida indirecta del agua que está disponible en un producto para participar en las reacciones de deterioro.

La actividad se define como la relación entre la presión de vapor de agua del aire alrededor de un alimento ( $p_v$ ) y la presión de vapor de saturación ( $p_{vs}$ ), permaneciendo ambos a una misma temperatura.

$$a_w = \frac{p_v}{p_{vs}} \quad (5.4)$$

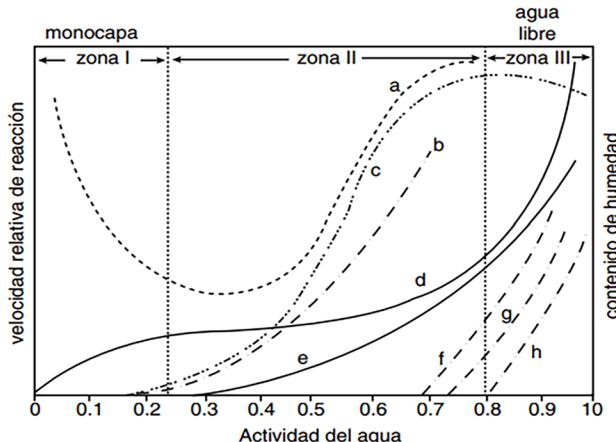
Donde:  $a_w$  es la actividad del agua en el producto [adimensional],  $p_v$  es la presión de vapor del aire alrededor del producto [Pa] y  $p_{vs}$  es la presión de vapor de saturación a la temperatura  $T_s$  [Pa].

La actividad del agua libre dispuesta en una bandeja es igual a uno. En este caso, el agua intercambia vapor de agua con el aire que lo rodea. Hasta que se establece una situación de equilibrio, el aire está saturado de vapor, siendo la presión de vapor de saturación  $p_{vs}$  a la temperatura  $T_s$  que es la temperatura a la que se encuentra el aire y el producto. Si la bandeja se reemplaza por el producto a la misma temperatura, el vapor liberado al aire será diferente, adquiriendo la presión de vapor un valor  $p_v$ .

Cuanto más alto sea el valor de la actividad del agua y se acerque a 1.0, que corresponde al agua pura, mayor inestabilidad presenta un alimento. Por el contrario, los alimentos que a temperatura ambiente poseen valores de actividad del agua menores a 1.0 son más estables.

El límite inferior de actividad de agua para el crecimiento microbiano es de 0.90 para la mayoría de las bacterias, 0.87 para muchas levaduras y 0.80 para la mayoría de los hongos (Badui Dergal, 2006).

La Figura 5.3 muestra, con fines didácticos, los cambios que ocurren en los alimentos en función de la actividad del agua.



**Figura 5.3.** Cambios que ocurren en los alimentos en función de la actividad del agua: a) Oxidación de lípidos; b) Reacciones hidrolíticas; c) Oscurecimiento no enzimático; d) Isoterma de sorción; e) Actividad enzimática; f) Crecimiento de hongos; g) Crecimiento de levaduras, y h) Crecimiento de bacterias (Badui Dergal, 2006: 15).

Las zonas hipotéticas dependen del agua contenida en el producto.

**Zona I.** El agua equivale a la capa monomolecular, su eliminación requiere mucha energía y no es recomendable porque su presencia tiene efecto protector contra reacciones de oxidación de lípidos, ya que actúa como barrera del oxígeno.

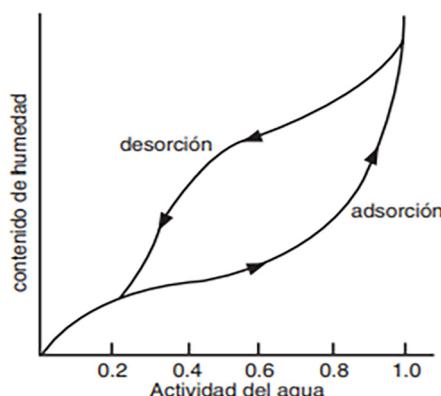
**Zona II.** El agua se localiza en capas más estructuradas y en microcapilares. Su eliminación reduce la actividad de agua a 0.25.

**Zona III.** El agua contenida en un producto se considera «libre», se encuentra en macrocapilares y forma parte de las soluciones que disuelven las sustancias de bajo peso molecular. Son las más fáciles de eliminar. Su eliminación reduce la actividad de agua a 0.8.

## ISOTERMAS DE SORCIÓN

La actividad del agua es una propiedad intrínseca y se relaciona de manera no lineal con el contenido de humedad mediante las curvas o isoterma de adsorción y desorción (ver Figura 5.4).

Las curvas de sorción son importantes en el análisis del comportamiento de secado de los productos. Las mismas informan sobre el contenido de humedad que debe alcanzar para que la actividad corresponda al del material estable. Para un valor determinado de temperatura existe, para cada producto, una correspondencia entre el contenido de humedad de equilibrio y la actividad de agua.

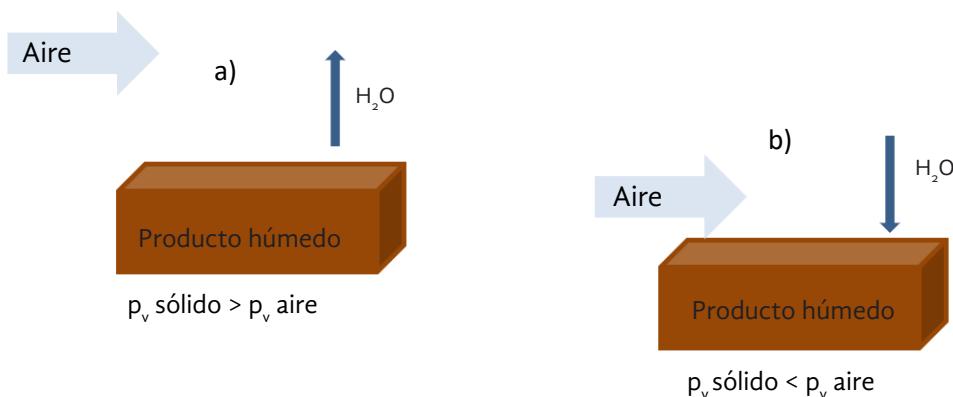


**Figura 5.4.** Curvas típicas de las isotermas de adsorción y desorción de los alimentos  
(Badui Dergal, 2006: 17).

Para comprender cómo se trazan las curvas, considérese un alimento con agua encerrado a una temperatura determinada en una cámara adiabática, el producto transfiere agua al aire circundante hasta que, al cabo de algún tiempo, adquirirá una humedad relativa constante que estará en equilibrio (sin movimiento en ningún sentido) con el contenido de agua del alimento (ver Figura 5.5.a). De esta práctica se tendrá un par de valores, de

humedad relativa vs contenido de agua, a una temperatura determinada; si esto se repite con diferentes porcentajes de agua, y los resultados se grafican, se obtiene la isoterma de desorción (deshidratación del sólido).

Para obtener la curva isoterma de adsorción, se parte de un producto seco y se somete a atmósferas de humedad relativa elevadas; se producirá una transferencia de agua al sólido hasta llegar a un equilibrio (hidratación del sólido, ver Figura 5.5.b).



**Figura 5. 5.** Esquema que muestra la relación entre la presión de vapor del sólido y del flujo de aire (Noemí Sogari).

## SECADEROS SOLARES

Un secador es un dispositivo que utiliza una fuente de calor y flujo de aire para remover la humedad de un producto.

Un secadero solar utiliza la energía proveniente del sol como fuente de calor, resultando un medio efectivo y eficiente en materia de costos, para preservar los alimentos del deterioro provocado por los microorganismos que proliferan en ambientes húmedos.

El diseño de un secador debe considerar la apropiada contención de los alimentos para que se evapore el agua contenida en ellos.

Básicamente, un secadero solar consta de un colector captador y transformador de energía solar en térmica y una cámara donde se distribuye el producto a deshidratar. Estos elementos constitutivos se integran de distintas maneras, adoptando diversas formas.

### Clasificación

Según Saravia (2006), los secaderos se clasifican en:

**Secador solar directo.** Este tipo de secador resulta económico, pues el colector y la cámara constituyen una unidad. La cámara que contiene al producto también cumple la función del colector recibiendo la radiación solar (ver Figura 5.6.a).

La radiación incide directamente sobre el producto, resultando más efectivo el aprovechamiento de la energía para evaporar el agua contenida en el producto. Esto ocurre debido a que la presión de vapor en la superficie del producto aumenta debido a la absorción de radiación. El incremento del gradiente de presiones de vapor entre el producto y el aire circundante acelera el secado.

La circulación del aire en estos secaderos con frecuencia es por convección natural. En este caso, el control del proceso es confiable, contribuyendo al aumento excesivo de la temperatura del aire y, con ello, al pardeamiento enzimático de algunos productos. La incidencia directa de la radiación solar sobre algunos productos resulta negativa, dado que provoca reacciones químicas y puede destruir compuestos orgánicos de interés comercial.

**Secador solar indirecto.** El colector y la cámara se presentan como elementos separados (ver Figura 5.6.b). El aire se calienta en el colector y el producto se distribuye en la cámara opaca a la radiación. La opacidad de la cámara de secado protege los productos sensibles de la incidencia directa de la radiación. La manipulación del producto a secar, así como las tareas de carga y descarga de la cámara, resultan más simples al contar con una cámara separada del colector. Resulta más simple integrar una fuente de energía auxiliar y contar así con un sistema híbrido. Al requerir dos elementos constitutivos separados, el tamaño del dispositivo aumenta y, con ello, el costo. Otra desventaja respecto al secadero solar directo es que, para evaporar la misma cantidad de agua, se requiere mover mayor cantidad de aire a mayor temperatura en la cámara.

**Secador solar mixto.** En estos dispositivos, la colección de radiación se realiza tanto en el colector como en la cámara de secado (ver Figura 5.6.c).

La circulación del aire en el interior del secadero puede realizarse por distintos métodos.

- Convección natural: el aire se mueve debido a la diferencia de temperatura en el interior del secadero. El movimiento se realiza naturalmente, no se necesita un mecanismo mecánico o eléctrico que remueva el aire. La desventaja de usar este método de circulación del aire en el interior de un secadero es que resulta difícil controlar la velocidad del flujo. Cuando los equipos crecen en tamaño, resulta difícil incorporar este tipo de circulación del aire. En este último caso, la velocidad del aire en el interior alcanza como máximo valores de alrededor de 0.3 m/s.
- Convección forzada: el aire fluye mediante el uso de un ventilador. La ventaja de este tipo de circulación es que se puede regular la velocidad del flujo másico que remueve la humedad del producto distribuido en la cámara de secado. En grandes instalaciones, la circulación del aire no representa un problema. La circulación forzada puede mantenerse durante un día completo, favoreciendo el proceso durante la primera etapa de secado, eliminando el agua libre contenida en el producto.



**5.6. a)** Secador directo  
(Terra, 2010).



**5.6. b)** Secador indirecto (Noemí Sogari).



**5.6. c)** Secador mixto  
(Inenco, s/d).

### **SECADERO SOLAR INDIRECTO TIPO GABINETE**

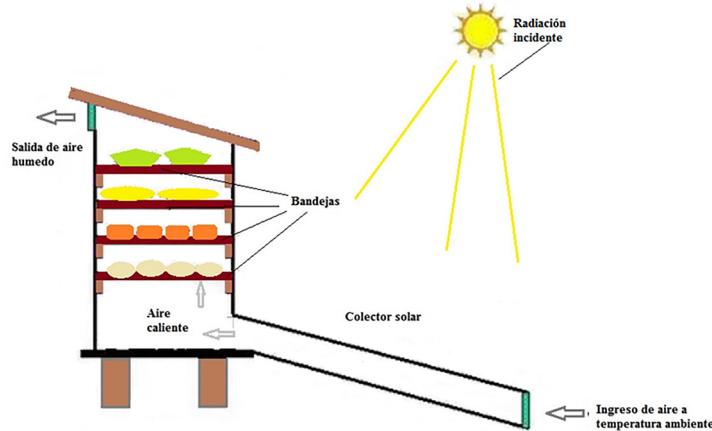
Argentina alcanzó en la última década el octavo lugar como productor mundial de alimentos y el quinto como exportador. La consolidación de estos lugares en el tiempo depende del manejo de nuevos paradigmas.

La globalización y la desregulación de los mercados han introducido cambios al sistema agroalimentario, modificando el escenario donde tradicionalmente se desenvolvían los productores en pequeña escala. Los emprendimientos familiares que permanecen son aquellos que han logrado diversificar sus producciones y canales de comercialización (Cravotti y Palacios, 2013).

Los productos frutihortícolas tienen un corto tiempo de vida debido al alto porcentaje de humedad contenida. Una alternativa para su conservación es la deshidratación de aquellos alimentos que se encuentren en buen estado alimenticio pero que, por motivos de tamaño, desigualdades o deformaciones superficiales, exceso de producción, etc., no son vendidas como producto fresco. La deshidratación de estos alimentos aumenta su periodo de vida, conservándose los nutrientes y aromas que contienen antes de su proceso de secado.

El secadero solar tipo gabinete es una de las alternativas recomendadas para agregar valor a los emprendimientos familiares sobre los que se hacía mención antes, permitiéndoles introducir al mercado los productos frutihortícolas.

Este secadero consta básicamente de un colector de energía solar y una cámara de secado, donde se distribuye el producto a deshidratar (ver Figura 5.7).

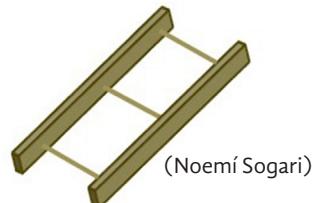


**Figura 5.7.** Esquema de secador solar tipo gabinete (Noemí Sogari).

## CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR

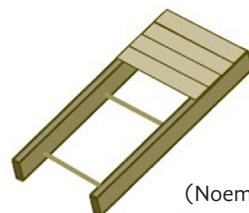
### Armado del colector solar

**Figura 5.8.** Disponer los laterales del colector, dos tablas de  $0.025 \times 0.12 \times 2.10$  m e insertar tres varillas de hierro que oficiarán de soportes de la placa galvanizada ondulada N° 27.

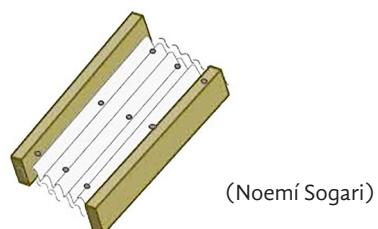


(Noemí Sogari)

**Figura 5.9.** Cubrir la parte posterior del colector con machimbre. Para mejorar la aislación, colocar entre la chapa y el machimbre poliestireno expandido de 1.00 cm de espesor.

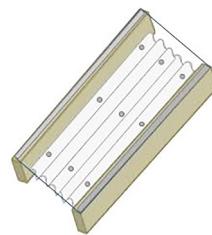


(Noemí Sogari)



(Noemí Sogari)

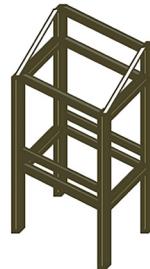
**Figura 5.10.** Fijar la chapa galvanizada a las varillas de hierro.



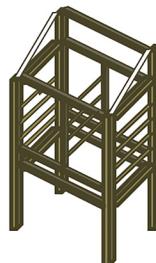
(Noemí Sogari)

### Armado de la cámara de secado

**Figura 5.12.** Montar la estructura de la cámara. Para ello, se necesitan 2 parantes de  $0.05 \times 0.05 \times 2.00$  m y 2 de  $0.05 \times 0.05 \times 1.60$  m, 4 tabiques de  $0.05 \times 0.05 \times 0.50$  m, 4 tabiques de  $0.05 \times 0.05 \times 1.15$  m, 1 travesaño de  $0.05 \times 0.05 \times 1.15$  m y 2 travesaños de  $0.05 \times 0.05 \times 0.70$  m.

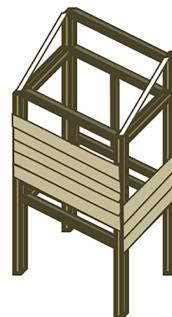


(Noemí Sogari)



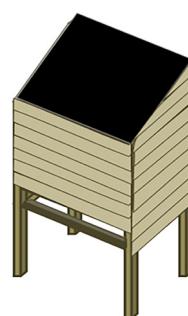
(Noemí Sogari)

**Figura 5.13.** Armar e insertar los soportes donde apoyar las bandejas.  
- Cortar machimbre a medida y fijar como muestra el esquema.



(Noemí Sogari)

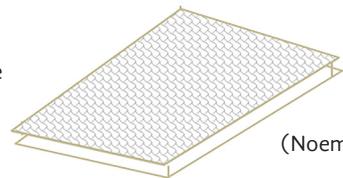
**Figura 5.14.** Revestir con machimbre las superficies laterales y frente de la cámara.



(Noemí Sogari)

**Figura 5.15.** Cubrir el techo con chapa galvanizada lisa, pintada de negro mate.

**Figura 5.16.** Armar las bandejas. Para ello, se necesitan listones de  $0.015 \times 0.30 \times 0.50$  m, clavos y tela mosquitera.



(Noemí Sogari)

## PREPARACIÓN DE LOS PRODUCTOS FRUTIHORTÍCOLAS

**Figura 5.17.** Selección del producto. Separar los productos en buen estado y descartar los que tienen manchas o están muy maduros.



(Giesma)

**Figura 5.18.** Lavado. Los productos deben recibir rápidamente un intenso lavado con agua potable de red o en su defecto si se utiliza aguas de pozo, vertiente, etc., adicionando  $1 \text{ cm}^3$  (20 gotas) de lavandina con 80 gr de cloro activo por cada 10 l de agua.



(Giesma)

**Figura 5.19.** Pelado, cortado uniforme. Estas operaciones se realizan utilizando implementos, preferentemente de acero inoxidable, con procesadoras a nivel hogareño o con máquina para procesamiento comercial de pequeña escala. Es conveniente realizarlo en el momento en que se tiene todo preparado para iniciar el proceso de secado.



(Giesma)

**Figura 5.20.** Pretratamiento. Según el tipo de producto, se aplican diferentes tipos de pretratamientos tales como blanqueado, baño en jugo de limón, salado, baño en solución de metabisulfito de sodio o potasio, etc. (se explican a continuación).



(Giesma)

**Figura 5.21.** Distribución uniforme en las bandejas para el secado. Esta distribución es aconsejable, ya que permite el flujo de aire caliente a través de las bandejas.



(Giesma)



**Figura 5.22.** Control del tiempo de secado. No exceder el tiempo de secado recomendado para cada producto.



**Figura 5.23.** Productos deshidratados. Retirar los productos secos, envasarlos. No olvidar limpiar las bandejas.

(Giesma)

### Algunos tratamientos previos al secado

Estos tratamientos son procesos físicos y/o químicos anteriores al secado, cuya finalidad es evitar o reducir el deterioro del producto durante y después del secado.

- **Inmersión en baño de salmuera.** Muchas frutas y hortalizas rápidamente comienzan a oscurecer cuando se pelan y cortan. Por ello, se las sumerge en una salmuera liviana que se prepara con 20 gr de sal de mesa por litro de agua potable, y se necesita aproximadamente un litro de salmuera por cada kilogramo de fruta u hortaliza. La salmuera debe ser desechara al finalizar el día o cuando se cambia de materia prima.
- **Escaldado o blanqueo.** Este tratamiento se aplica solamente a hortalizas u hongos (no se usa en frutas). Consiste en un tratamiento térmico para inactivar enzimas, que de otro modo disminuirán mucho la calidad del producto, particularmente cuando se almacena por largo tiempo. Se sumerge en agua a temperatura de 95 °C. Se debe evitar la cocción. Es importante respetar los tiempos de escaldado para cada producto. Utilizar para ello agua potable hirviendo, 3 l de agua hirviendo por cada kg de hortaliza que se escalde, recipiente de acero inoxidable de 5 l de capacidad por cada 3 l de agua. Y se procede de la siguiente manera: se retira la hortaliza del baño de salmuera y se deja escurrir unos 2-3 minutos. Luego, se coloca en un canasto metálico de acero inoxidable (tipo canasto de freidora) y se sumerge en el agua hirviendo, durante el tiempo que corresponde, según el producto. Inmediatamente transcurrido el tiempo, se retira la hortaliza y se enfriá rápidamente. El enfriamiento se realiza inmediatamente después del escaldado, con chorro de agua potable o tratada con cloro durante el tiempo que corresponda, según el producto. Después, se escurre convenientemente.
- **Sulfitado.** Este tratamiento inhibe las reacciones de oscurecimiento de los productos a deshidratar, actuando sobre los azúcares. Para realizar el sulfitado, se procede a la inmersión del producto en una solución acuosa de metabisulfito de sodio o potasio a razón de 5 a 10 gr de dicho producto por litro durante 5 a 10 minutos a temperatura

ambiente<sup>1</sup>. Usar recipientes no sensibles a la corrosión, tales como acero inoxidable, vidrio, entre otros.

- **Bicarbonato de sodio.** El bicarbonato de sodio estabiliza la clorofila (pigmento verde de las plantas) conservando de esta manera su color verde original. También ablanda las capas exteriores del producto, facilitando la salida del agua durante el secado. Este pretratamiento se aplica generalmente para hortalizas y leguminosas de color verde disolviendo 30 gr de bicarbonato de sodio más 3 gr de sal común por cada litro de agua. El contenido de bicarbonato de sodio en el agua deberá alcanzar un pH de 9, lo que se puede controlar con papel indicador de pH.

- **Temperatura de secado**

| PRODUCTO           | TEMPERATURA MÁXIMA DE SECADO (°C) | PRODUCTO | TEMPERATURA MÁXIMA DE SECADO (°C) |
|--------------------|-----------------------------------|----------|-----------------------------------|
| Cebolla            | 55                                | pimentón | 60                                |
| Hortalizas en hoja | 50                                | banana   | 70                                |
| Tomate             | 65                                | manzana  | 50                                |
| Repollo            | 55                                | mamón    | 65                                |
| Zanahoria          | 60                                | mango    | 65                                |
| Ají                | 60                                |          |                                   |
| Ajo                | 55                                |          |                                   |

### Envasado

Para el envasado, se recomiendan envases herméticos para evitar la rehidratación del producto seco por la humedad ambiental. Un material muy utilizado para el envasado de pequeñas cantidades hasta aproximadamente 1 kg son bolsas de polipropileno transparente, cuya abertura se puede soldar con el calor.

---

1. Las normas de la Organización Mundial para la Salud (OMS) fijan la concentración máxima de azufre en un producto deshidratado en 0.05%.



## Referencias bibliográficas

- «AlSolfruits, secador deshidratador solar directo» (2010). En *Terra-Ecología práctica*. Disponible en <https://bit.ly/3NHlpdj>
- BADUI DERGAL, Salvador (2006). *Química de los alimentos*. México: Pearson Educación.
- CORVALAN, R., Horn, M., Roman, R. y Saravia, L. (1992). *Ingeniería del secado solar* (1<sup>a</sup> ed.) Madrid: CYTED, Programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo del V Centenario.
- CRAVIOTTI, Clara y Palacios, Paula (2013). «La diversificación de los mercados como estrategia de la agricultura familiar». *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 51, suplemento 1. Brasil.
- KEEY, R.B. (1980). «Theoretical foundations of drying technology». En Mujumdar A.S. (ed.) *Proc. Int. Symp. on Drying*. Nueva York: Hemisphere Publishing Co.
- Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional [Inenco] (Sin fecha). *Secador mixto*. Argentina: Conicet.
- SARAVIA, Luis y Horn, Manfred (2006). *Ingeniería del secado solar*. Perú: Cyted.



## AUTORA

**Clotilde Noemí Sogari.** Es doctora en Ciencias, especialista en Energías Renovables y en Docencia Universitaria; investigadora Categoría II otorgada por el Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología de la Nación.

Actual directora del Grupo de Investigación en Energías Sustentables y del Medio Ambiente (GIESMA) Facena-Unne y corresponsable de la coordinación de la Red Iberoamericana de Investigación, Desarrollo y Transferencia para la aplicación de las Energías Renovables y del Ambiente RIBERA- AUIP.

Dirige proyectos de Voluntariado Universitario del Ministerio de Educación de la Nación y es codirectora de proyectos de investigación en el tema Aplicaciones de las Energías Renovables y Cuidado del Ambiente.

A su vez es extensionista en los programas “Educar UNNE a todos” y “La Universidad en el Medio”, en los temas de secado solar de productos frutihortícolas, construcción de calefones solares y responsable de la transferencia de 6 secaderos solares para diversos municipios de Corrientes, Córdoba y Santa Fe. Brinda asesoramiento para la aplicación de energías renovables a la Cooperativa Fruti-hortícola, al Instituto de Vivienda de Corrientes, a la Asociación de Carpinteros de Concordia Entre Ríos.

Es profesora adjunta del departamento de Física (Facena-Unne). Dicta y ha participado en diversos cursos de posgrado en la temática de energías renovables en Universidades de Salta, Córdoba, Santiago del Estero, Nordeste, Brasil, Uruguay.

Se desempeña como evaluadora de proyectos de investigación de las Universidades de Flores, Nacional de Misiones y de proyectos federales del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Nación.

Es directora de becas de investigación de alumnos de grado, de maestría y de doctorado. Autora y coautora de publicaciones y presentaciones en revistas y foros internacionales y nacionales sobre temas relacionados con energías renovables, uso racional de la energía, cuidado del ambiente y educación.





Universidad Nacional  
del Nordeste

**Rector**

Gerardo Omar Larroza

**Vicerrector**

José Leandro Basterra

**Secretaria General**

**de Ciencia y Técnica**

Laura Leiva

**Gerente**

Carlos Quiñonez



**Aplicaciones térmicas de la energía solar.**  
**Construcción de sistemas para calentar agua y**  
**secar productos frutihortícolas** se compuso y dia-  
gramó en Eudene, en el mes de noviembre de 2022.



NOEMÍ  
SOGARI

APUNTES DE CÁTEDRA ● CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
Y AGRIMENSURA

El uso de las energías renovables es un tema investigado y tratado ampliamente a nivel nacional e internacional. En Argentina se despertó el interés en los últimos 10 años con mayor intensidad. **Las instituciones educativas constituyen un medio de difusión y capacitación de las comunidades en el uso y aprovechamiento de las energías renovables.**

Este libro transfiere información sobre el uso de tecnología simple para mejorar la calidad de vida de las comunidades. Contiene los fundamentos teóricos y los conocimientos necesarios para construir sistemas térmicos que utilizan energía solar para calentar agua y para deshidratar productos frutihortícolas.



Universidad Nacional  
del Nordeste

ISBN 978-950-55-2075-3  
9 789506 1562076