



TOGETHER
for a sustainable future

OCCASION

This publication has been made available to the public on the occasion of the 50th anniversary of the United Nations Industrial Development Organisation.



TOGETHER
for a sustainable future

DISCLAIMER

This document has been produced without formal United Nations editing. The designations employed and the presentation of the material in this document do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries, or its economic system or degree of development. Designations such as “developed”, “industrialized” and “developing” are intended for statistical convenience and do not necessarily express a judgment about the stage reached by a particular country or area in the development process. Mention of firm names or commercial products does not constitute an endorsement by UNIDO.

FAIR USE POLICY

Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

CONTACT

Please contact publications@unido.org for further information concerning UNIDO publications.

For more information about UNIDO, please visit us at www.unido.org

08054 - S

Serie "Desarrollo y transferencia de tecnología"

Núm. **5**

**TECNOLOGIA
PARA APROVECHAR
LA ENERGIA
SOLAR**



NACIONES UNIDAS

TECNOLOGIA PARA APROVECHAR LA ENERGIA SOLAR

ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL
Viena

Serie "Desarrollo y transferencia de tecnología", núm. 5

TECNOLOGIA PARA APROVECHAR LA ENERGIA SOLAR



NACIONES UNIDAS
Nueva York, 1979

Las denominaciones empleadas en esta publicación y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, de parte de la Secretaría de las Naciones Unidas, juicio alguno sobre la condición jurídica de ninguno de los países, territorios, ciudades o zonas citados, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites.

La mención de nombres de empresas y productos comerciales no entraña un respaldo por parte de la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI).

Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de sus autores y no reflejan necesariamente las opiniones de la secretaría de la ONUDI.

El material contenido en la presente publicación puede citarse o reproducirse con entera libertad, siempre que se mencione su origen y se remita a la secretaría un ejemplar de la publicación en que figure la cita o la reproducción.

Prefacio

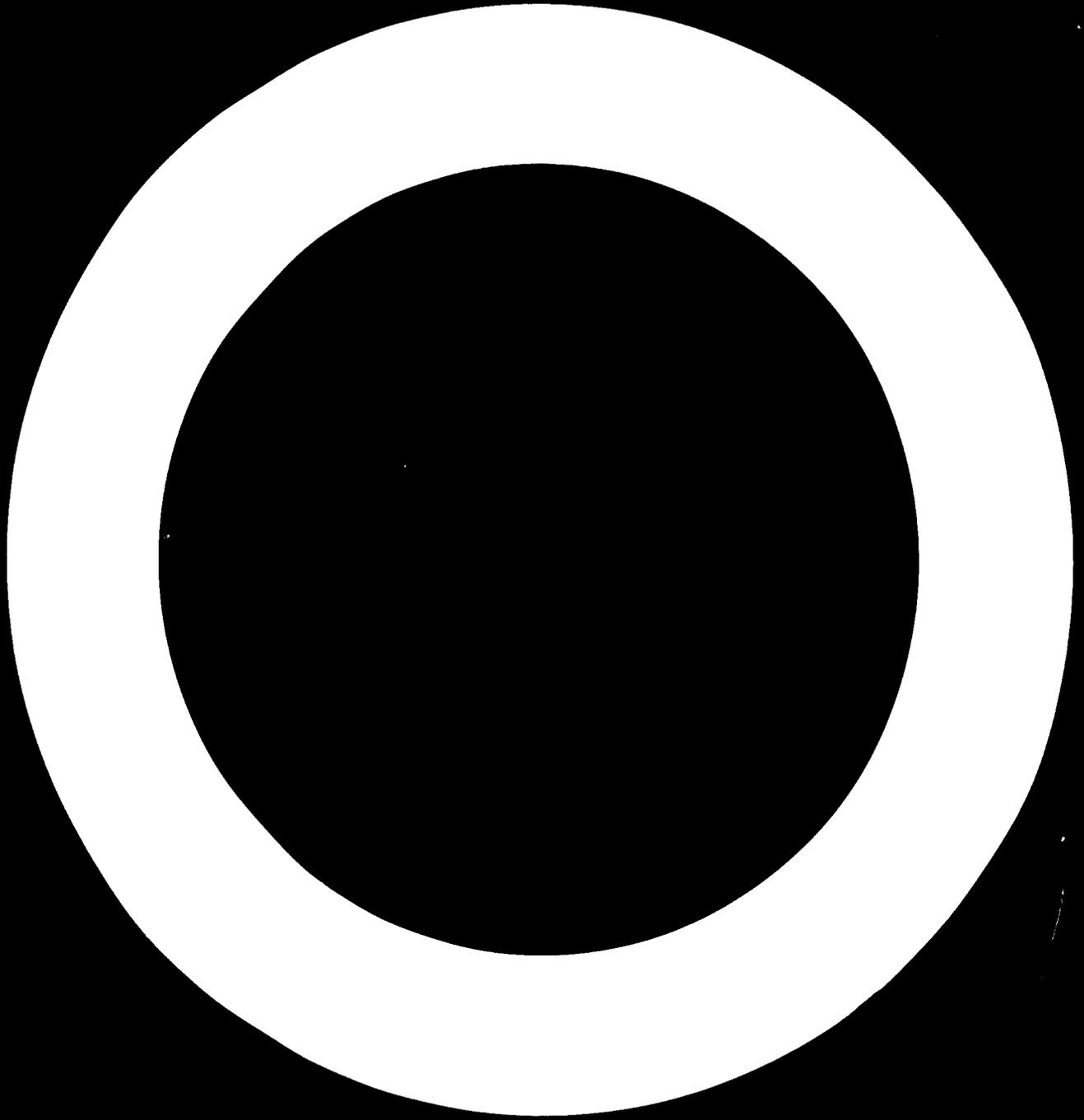
Como consecuencia de la crisis energética, se ha centrado la atención en la necesidad no sólo de conservar las fuentes tradicionales de energía, sino también de explorar fuentes no tradicionales, como la radiación solar, los vientos, la biomasa, las mareas, las fuentes geotérmicas, etc. No hay ningún motivo para que estos importantes recursos naturales no se exploten en beneficio de los países en desarrollo, en particular la radiación solar, que es comparativamente abundante en la mayor parte de ellos. Una acción coordinada en materia de explotación de fuentes no tradicionales de energía contribuiría considerablemente a que los países en desarrollo lograsen su objetivo de alcanzar una participación del 25% en la producción industrial mundial para el año 2000. De conformidad con una recomendación de la Mesa Redonda Ministerial sobre Cooperación Industrial y Tecnológica entre Países en Desarrollo, celebrada en Nueva Delhi en enero de 1977, la función de la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) consistiría en poner en marcha programas de cooperación en actividades de investigación aplicada y desarrollo técnico en el sector industrial de la energía, aprovechando los mecanismos y las capacidades de que ya se dispone en los países en desarrollo.

El presente volumen trata de la tecnología de aprovechamiento de la energía solar en beneficio de los países en desarrollo. Se espera que, gracias a los nuevos avances que se realicen en esta esfera, la energía solar sirva, para satisfacer no sólo las necesidades concretas de la industria, sino también las necesidades diarias de la población de las zonas rurales y regiones remotas de dichos países. El material del presente volumen se basa principalmente en las contribuciones presentadas a la Reunión de Expertos sobre la tecnología solar existente y las posibilidades de fabricar equipo solar en los países en desarrollo, organizada por la ONUDI en cooperación con el Organismo Austriaco para la Energía Solar y el Espacio Ultraterrestre (ASSA) y celebrada en Viena del 14 al 18 de febrero de 1977¹. Además, se incorpora aquí información obtenida por la ONUDI como resultado de los contactos sobre el terreno establecidos por la Organización en muchos países en desarrollo, así como en países industrializados. Debido a la complejidad de la tecnología relacionada con la energía solar y a la rapidez con que se están desarrollando las actividades de investigación y desarrollo técnico en materia de energía solar en muchas partes del mundo, el presente estudio de la cuestión no puede ser exhaustivo. No obstante, considerado como primer paso de la ONUDI en esta esfera, deberá constituir una importante ayuda para los gobiernos interesados de países en desarrollo en la tarea de ponerse al corriente de las tendencias más recientes en la esfera de la tecnología solar y establecer una base de acción a nivel nacional.

La primera parte del presente volumen contiene dos monografías: recomendaciones para un programa de aprovechamiento de la energía solar en los países en desarrollo, preparadas por el alto asesor interregional de la ONUDI sobre industrias mecánicas, y un documento de antecedentes sobre la utilización de energía solar en los países en desarrollo, preparado para la ONUDI por un consultor. La segunda parte consiste en resúmenes de la labor que se está realizando en algunos países e instituciones, y la tercera comprende 17 monografías técnicas relativas a la conversión de la energía solar en energía mecánica o eléctrica, el diseño de colectores solares, el aprovechamiento de la energía solar para calefacción, refrigeración, destilación, secado y usos de cocina, y la transferencia de tecnología.

En el contexto de la próxima Conferencia de las Naciones Unidas sobre Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, que se celebrará en Viena en agosto y septiembre de 1979, varios países en desarrollo están prestando atención a la aplicación de tecnología para satisfacer algunas de sus necesidades en materia de energía. El presente estudio, junto con otros que preparará la ONUDI, está concebido como una contribución a la Conferencia y a sus actividades preparatorias.

¹ Er. el anexo I, página 161, figuran las recomendaciones de la Reunión.



INDICE

Primera parte

Aprovechamiento de la energía solar en países en desarrollo

	<i>Página</i>
Energía solar: Programa de acción recomendado para los países en desarrollo <i>Secretaría de la ONUDI</i>	3
Fomento del aprovechamiento de la energía solar en países en desarrollo <i>Assad Takla</i>	7

Segunda parte

Resúmenes de programas nacionales e institucionales en materia de energía solar

Programas nacionales	45
Programas institucionales	53

Tercera parte

Selección de monografías técnicas sobre aprovechamiento de la energía solar

Una central solar de 10 kW <i>Hans Kleinrath</i>	57
Transformación de la energía solar en energía mecánica o eléctrica: Experiencia de la India <i>V. G. Bhide</i>	59
Aprovechamiento de la energía solar para la valorización de zonas áridas: Bombas hidráulicas solares <i>Jean Paul Durand, Max G. Clemont, J. Pierre Girardier y Marc Y. Vergnet</i>	67
Condiciones teóricas para el máximo aprovechamiento de la energía solar <i>Kamal-Edin Hassan</i>	71
Colectores solares de placa plana <i>A. A. M. Sayigh</i>	73
Consideraciones sobre las piscinas calentadas con energía solar <i>Gangolf Bräunlich</i>	79
Sistema para la utilización de la energía solar en invernaderos <i>M. Posnansky</i>	82
Estufas solares para el secado de madera: Su utilidad para los países en desarrollo <i>R. A. Plumptre</i>	85
Métodos de refrigeración y enfriamiento por energía solar <i>Erich A. Farber</i>	97
Calefacción y refrigeración de locales y calentadores de agua por energía solar <i>V. G. Bhide</i>	100

Tercera parte (continuación)

	<i>Página</i>
Datos técnicos preliminares para la construcción de una casa solar en Riyadh <i>A. A. M. Sayigh y E. M. A. El-Salam</i>	109
La refrigeración solar en los países en desarrollo <i>A. Eggers-Lura</i>	115
Destilación solar: La evolución de la técnica <i>B. W. Tleimat</i>	121
Técnicas solares de destilación de agua <i>Carlos Mustacchi y Vincenzo Cena</i>	128
Posibilidades de utilización de secadores agrícolas solares en las zonas en desarrollo <i>T. A. Lawand</i>	135
Posibilidades de aprovechamiento de la energía solar para cocinar en las zonas en desarrollo <i>T. A. Lawand</i>	144
Evaluación de modalidades de aprovechamiento de la energía solar desde el punto de vista de la transferencia de tecnología <i>Jyoti K. Parikh</i>	149

Anexos

I. Recomendaciones de la Reunión de expertos sobre la tecnología solar existente y las posibilidades de fabricar equipo solar en los países en desarrollo	161
II. Proyectos de la AIE, en curso, en materia de energía solar	164
III. Sistemas de información sobre energía solar	166
IV. Instituciones que participan en el desarrollo de la energía solar	169

NOTAS EXPLICATIVAS

Salvo indicación en contrario, la palabra "dólares" o el símbolo (\$) se refieren a dólares de los Estados Unidos.

La barra (/) entre cifras que expresen años (por ejemplo, 1970/71) indica un año agrícola, un ejercicio financiero o un año académico.

El guión (-) puesto entre cifras que expresen años (por ejemplo, 1960-1965) indica que se considera el período completo, ambos años inclusive.

Para indicar decimales se emplea la coma (.). Los millares, millones, etc., van separados por espacios, a menos que el símbolo de una unidad monetaria preceda al número.

La palabra "tonelada" se refiere a la tonelada métrica, salvo indicación en contrario.

En los cuadros se han empleado los siguientes signos:

Los puntos (. . .) indican que los datos faltan o no constan por separado.

La raya (-) indica que la cantidad es nula o despreciable.

Un espacio en blanco indica que el concepto de que se trata no es aplicable.

Es posible que los totales no representen una suma exacta, por haberse redondeado las cifras.

Además de las abreviaturas, símbolos y términos comunes y de los aceptados por el Sistema Internacional de Unidades (SI), en el presente informe se han utilizado los siguientes:

Abreviaturas y símbolos técnicos (con sus equivalencias aproximadas)

mil	una milésima de pulgada
pulgada	una pulgada = 2,54 cm.
rpm	revoluciones por minuto
Cv	caballo de vapor (HP) (1 Cv = 746 W)
atm	atmósfera (1 atm = 1,013 barías)
bd ft	board foot (inglés) (1 bd ft = 2,360 cm ³)
gpm	galón (EE.UU.) por minuto (1 gpm = 0,063 l/s)
l/p ²	libras por pulgada cuadrada (1 l/p ² = 0,069 barías)
l/p ² a	libras por pulgada cuadrada (absolutas)
l/p ² e	libras por pulgada cuadrada efectivas o manométricas
gal (EE.UU.)	galón americano (1 gal (EE.UU.) = 3,785 l)
gal (Imp)	galón imperial británico (1 gal (Imp) = 4,546 l)
pie	1 pie = 30,5 cm.
Btu	unidad térmica británica (1 Btu = 1,055 kJ)
cal	caloría (1 cal = 4,186 J)
CPV	cloruro de polivinilo
FPV	fluoruro de polivinilo
PTFE	politetrafluoroetileno
ABE	acrilonitrilo-butadieno-estireno

Organizaciones

Del sistema de las Naciones Unidas

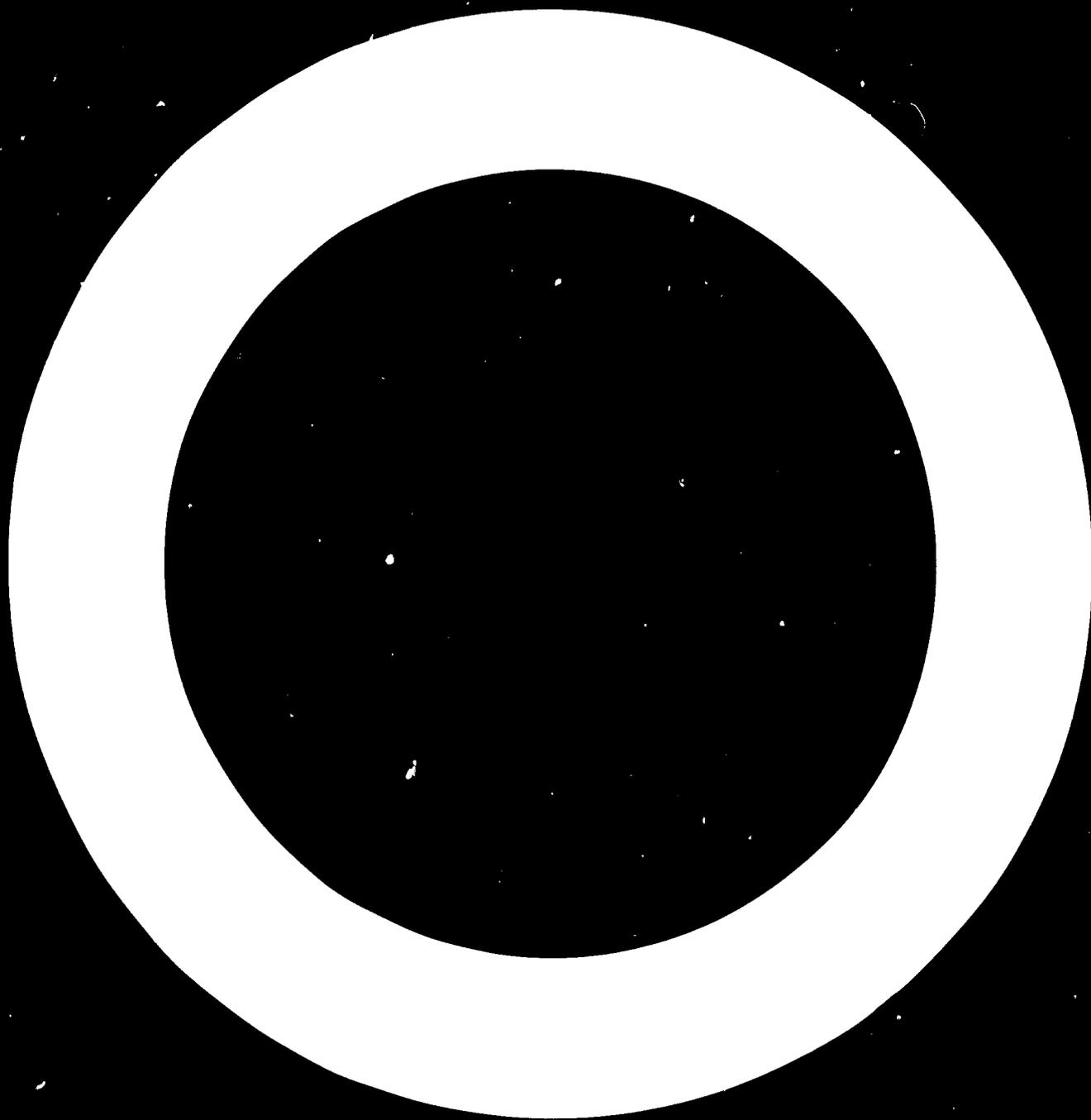
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
UNICEF	Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia

Otras

AIE	Agencia Internacional de la Energía
ERDA	Energy and Research Development Administration (EE.UU.)
IIAAS	Instituto Internacional de Análisis Aplicado de Sistemas

Primera parte

**APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA SOLAR
EN PAISES EN DESARROLLO**



Energía solar: Programa de acción recomendado para los países en desarrollo

Secretaría de la ONUDI

Como se observará en el artículo siguiente del presente volumen, hay posibilidades bien concretas de aplicación de la tecnología solar para la destilación de agua, el calentamiento de agua, el secado, la cocina, la refrigeración y climatización, y la conversión de radiación solar en energía mecánica y eléctrica. Básicamente, lo que se necesita es elaborar un programa de investigación aplicada y desarrollo técnico y, más adelante, de actividades de manufactura en la esfera de la tecnología solar, haciendo hincapié en la transferencia de tecnología desde los países industrializados, la promoción nacional de las capacidades de investigación y desarrollo técnico y la cooperación entre los países en desarrollo en el campo de la tecnología solar. Aunque los conceptos básicos de esta tecnología datan de siglos, sólo recientemente se ha empezado a prestar atención especial en los países industrializados y en los países en desarrollo a su aplicación industrial y comercial.

El análisis económico de la tecnología solar y del equipo pertinente exige un planteamiento y un enfoque diferentes. Dado que la fabricación a escala comercial se encuentra todavía en las etapas iniciales y no está en modo alguno difundida, no es posible determinar el nivel económico óptimo de producción. Es cierto que el costo inicial del equipo solar es superior al de productos tradicionales similares, pero en cambio su costo de funcionamiento es mucho más reducido.

Los principales problemas con que se tropieza en el desarrollo de la tecnología solar y en el diseño y fabricación de los productos pertinentes son:

a) Se trata de una tecnología nueva y no hay conocimientos suficientes respecto de su capacidad y de cómo se puede utilizar;

b) El equipo y los productos solares no son todavía fáciles de obtener comercialmente y en gran escala; y

c) El costo inicial del equipo es alto, debido probablemente a que las técnicas todavía son en su mayoría de carácter experimental y no es posible obtener economías de escala.

Se está fabricando comercialmente un número reducido de productos solares, pero sólo en países industrializados y en unos pocos países en desarrollo. Se necesita más información, una evaluación del rendimiento *in situ* en los países en desarrollo interesados, y, más adelante, actividades de promoción de las inversiones. Además, tanto en países en desarrollo como en países industrializados, hay varias instituciones que se han dedicado a la investigación aplicada, han desarrollado conceptos tecnológicos bien fundados, y los han ensayado y transformado luego en prototipos de fabricación, prestando particular atención a las necesidades de los países en desarrollo. Por consiguiente, es necesario establecer vínculos entre estas instituciones de investigación y desarrollo técnico de determinados países industriales y países en desarrollo en la esfera de la energía solar. En tercer lugar, es necesario elaborar programas integrados de acción en el marco de la cooperación entre países en desarrollo. A este respecto, se deberán escoger determinadas instituciones de países en desarrollo a fin de fortalecerlas y transformarlas en "centros guía" que puedan prestar asistencia a otros países en desarrollo.

En relación con la necesidad de elaborar un programa de difusión y divulgación de información sobre tecnología solar en los países en desarrollo, los gobiernos de estos países podrían tomar las medidas necesarias para iniciar y apoyar un modesto programa de tecnología solar en una institución local, con miras a emprender un programa eficaz de investigación y desarrollo técnico en cooperación con otras instituciones y con los países en desarrollo interesados, así como con órganos de las Naciones Unidas.

Los programas que se establezcan conforme a estas pautas deberán ajustarse a las necesidades de los distintos países en desarrollo y promover la cooperación regional e interregional en la esfera de la tecnología solar. Este criterio se aplica a la recopilación y análisis de información, la difusión de la misma, las investigaciones aplicadas y el desarrollo técnico, la evaluación y la promoción de la manufactura.

Requisitos previos

Aunque en los países en desarrollo se tiene conciencia de la necesidad de aprovechar otras fuentes de energía, al parecer no existen políticas integradas ni programas de trabajo orientados hacia ese fin. En la mayoría de los países en desarrollo, las actividades de investigación y desarrollo técnico en esta esfera se realizan, según parece, conforme a las necesidades que van surgiendo.

En la mayoría de los países en desarrollo los problemas principales con que se tropieza en la utilización de fuentes no tradicionales de energía están comprendidos en tres grupos: el primero es la falta de información sobre el estado actual de la técnica; el segundo se relaciona con la idoneidad de los métodos utilizados para aprovechar esas fuentes de energía en las condiciones imperantes en los países en desarrollo; y el tercero se refiere a la fiabilidad de la tecnología que los países en desarrollo tendrían que importar. Además, la formulación por los países en desarrollo de políticas prácticas integradas con respecto a estas fuentes sustitutivas de energía deberá abarcar el establecimiento de servicios institucionales adecuados de investigación aplicada y desarrollo técnico y la promoción de la manufactura a nivel nacional, concediéndose la debida importancia a los análisis tecnoeconómicos, los ensayos sobre el terreno y los servicios de extensión.

La ONUDI, en consulta con expertos en esta materia, ha identificado los puntos respecto de los que carecen de información adecuada los países en desarrollo, a saber:

- a) Los criterios en que deberá basarse la política pertinente, particularmente en lo que respecta al aprovechamiento de energía en las zonas rurales;
- b) La estructura y el mecanismo gubernamentales adecuados para la planificación del desarrollo en relación con las fuentes no tradicionales de energía;
- c) La tecnología autóctona relativa a la aplicación de fuentes no tradicionales de energía;
- d) Las posibilidades nacionales de desarrollo técnico y manufactura de equipo de producción, así como el análisis de la demanda de productos;
- e) Las instalaciones y servicios institucionales, los programas de trabajo y el personal técnico adecuados con respecto a los puntos c) y d).

Se debe suministrar equipo especial para aprovechar la radiación solar. Como ocurre con otros productos, este equipo se podrá obtener importándolo o fabricándolo en el país. Sin embargo, el aprovechamiento de la energía solar ofrece una oportunidad única de realizar programas de cooperación entre países industrializados y países en desarrollo, así como entre estos últimos.

Por consiguiente, si la posible fabricación nacional de equipo para el aprovechamiento de

energía solar es el objetivo final de los países en desarrollo, las investigaciones aplicadas y el desarrollo técnico son un importante elemento integrante de una futura fabricación nacional, que funciona en dos sentidos, mediante el diseño y desarrollo técnico nacionales y mediante la adaptación de tecnología importada. En ambos casos, la cooperación entre países en desarrollo y la transferencia de tecnología desde los países industrializados hacia los países en desarrollo cumplen una importante función. Además, se necesita asistencia internacional.

La cooperación internacional en materia de investigación y desarrollo técnico de la energía solar implica numerosos requisitos previos. Hay tres de ellos para cuyo cumplimiento se requiere que los gobiernos de los propios países en desarrollo tomen ciertas medidas, y son:

- Elaboración de una política nacional de energía;
- Evaluación de la función que habrán de cumplir las fuentes no tradicionales de energía;
- Análisis realista de la contribución de la energía solar a esa función.

Como paso siguiente, se deberá designar una institución nacional que se encargue de las actividades de investigación aplicada y desarrollo técnico, transferencia de tecnología, extensión y promoción de la fabricación. Este programa deberá consistir no sólo en la evaluación técnica de la tecnología y elementos de equipo importados, sino también en el desarrollo local de tecnología y productos nacionales. Este tipo de actividad integrada se deberá concentrar en la adaptación de productos adecuados, la fabricación de prototipos, ensayos, análisis tecnoeconómicos y, finalmente, la fabricación nacional de esos productos. El programa deberá incluir también el desarrollo de mano de obra técnica, la transferencia de tecnología, y la cooperación entre países en desarrollo; y las instalaciones deberán comprender las destinadas a investigaciones tecnológicas, diseño y desarrollo técnico, laboratorios y ensayos sobre el terreno, fabricación de prototipos, y un programa de extensión relativo a la fabricación.

Programa recomendado

Teniendo en cuenta el estado actual de la técnica a nivel mundial y las capacidades de los países en desarrollo, es necesario que éstos elaboren un programa de tres fases: a corto plazo (1980-1990), a mediano plazo (1990-2000) y a largo plazo (después del año 2000).

Para elaborar este programa, los países en desarrollo necesitan conocer la respuesta a dos preguntas:

¿Cuál es el estado actual de la técnica en el campo de la energía solar en los países

industrializados? ¿Qué resultados cabe esperar y cuándo?

¿Qué tecnologías se podrían aplicar a las necesidades inmediatas de los países en desarrollo y cuáles requieren más tiempo para su realización efectiva, explotación comercial y aprovechamiento?

Sobre la base del análisis de la información disponible, se recomienda que el programa de investigación aplicada y desarrollo técnico y fabricación en los países en desarrollo se estructure de la manera siguiente en las tres fases:

1980-1990. Programas para la explotación comercial inmediata y la fabricación nacional de equipo solar basado en la tecnología bien conocida y aceptada de las temperaturas bajas. Este equipo puede consistir en colectores de placa plana y equipo solar de otro tipo, como calentadores de agua solares, secadores de cereales, radiadores de calefacción, cocinas y alambiques. Estos son los únicos productos cuya fabricación nacional se puede considerar. En este caso, el programa de investigación aplicada y desarrollo técnico implicaría la producción de prototipos de fabricación comercial y la promoción de esta fabricación. La asistencia internacional en materia de investigación aplicada y desarrollo técnico podría consistir en difusión de información, intercambio de prototipos, ayuda a instituciones de investigación aplicada y desarrollo técnico, y promoción de las actividades de fabricación, haciendo hincapié en los aspectos de costos, viabilidad y aceptabilidad.

1991-1999. A fin de estar preparados para la posible explotación comercial de la energía solar en el período 1990-2000, tal vez sea necesario que los países en desarrollo inicien ya programas de investigación aplicada y desarrollo técnico relacionados con la tecnología de las temperaturas medias y altas. Esta actividad se basará principalmente en colectores parabólicos de concentración, con o sin sistema de rastreo. Los productos solares pueden ser enfriadores, refrigeradores, bombas de agua y pequeños generadores de energía eléctrica. Aunque los principios pertinentes son conocidos, los trabajos se encuentran todavía en la etapa experimental y de ensayo de prototipos, incluso en los países industrializados. En el caso de los sistemas de generación de energía y de las bombas solares que han instalado países industrializados en algunos países en desarrollo, se trata todavía de prototipos y está aún por determinar su conveniencia comercial concreta, con especial referencia a las posibilidades de fabricación nacional en países en desarrollo. Por consiguiente, se tendrán que evaluar cuidadosamente los programas de los países en desarrollo en la esfera de la investigación aplicada y el desarrollo técnico. Se los deberá concentrar en el seguimiento de las actividades de investigación y desarrollo técnico que se realicen en países industrializados; la evaluación, adaptación y

absorción de tecnología importada; y la cooperación regional entre países en desarrollo. A este respecto, se deberán realizar esfuerzos para impedir la duplicación de trabajos y se tendrá que establecer un mecanismo para fomentar el intercambio de información sobre investigación y desarrollo técnico entre países en desarrollo. Como las investigaciones y el desarrollo técnico son actividades costosas, los países en desarrollo deben aplicar un criterio selectivo, dentro del marco de las necesidades y prioridades nacionales. Tal vez valga la pena examinar los programas cooperativos de investigación y desarrollo técnico poniendo énfasis en la fabricación de prototipos eficaces en centros regionales escogidos de determinados países en desarrollo. Además, los resultados que se obtengan pueden ponerse gratuitamente a disposición de otros países en desarrollo mediante un sistema o red de intercambio. Esto podría dar por resultado la evaluación nacional del rendimiento del producto y posiblemente la promoción de la fabricación comercial.

Del año 2000 en adelante. A fin de estar preparados para aprovechar eficazmente las oportunidades comerciales que puedan surgir en la "era solar", a partir del año 2000, los países en desarrollo deben elaborar en estas fechas un atinado programa de investigación y desarrollo técnico. Sin embargo, debe quedar entendido que son los países industrializados los que se ocupan de desarrollar la compleja tecnología de las altas temperaturas. Los productos que a la larga se hayan de fabricar se relacionarán con la tecnología de transmisión óptica, las torres de energía solar y la compleja tecnología de las células solares, los semiconductores, la conversión fotovoltaica y la ciencia de los materiales. Estas actividades de investigación y desarrollo técnico son costosas. Los propios países industrializados ignoran las respuestas, aunque se conoce la orientación general. Por lo tanto, la función de los países en desarrollo es compleja. Sin embargo, en esta esfera hay grandes posibilidades de cooperación internacional, especialmente entre países industrializados y países en desarrollo. Es necesario compartir esfuerzos y resultados; se deberán establecer vinculaciones entre los institutos de investigación y desarrollo técnico de los países industrializados y de los países en desarrollo respecto de programas concretos de investigación aplicada. Los requisitos previos de un programa de este tipo en los países en desarrollo son:

a) Identificación de instituciones locales que tengan capacidad potencial para emprender este programa cooperativo de investigación y desarrollo técnico con arreglo a un plan de vinculación de instituciones. Es posible que haya que fortalecer las instituciones existentes y capacitar personal;

b) Intercambio de información, puesta en marcha de un programa de becas y organización de seminarios y programas de capacitación.

Acción integrada en el sistema de las Naciones Unidas

Teniendo en cuenta el programa de tres fases descrito anteriormente, el punto más importante para la iniciación de programas de investigación aplicada y desarrollo técnico es la determinación de objetivos realistas basados en el estado actual y en la probable evolución futura de la técnica. Es necesario aplicar un criterio selectivo en los programas de investigación aplicada y desarrollo técnico. A la larga, el objetivo es promover la fabricación nacional, pero esto exige diversos requisitos previos; la cooperación internacional en esta esfera se relacionará con el fortalecimiento de las instituciones existentes, la promoción de la transferencia de tecnología, la capacitación y la promoción de la cooperación entre países en desarrollo.

En principio, en el programa integrado de acción dentro del sistema de las Naciones Unidas se inscriben las dos esferas siguientes:

a) Evaluación de la tecnología existente en la esfera de la energía solar a fin de definir la tecnología apropiada para los países en desarrollo;

b) Elaboración de un programa de asistencia técnica encaminado a desarrollar el aprovechamiento de la energía solar, intensificar las investigaciones y el desarrollo técnico, iniciar la fabricación de equipo y fortalecer la transferencia de tecnología entre países en desarrollo.

El programa requerirá lo siguiente:

Identificación de instituciones de países en desarrollo y de países desarrollados;

Programas prácticos de investigación y desarrollo técnico;

Elaboración de prototipos, especificaciones y normas;

Promoción de la fabricación;

Transferencia de tecnología de los países desarrollados a los países en desarrollo;

Cooperación entre países en desarrollo.

Actividades de la ONUDI en la esfera de las fuentes no tradicionales de energía

El programa de la ONUDI en materia de fuentes no tradicionales de energía se desarrolla actualmente en las esferas de la energía solar, la energía eólica,

pirólisis y energía de la biomasa, y puede incluir más adelante los aspectos de microenergía hidroeléctrica, energía geotérmica y fotosíntesis. En la prestación de asistencia a los países en desarrollo se hace hincapié en la adaptación y difusión de tecnología importada, la promoción de las investigaciones aplicadas y el desarrollo técnico, y la difusión de tecnología nacional con particular referencia a la promoción de la futura fabricación nacional de equipo junto con el desarrollo de la infraestructura necesaria. A este respecto, se atribuye considerable importancia a la promoción de la cooperación entre países en desarrollo.

A principios de 1977, la ONUDI organizó, en colaboración con el Organismo Austriaco para la Energía Solar y el Espacio Ultraterrestre, una Reunión de Expertos sobre la tecnología solar existente y las posibilidades de fabricar equipo solar en los países en desarrollo (véase el prefacio y el anexo I). Las conclusiones y recomendaciones de este grupo de expertos se pueden considerar como la base del programa de acción y de las actividades de asistencia técnica de la ONUDI en la esfera de la tecnología solar.

Posible asistencia de la ONUDI a los países en desarrollo

La ONUDI, a solicitud de los gobiernos de los países en desarrollo, está dispuesta a ayudarlos en la promoción, desarrollo y aprovechamiento de la energía solar de acuerdo con las pautas arriba recomendadas. Los componentes de la asistencia técnica de la ONUDI pueden ser servicios de expertos, equipo o becas para proyectos concretos aprobados. De ordinario, estos componentes se financian mediante fondos asignados por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) de acuerdo con la cifra indicativa de planificación (CIP) correspondiente a cada país en desarrollo para un ciclo determinado de programación (el próximo ciclo corresponde al período 1978-1982). Por consiguiente, se recomienda que los gobiernos de los países en desarrollo concedan prioridad a los proyectos de asistencia técnica a financiar con fondos PNUD-CIP en la esfera de la energía solar. La ONUDI dispone además de un pequeño volumen de fondos para la prestación de asistencia directa.

Fomento del aprovechamiento de la energía solar en países en desarrollo

Assad Takla

Afamia Consulting Engineers, Abu Dhabi (Emiratos Arabes Unidos)

Introducción

La historia enseña que hace ya mucho tiempo que se viene aprovechando la energía solar, pero hasta el siglo pasado no apareció equipo de la envergadura de las calderas con espejos, máquinas de vapor, máquinas de aire caliente y cocinas. El intenso desarrollo de máquinas térmicas y eléctricas y la gran baratura de la energía, especialmente de la obtenida de fuentes importadas del tercer mundo, disuadió en cierta medida de realizar investigaciones en la esfera de la energía solar. En estos momentos en que el costo de la energía está alcanzando un nivel normal y cada vez es menos frecuente descubrir nuevos recursos petroleros, los países industrializados están poniendo en marcha intensos programas de investigación en el campo de la energía solar. Por ejemplo, la Energy and Research Development Administration (ERDA) de los Estados Unidos de América tuvo un presupuesto de 115 millones de dólares para el ejercicio económico de 1976. En el anexo II se describen los proyectos que realiza en esta esfera la Agencia Internacional de la Energía (AIE), cuyos Estados miembros son, sin excepción, países industrializados.

Algunos métodos de aprovechamiento de la energía solar han llegado a una fase de desarrollo en la que pueden competir en el terreno económico con métodos de aprovechamiento de fuentes tradicionales de energía. Como los países en desarrollo suelen encontrarse en regiones soleadas, son los primeros interesados en desarrollar técnicas de aprovechamiento de la energía solar, que es gratuita, inagotable, omnipresente (no plantea problemas de transporte ni distribución) y no contamina el medio ambiente. Se la puede convertir en energía mecánica, eléctrica o química para utilizarla en diversas esferas, como la producción de electricidad, la desalación de agua, el riego, la cocina, la conservación de alimentos por refrigeración, el secado de productos de la pesca, de frutas y verduras, y la calefacción y climatización de locales.

El presente estudio tiene por objeto exponer cómo ha evolucionado la investigación en el terreno

de la energía solar y el aprovechamiento de ésta desde el punto de vista tecnoeconómico. Se propone principalmente poner de relieve los principales asuntos relacionados con el aprovechamiento de la energía solar en países en desarrollo, y se espera que pueda servir de primera orientación a los técnicos, economistas y formuladores de políticas de esos países.

En la esfera de la energía solar se ha registrado una proliferación de empresas comerciales. Desgraciadamente, algunas de ellas han fijado precios sumamente altos a la transferencia de tecnología solar de dudoso valor. Por lo tanto, la mayor parte de los países en desarrollo necesitan una herramienta que pueda ayudarles a mejorar su posición al negociar la transferencia de tecnología solar con fines de investigación y desarrollo (I y D). El presente trabajo es el primer intento de proporcionar semejante herramienta. Si se desean más detalles sobre algún aspecto del estudio, deben consultarse referencias más especializadas. Se incluye una bibliografía anotada de fuentes importantes de información. También se deben consultar el anexo III, en el que se describen sistemas de información, y el IV, que contiene una lista de instituciones que se ocupan de la energía solar.

En el presente trabajo se ha centrado la atención en las perspectivas a corto y mediano plazo, ya que los datos disponibles no son suficientes para basar en ellos proyecciones válidas a largo plazo. No obstante, dados los cambios que experimenta la tecnología a un ritmo acelerado, también se estima que deben repetirse los estudios de esta naturaleza con carácter periódico y que la esfera específica del aprovechamiento de la energía solar en países en desarrollo también debe examinarse periódicamente en reuniones de expertos.

Este trabajo no es un manual ni un estudio extenso y detallado de todos los aspectos relacionados con el aprovechamiento de la energía solar. Sus capítulos no están equilibrados; en general, se ha concedido más importancia a aquellos campos que todavía no se han popularizado.

En el capítulo I se describen las aplicaciones generales de la tecnología existente y se incluye información obtenida por el autor en sus visitas a centros de investigación y desarrollo y en reuniones internacionales. En el segundo capítulo se hacen ciertas comparaciones tecnoeconómicas de orden general a fin de indicar qué equipo solar puede utilizarse de manera económica a corto y mediano plazo en países en desarrollo. Se introducen ecuaciones generales a fines de comparación y se discute un ejemplo de su utilización.

El autor ha visitado algunos centros importantes de investigación de energía solar y eólica en países desarrollados (Alemania, República Federal de, Canadá, Estados Unidos de América, Francia, Países Bajos) y países en desarrollo (Grecia, India, México, Trinidad y Tabago). Algunas de las conclusiones y evaluaciones basadas en estas visitas constituyen el capítulo III. En él se discuten problemas y posibles soluciones, así como la tendencia general de la cooperación entre países en desarrollo y desarrollados y entre los propios países en desarrollo.

Con la excepción de la labor original y de las evaluaciones personales, el autor no pretende atribuirse crédito alguno por la información incluida en el presente estudio. Dicha información se basa en publicaciones técnicas y folletos disponibles o en declaraciones de fabricantes y en contactos directos y conversaciones en instituciones especializadas.

1. DESARROLLO Y ESTADO ACTUAL DE LA TECNICA

Conversión de energía solar en energía mecánica

Consideraciones generales

Con la expresión "máquina solar" se designa una máquina que funciona mediante la energía solar. El ciclo termodinámico de semejante máquina puede ser el siguiente: la radiación solar calienta un fluido motor en fase líquida y produce vapor. Este se expande en una máquina alternativa o giratoria, realizando un trabajo. De la máquina pasa a un intercambiador de calor en el que se condensa. El líquido condensado se vuelve a inyectar mediante una bomba (que generalmente es accionada por la propia máquina solar) a otro intercambiador de calor en el cual se evapora, cerrándose el ciclo.

El rendimiento de la máquina depende ante todo de su Carnot:

$$\eta_c = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

siendo T_1 la temperatura termodinámica del foco caliente (el intercambiador de calor evaporador del

ejemplo anterior) y T_2 la temperatura termodinámica del foco frío (el intercambiador de calor de condensación).

De la ecuación precedente parece deducirse que, en teoría, se debe utilizar la temperatura más alta posible para el foco caliente y la más baja posible para el frío. Sin embargo, en la práctica, T_1 depende del funcionamiento de los colectores solares y de la presión que puedan soportar los materiales con que se haya construido la máquina; por ejemplo, la presión del Freón 22 ya es de 20 barías a 50°C solamente. Y, por otra parte, T_2 no puede ser inferior a la temperatura del fluido utilizado para la refrigeración (agua o aire que circulen por convección natural o forzada).

No hay criterios estándar para definir los intervalos de temperaturas bajas, intermedias y elevadas. Sin embargo, en el presente estudio, por "baja temperatura" se entiende la que no llega a los 100°C. Los colectores solares de placas planas que capturan la radiación solar directa y difusa funcionan dentro de este intervalo. En consecuencia, se entenderá por temperaturas "intermedias" y "elevadas" las superiores a los 100°C; en este caso se emplean colectores solares concentradores que siguen la trayectoria del sol y solamente capturan la radiación solar directa.

Mediante energía solar se puede calentar el aire a una temperatura relativamente elevada y utilizarlo como fluido motor en una máquina solar. Puede recurrirse a dos ciclos:

a) *Cerrado (Stirling)*. Se comprime el aire en una cámara fría. Después se lo pone en contacto con un foco caliente, aumentando su presión y expandiéndose en un cilindro motor. De allí fluye a la cámara fría cerrándose así el ciclo;

b) *Abierto (Ericson)*. Se introduce aire comprimido en una cámara caliente. Allí se expande y es descargado a la atmósfera.

Máquinas solares de baja temperatura

En la práctica, la máquina solar de baja temperatura está limitada a temperaturas inferiores a 80°C. Se evapora directamente un fluido motor (Freón 22, Freón 12, Freón 11, Freón 114 o butano) en colectores solares de placa plana, o mediante agua caliente obtenida en colectores solares que circula por un intercambiador de calor (evaporador), (véase la figura 1). En su fase gaseosa, el fluido motor pasa a una máquina alternativa o giratoria en la que se expande. De ésta pasa a un condensador refrigerado por aire o por agua desde el cual, ya en fase líquida, es inyectado de nuevo en el evaporador mediante una bomba accionada por la propia máquina solar. En algunas aplicaciones, cuando se utiliza agua caliente para evaporar el fluido motor, se recurre a una bomba, también accionada por la

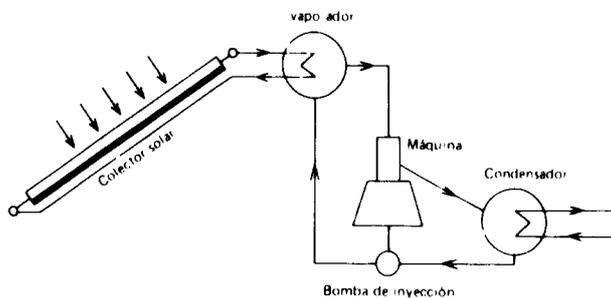


Figura 1. Máquina solar de baja temperatura en la que el fluido motor se evapora en un evaporador calentado con agua caliente procedente del colector solar

máquina solar, para acelerar la circulación del agua caliente y mejorar la transmisión de calor en el evaporador. En este caso es preciso poner en marcha el ciclo a mano.

La evaporación directa del fluido motor en los colectores solares puede resultar económica en instalaciones pequeñas, pero sería muy difícil aplicar este método en colectores solares grandes debido a las dificultades que plantea el mantenimiento de una circulación ininterrumpida de dicho fluido en instalaciones grandes.

Máquina SOFRETES

La Société française d'études thermiques et d'énergie solaire (SOFRETES) ya ha instalado, o está instalando, unas 50 bombas solares, la mayor parte de las cuales tiene una capacidad nominal de 1 kW.

Sin embargo, la tecnología no está totalmente a punto. SOFRETES ha ensayado el butano y muchos tipos de Freón, especialmente el Freón 11 y 12, y al parecer ahora se está pasando al Freón 114. Ha cambiado su tecnología en lo tocante a los intercambiadores de calor. Al principio se utilizaban evaporadores y condensadores de haces de tubos, después condensadores de tubos coaxiales, y ahora se utilizan intercambiadores de calor de placas, parecidos a los que se emplean en la industria alimentaria.

En una de las instalaciones de bombas solares de 1 kW que utilizan butano como fluido motor y colectores solares de placa plana de 60 m², la temperatura del agua a la salida de dichos colectores es de unos 70°C. La temperatura a la salida del evaporador y a la entrada de la máquina alternativa solar es de unos 67°C, y la temperatura de salida de la máquina es de unos 50°C. La temperatura de condensación en el condensador, refrigerado por el agua bombeada, es de unos 30°C. Con un buen régimen de radiación solar, semejante máquina podría funcionar unas seis horas al día sin almacenamiento de la energía solar, pero no funcionaría a plena potencia todo ese tiempo. En otra instalación de bombas solares de 1 kW, la temperatura de entrada a

la máquina es de 55°C, la de salida de la máquina, de 40°C y la de salida del condensador, de 30°C.

En colaboración con el Gobierno de México, SOFRETES ha instalado una planta de energía solar de 25 kW en San Luis de la Paz. El generador eléctrico es accionado por una turbina de 7.200 rpm impulsada por el Freón 11 evaporado a una presión aproximada de 3 barías. La temperatura de entrada del fluido motor es de 57°C y la de salida, de 30°C. El Freón 11 se evapora en un evaporador de aluminio con una superficie de intercambio de calor de unos 350 m² y una tasa de intercambio de 1.740 MJ/h, entrando el agua a 62°C y saliendo a 58°C.

El evaporador se alimenta con agua caliente procedente de colectores solares con una superficie neta efectiva de 1.200 m². El gas se condensa en un condensador de acero inoxidable que intercambia 1.590 MJ/h con una superficie de intercambio de unos 100 m². El Freón condensado se vuelve a inyectar en el evaporador mediante una bomba de reinyección de 3 kW accionada por energía eléctrica procedente del generador eléctrico.

La instalación lleva cerca de un año en funcionamiento y no plantea problemas tecnológicos de importancia, pero el sistema de control es muy avanzado y complejo.

Máquina solar de vapor V-2

Erich A. Farber, del Laboratorio de Energía Solar y Conversión de Energía de la Universidad de Florida (Estados Unidos de América) ha puesto a punto la máquina de vapor solar V-2, en la que se evapora directamente Freón en los colectores solares. Consiste en dos cilindros en ángulo recto, cada uno de los cuales tiene un diámetro interno de 51 mm y una carrera de pistón de 39 mm. La entrada y salida del vapor están reguladas por válvulas de corredera, que lo admiten durante 90° de la rotación del volante y lo dejan escapar durante 140°. La máquina, cuyas dimensiones son 25 cm de altura por 35 cm de anchura y 23 cm de profundidad, está montada en una caja o envoltura de 40 cm de diámetro y 25 cm de profundidad. El desplazamiento total de la máquina es 305 cm³ por revolución.

El vapor se introduce en la máquina a través de la envoltura y, una vez que ha realizado trabajo, sale de la máquina a la envoltura que la rodea. Por lo tanto, la posibilidad de que haya fugas no plantea ningún problema grave, puesto que todo el vapor, el de salida y el de las fugas, queda dentro de la envoltura. Desde ésta, el vapor pasa al condensador.

La velocidad de la máquina está controlada por un regulador centrífugo del volante, que ajusta la entrada de vapor en la misma.

El condensador refrigerado por agua que se utiliza con esta máquina es un cilindro de 76 cm de

diámetro y 61 cm de longitud que contiene 7 serpentines de tubo de 3,5 cm, lo cual da una longitud total de 13,5 m. En este tubo se condensa el vapor.

En la figura 2 se dan las condiciones de funcionamiento y el diagrama ideal de temperatura-entropía ($T-S$). La trayectoria 1-2 representa la expansión del vapor a través de la máquina, que convierte parte de la energía térmica en trabajo mecánico; la trayectoria 2-3, los cambios de estado que se producen en el fluido cuando pasa por el condensador; la trayectoria 3-4, la acción de la bomba que eleva la presión hasta el valor imperante en los generadores solares de vapor; y la trayectoria 4-1, los cambios que se producen en el evaporador, completándose así el ciclo. En la figura 3 se presenta el mismo ciclo, con Freón 11 como fluido motor, en el diagrama presión-entalpía ($p-H$). Se seleccionaron condiciones moderadas de funcionamiento que se pueden alcanzar sin dificultad mediante tales sistemas. El vapor, a 72°C , se produce en los colectores solares de placa plana; el líquido del condensador tiene una temperatura de 28°C . Las presiones correspondientes a esas temperaturas son moderadas y no requieren diseño especial.

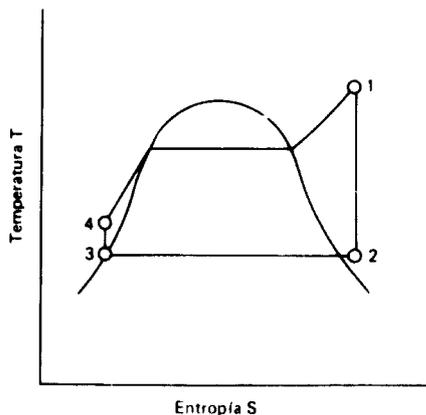


Figura 2. Diagrama ideal de temperatura-entropía en la máquina solar de vapor V-2

Los cambios de estado del aire dentro de los cilindros de la máquina, a un lado del pistón, se indican en el diagrama idealizado presión-volumen ($p-V$) de la figura 4. (En realidad, los ángulos son redondeados.)

En la figura 5 se muestra el funcionamiento real de la máquina con presiones de alimentación que se mantienen constantes a 2,39; 2,74; 3,08 y 3,45 barías, cuyos valores corresponden a temperaturas de 51° , 56° , 60° y 65°C , respectivamente, en caso del Freón 11. Las curvas son representativas del funcionamiento de la máquina. La velocidad máxima se alcanza en vacío, y a medida que aumenta la carga, disminuye la velocidad. Si se representa gráficamente la potencia efectiva en función de la velocidad de rotación, cada curva exhibe un máximo.

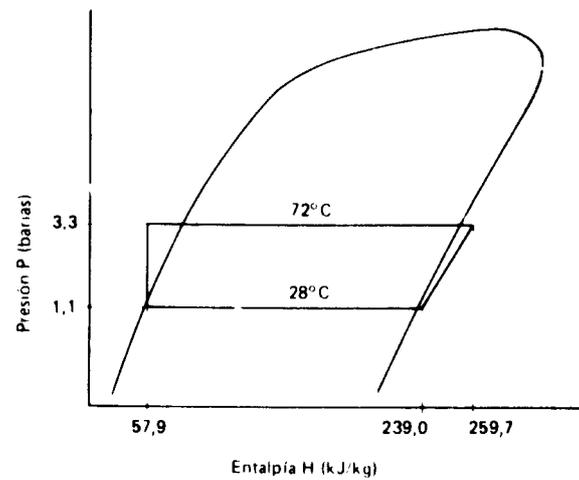


Figura 3. Diagrama presión-entalpía de la máquina solar de vapor V-2 que utiliza Freón 11 como fluido motor (no está representado a escala)

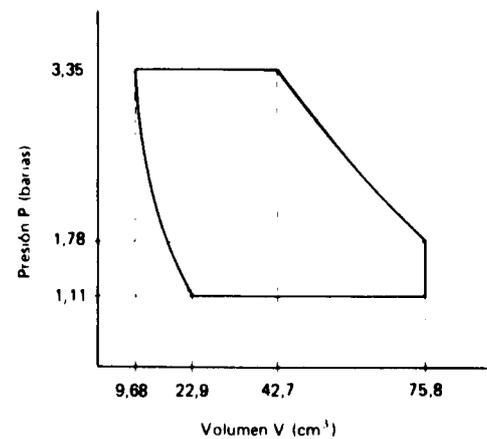


Figura 4. Diagrama presión-volumen del aire dentro de los cilindros de la máquina solar de vapor V-2

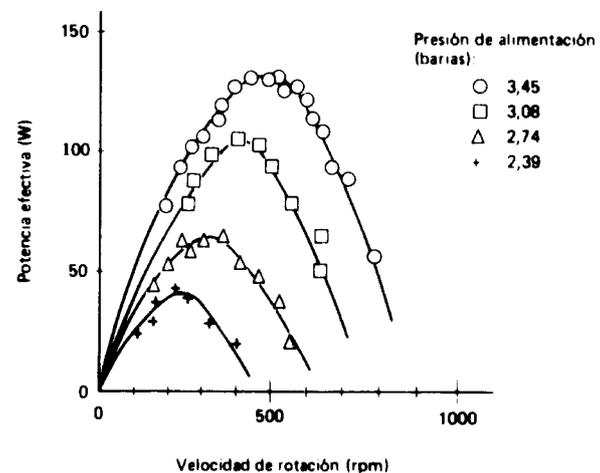


Figura 5. Curvas de potencia en función de la velocidad en la máquina solar de vapor V-2

Pueden obtenerse temperaturas y presiones superiores a las indicadas, pero sólo durante un período muy breve del día.

La disposición compacta de dos cilindros en V permite que esta máquina se ponga en marcha sola, lo cual es una clara ventaja cuando hay nubosidad intermitente.

Máquina de Sun Power Systems

Sun Power Systems ha puesto a punto una máquina giratoria concebida principalmente para utilizar la energía de desecho industrial. No obstante, el fluido motor, que es el Freón, se puede evaporar mediante agua caliente obtenida en colectores solares de placa plana. La máquina funciona a base del ciclo de Rankine. En Albuquerque, Nuevo México, (Estados Unidos), un equipo de consultores que trabajaba para el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) ensayó una planta generadora de 10 kW de potencia antes de que se transfirieran sus servicios a un proyecto ejecutado por el PNUMA en Sri Lanka. En la actualidad esta planta funciona a plena potencia, penetrando en el evaporador de Freón, 12 m³ de agua por hora, a 90°C. Se supone que, con una superficie efectiva neta de 276 m², los colectores solares aportarán la energía necesaria para calentar el agua. En esta planta se utilizan dos intercambiadores de calor ordinarios fabricados por una empresa de refrigeración y climatización: uno de ellos, con una superficie de intercambio de calor de 23 m², hace de evaporador y el otro, con una superficie de intercambio de valor de 35,2 m², hace de condensador. La máquina funciona a 1.800 rpm y pesa unos 80 kg. Acciona un generador eléctrico de 60 Hz. El conjunto de máquina, intercambiadores de calor, bomba de reinyección y generador eléctrico tiene dimensiones muy reducidas.

La potencia de 10 kW se obtiene con una diferencia de 55°C entre las temperaturas de evaporación y de condensación, pero en la práctica no puede alcanzarse tal diferencia con colectores solares de placa plana; sólo cabe esperar una diferencia de unos 40°C con los colectores habituales de este tipo, a la cual corresponde una potencia máxima de unos 7 kW. Lo mismo que en las máquinas SOFRETES, la lubricación tiene lugar por obra de un lubricante disuelto en el Freón. La superficie real del evaporador parece ser insuficiente, sobre todo cuando la temperatura del agua caliente que penetra en el evaporador es de unos 70°C. Según el fabricante, se ha ensayado durante 10⁴ h uno de sus prototipos pequeños sin problemas de importancia. Pero el ensayo se realizó cerca de la fábrica y no sobre el terreno.

Máquina Gironnet-ENSAM

La Ecole nationale supérieure des arts et métiers (ENSAM) ha puesto a punto un prototipo de

máquina alternativa de baja velocidad que produce menos de 1 kW, y actualmente está negociando con una empresa industrial la manufactura de un prototipo de 2 kW. El único problema técnico que todavía no se ha resuelto es el de la lubricación. Podría utilizarse el mismo sistema que en la máquina de SOFRETES o en la de Sun Power Systems, pero se está tratando de poner a punto un sistema de lubricación en seco que se considera mejor.

El costo de construcción de los prototipos de 2 kW se estima en 4.000 dólares, no incluyendo esta cifra los colectores solares, cuya superficie necesaria se estima en 50-60 m² con un régimen de radiación solar favorable.

El primer prototipo se está ensayando con aire comprimido, ensayo que no permitirá hacer una evaluación válida. Sin embargo, el diseño de la máquina es sencillo y su costo previsto es relativamente bajo.

Máquina Messerschmidt-Bölkow-Blohm (MBB)

La empresa Messerschmidt-Bölkow-Blohm GmbH, de Ottobrunn (República Federal de Alemania), está trabajando en una planta solar de energía eléctrica de 10 kW (véase la figura 6). Esta planta será una estación independiente que suministrará energía eléctrica a comunidades rurales alejadas de la red de distribución. Además de la potencia eléctrica de punta requerida, de 10 kW, se proyecta una reserva de energía para funcionamiento nocturno que está especificado en 12 kWh a razón de 1 kW. Este requisito implica un sistema óptimo de almacenamiento de energía. Como colectores solares se emplearán los de placa plana que MBB viene utilizando durante unos dos años en sus trabajos preliminares sobre calefacción solar de locales. Para conseguir la potencia máxima deseada se precisa una superficie total de colectores de unos 700 m². MBB confía en que podrá reducir la superficie neta efectiva de los colectores solares a unos 350 m². Sin embargo, la especificación final de la superficie necesaria depende íntimamente de las condiciones climáticas y de las exigencias del consumidor en el lugar en que se instale la planta, y se la debe armonizar con la capacidad de almacenamiento necesaria durante el ciclo de funcionamiento de 24 horas, tomando en consideración el comportamiento de todos los componentes de la planta en condiciones de carga parcial. Se utilizará un motor de tornillo desarrollado por la compañía Linde, en el que se emplea R114 como fluido motor, a causa del elevado rendimiento que se le supone en régimen de carga parcial. Entre otras ventajas figuran el bajo peso específico (relación peso a potencia), el pequeño volumen y la falta de válvulas.

El colector de placa plana MBB es un colector de dos vidrios de diseño modular. Las dimensiones exteriores de la superficie de absorción de cada módulo son 60 x 180 cm \approx 1 m². El absorbente es de

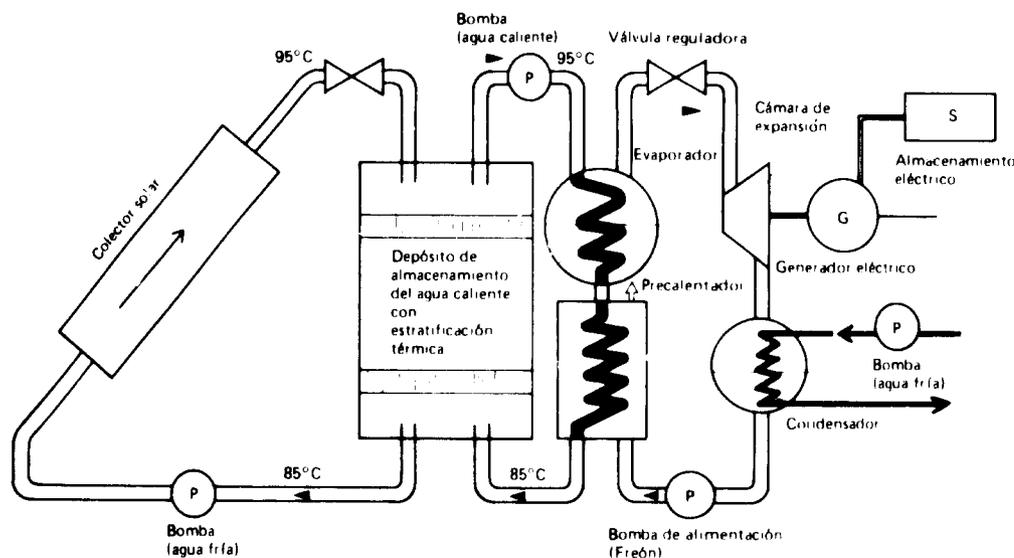


Figura 6. Diagrama esquemático de la planta solar de energía eléctrica de MBB

aluminio chapado por laminación y está protegido contra la corrosión por un agente inhibidor de la misma. La capa absorbente exterior es una pintura térmica con un elevado factor de absorción (0,96). (La pintura se puso a punto con miras a aplicaciones espaciales.) El aislamiento térmico posterior consiste en una cubierta de espuma de poliuretano protegida. El agua caliente podría alcanzar temperaturas hasta de 95°C.

MBB ha montado ya un prototipo, que se ha ensayado varias veces durante períodos breves con agua caliente procedente de una caldera eléctrica. Actualmente se está considerando la posibilidad de introducir algunas modificaciones. La máquina propiamente dicha es muy compacta y se utiliza en la climatización de trenes. (Se la ha modificado para utilizarla en esta planta.) Sería muy difícil alcanzar la temperatura de evaporación del R114 con colectores solares tradicionales de placa plana. Habría que recurrir a tecnología muy avanzada, incluso al uso de superficies selectivas en los colectores, y aún está por demostrar que sea posible fabricar esos colectores fácilmente a un costo razonable. No obstante, MBB mantiene un criterio amplio respecto de todo cambio posible en cuanto a las temperaturas a utilizar o a las modificaciones a introducir en el diseño de la planta.

Máquinas de elevada temperatura

El problema principal de la máquina solar de elevada temperatura consiste en obtener vapor, de agua o de otro fluido. El rendimiento de Carnot η_C es relativamente alto, pero se deben tener presentes otros rendimientos. Por ejemplo, en el caso del heliostato, el rendimiento global es

$$\eta = \eta_C \eta_d \eta_r \eta_s \eta_a \eta_l \eta_h \eta_t \eta_m$$

teniendo los rendimientos individuales distintos

de η_C , que depende de T_1 y T_2 (véase lo dicho anteriormente), los siguientes valores típicos:

η_d factor de radiación solar difusa-directa	0,80
η_r reflectividad del espejo	0,80
η_s factor salida del sol-puesta del sol	0,70
η_a absorción focal y pérdidas geométricas	0,70
η_l pérdidas de calor	0,70
η_h factor de nubosidad intermitente	0,80
η_t factor de espaciación del heliostato	0,6
η_m relación de rendimiento mecánico	0,5-0,8

De esta cifra se deduce que el rendimiento global no puede ser superior al 5% u 8% del rendimiento de Carnot. Por ejemplo, si la temperatura del vapor es 200°C ($T_1 = 473$ K) y la de condensación es 30°C ($T_2 = 303$ K) el rendimiento de Carnot es de un 36% aproximadamente y el rendimiento global del sistema es de 1,9% a 3,0%. Con un régimen favorable de radiación solar, se necesitarán unos 40 m² de heliostato para obtener una potencia media de 1 kW durante el día. Algunas empresas tratan de obtener un área por unidad de potencia de 10 a 15 m²/kW, pero generalmente esto se refiere a la potencia máxima y no a la media. (La potencia máxima es la producida por la máquina en momentos de radiación solar máxima.)

Son muchas las instituciones que se ocupan de plantas térmicas de gran envergadura. Por ejemplo, el Centre national de la recherche scientifique (CNRS) está trabajando, en colaboración con Electricité de France, en una central de elevada temperatura, de 10 MW de potencia, en la que la presión podría llegar a las 80 barías. A principios de 1977 debía haber comenzado a funcionar en Odeillo una caldera de 100 kW que estaban poniendo a punto conjuntamente CNRS, Babcock-Wilcox, Heurtey, St. Gobain y Renault (SERI) utilizando heliostatos.

Entre las empresas que ya han construido prototipos de máquinas de vapor pequeñas figura la Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg AG (MAN) de la República Federal de Alemania, la cual, en colaboración con la Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt, de Stuttgart, está construyendo una planta consistente en 12 filas de colectores que siguen al sol, con 6 colectores de artesa parabólicos (cuyo factor de concentración es 30) en cada fila. Cada colector tiene 2.5 metros de longitud y una apertura de 1 m². Los colectores están dispuestos sobre una plataforma con un ángulo de inclinación correspondiente a la latitud. La superficie total efectiva de espejo del prototipo es de unos 180 m², la temperatura de funcionamiento es 200°C y la producción media diaria de energía térmica asciende a unos 700 kWh (funcionando de las 7 a las 17 horas). Con un motor de vapor y un generador eléctrico (10 kW de potencia máxima), la producción de energía eléctrica es de unos 70 kWh/d (rendimiento global, 6% aproximadamente). El agua condensada tiene una temperatura de 95°C y se proyecta utilizarla para abastecimiento de agua caliente, calefacción de locales o climatización. Con miras a aumentar la producción de electricidad al tiempo que se disminuye la superficie efectiva de los colectores, se contempla el funcionamiento a temperaturas más elevadas. En el cuadro 1 se indican las especificaciones planeadas para las distintas etapas de desarrollo de la planta.

CUADRO 1. ESPECIFICACIONES DE LA PLANTA SOLAR MAN EN DIVERSAS ETAPAS DE DESARROLLO

Especificación	Prototipo	Tipo	Tipo
		perfeccionado	optimizado de serie
Área efectiva (m ²)	180	130	100
Temperatura de funcionamiento (°C)	200	250	300
Capacidad térmica (kWh/d)	700	480	390
Capacidad eléctrica (kWh/d)	70	69	68
Rendimientos (%)			
Colector	58	54	59
Ciclo	20	24	28
Motor/generador	50	60	63
Global	6	8	10

Según el diseño, esa planta podría ampliarse en construcción modular a tamaños mayores con capacidades eléctricas de hasta varios centenares de kilovatios.

MAN también está poniendo a punto un motor de tornillo y se proyecta que esta unidad funcione con vapor sobrecalentado de Freón 114.

Se ha tomado la siguiente cita de un informe de MAN.

“Las posibilidades de éxito que ofrecen las máquinas solares de baja temperatura son muy escasas. Contrariamente a lo que ocurre con los

colectores de concentración, los tradicionales de placa plana aprovechan sólo una parte de la radiación difusa. Sin embargo, esta parte es, por término medio, inferior al 10% en las regiones consideradas, por lo cual desempeña un papel muy secundario. Los colectores de placa plana tienen el inconveniente decisivo de que el rendimiento disminuye rápidamente al aumentar la temperatura del colector. Además, con colectores de inclinación fija la insolación es menor por la mañana y por la tarde. Por lo tanto, el valor del rendimiento disminuye todavía más. Otro inconveniente adicional es que debe emplearse un fluido motor de bajo punto de ebullición como el Freón, lo cual requiere intercambiadores de calor caros.

“El rendimiento térmico aumenta con la temperatura del colector. Sin embargo, sólo pueden conseguirse rendimientos suficientemente altos si se emplean envolturas reflectoras de la radiación infrarroja (que son caras) o se aplican revestimientos selectivos (en los que se observa degradación).

“Los colectores concentradores consisten, por ejemplo, en artesas parabólicas o en lentes de Fresnel que concentran la radiación solar directa en una tubería con absorbente montada en la línea de foco. Estos colectores tienen rendimientos muy elevados —del 50% aproximadamente— incluso con factores de concentración bajos de 20 a 30.

“Los colectores concentradores deben seguir al sol. Por lo tanto, el elevado rendimiento permanece casi constante por la mañana y por la tarde. Otra ventaja adicional decisiva —contrariamente a lo que ocurre con los colectores de placa plana— es que pueden utilizarse las máquinas de vapor disponibles tradicionales en razón de que las temperaturas de funcionamiento son más elevadas.”

La máquina de vapor utilizada en la planta MAN es de tipo tradicional como las que se fabricaban en los años 60. Su capacidad generadora es mayor que la correspondiente al conjunto de colectores solares.

Se supone que podría descomponerse el costo (1976) de la planta por unidad de energía eléctrica producida de la manera siguiente (\$/kW):

Máquina de vapor y generador, inclusive bastidores y controles	810
Condensador	140
Bombas, tuberías, aislamiento y controles de ciclo	200
Almacenamiento, aislamiento y depósito de agua	530
Colectores	1 110
Total	2 790

En los Estados Unidos, han aparecido muchas empresas pequeñas que se proponen construir

colectores solares de concentración que sigan al sol automáticamente. Una de ellas, la Sun Power Systems Corporation de Tempe, Arizona, ha puesto a punto colectores solares cilíndrico-parabólicos. A uno de éstos le corresponden los siguientes datos de funcionamiento y especificaciones:

Descripción: Se disponen en serie las artesas parabólicas de aluminio; el número de artesas necesarias en cada instalación concreta viene determinado por los requisitos energéticos. Las artesas permanecen enfocadas constantemente sobre el sol mediante un dispositivo electrónico que incluye un sistema de desenfoque a elevadas temperaturas, protección contra el congelamiento a temperaturas muy bajas, y un comparador de temperaturas que garantiza que el aparato sólo calentará el agua del depósito.

Dimensiones estándar de la artesa: 1,22 m x 3,05 m; área efectiva 3,41 m²

Superficie de la artesa: aluminio anodizado, garantizado durante más de cinco años. El polvo no tiene repercusiones apreciables sobre el rendimiento.

Producción diaria de energía (suponiendo una latitud de 32°N e insolación del 100%):

	Por unidad de área (MJ/m ²)	Por artesa (MJ)
21 de junio	21,41	73,0
21 de diciembre	13,05	44,5
Promedio	17,23	58,7

Relación de concentración: 44 a 1.

Fluido absorbente: agua.

Caudal del fluido absorbente: 0,3 l/s, aunque el sistema funciona igualmente bien con caudales mayores o menores.

Temperatura del agua: 177°C (sistema de circuito cerrado en el que el agua circula desde 8 colectores a través de un depósito de almacenamiento aislado de 150 l).

Máxima presión de funcionamiento: 20 barías.

Peso del colector: específico 7,3 kg/m²; por artesa 27,2 kg (incluye bastidores, componentes y agua).

Material absorbente: tubería de cobre duro de 1 pulgada con revestimiento negro selectivo.

Material de los bastidores: acero tubular (rectangular), de 1,65 mm de espesor.

Motor de rastreo: 2,8 rpm; relación de demultiplicación 1.780 a 1; intensidad de corriente 1 A; precisión no inferior a 10 minutos de hora solar.

Terminación de los extremos del colector: adaptable.

Almacenamiento recomendado por unidad de superficie del colector: 60 l/m².

Orientación: se prefiere la orientación norte-sur, aunque no es necesaria.

Se prefiere un techo plano, pero no es necesario.

Consideraciones estéticas: el sistema tiene un perfil muy bajo; se lo puede colocar fácilmente tras un pretil con lo cual no llama la atención.

Adaptabilidad: el sistema se puede instalar en cualquier estructura existente y se puede ampliar añadiéndole artesas adicionales si aumentaran las necesidades de energía.

Mantenimiento: no hace falta. Se pueden lavar los colectores de vez en cuando pero no es necesario.

Susceptibilidad a averías por tormentas: cuando está nublado, las artesas vuelven automáticamente a la posición nocturna, a fin de reducir al mínimo el daño que pudieran causar las tormentas.

Garantía: un año respecto de todos los materiales y componentes, excepto los que están sometidos a otras limitaciones de garantía impuestas por otros fabricantes.

El problema de estos colectores concentradores sencillos, que sin duda alguna funcionan bien, es que la breve experiencia de que se dispone no basta para evaluar su vida útil, su funcionamiento y los efectos de las condiciones climáticas y del polvo. El costo unitario actual (1976) de estos sencillos colectores solares es de unos 100 \$/m².

Resumen

Las máquinas solares de temperaturas intermedias y elevadas pueden utilizar máquinas de vapor y turbinas de vapor tradicionales. (Esto no es ninguna novedad; a comienzos de este siglo se instaló con éxito en Egipto una máquina solar de vapor.) Sin embargo, todavía no se consiguen comercialmente turbinas pequeñas.

El rendimiento térmico de estas máquinas es mayor que el de las de baja temperatura, por ser superior el rendimiento de Carnot.

Las máquinas precisan de radiación solar directa, con la que no siempre se puede contar.

Los colectores solares concentradores deben seguir al sol; el problema del rastreo se puede resolver técnicamente a un costo razonable. (Sin embargo, todavía no se han ensayado sistemas de este tipo durante un período largo.)

Se supone que las plantas solares a temperaturas intermedias y elevadas tendrán más éxito en instalaciones grandes que en pequeñas.

El problema del almacenamiento de la energía sigue siendo el más importante; es preciso resolverlo satisfactoriamente para poder superar muchos de los demás problemas.

Máquinas de aire caliente

La máquina de Stirling

En el motor de combustión interna tradicional, el calor se obtiene quemando cierta cantidad de combustible dentro de la cámara motriz de la máquina. En la máquina de Stirling, al gas motor que hay dentro de la máquina se le suministra calor mediante una llama exterior y un intercambiador de calor.

Primero, se comprime un volumen de gas frío, retenido en un cilindro por un pistón (figura 7a) y luego se lo calienta mediante una fuente de calor externa (figura 7b). A medida que el gas se va calentando, aumenta su presión y el pistón es impulsado hacia abajo, haciendo girar el cigüeñal. Terminada la expansión (figura 7c), el gas es enfriado por un agente refrigerador externo (figura 7d). Disminuye su presión y vuelve a ser objeto de nueva compresión (figura 7a). Como durante la expansión en caliente la presión es mucho mayor que durante la compresión en frío, la máquina produce un trabajo neto. El ciclo completo tiene lugar en una revolución del cigüeñal y no en dos revoluciones como ocurre en los motores corrientes.

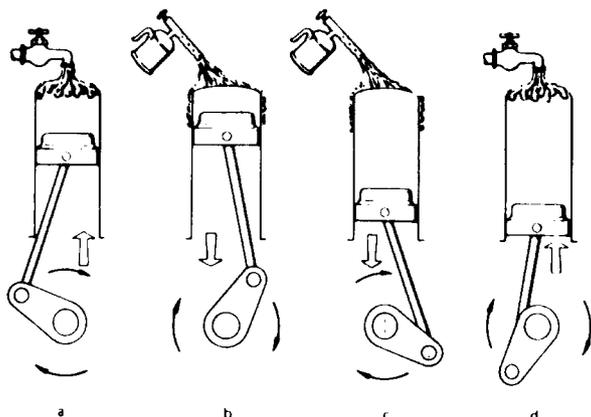


Figura 7. Representación simplificada de los principios en que se basa el funcionamiento del ciclo de Stirling

Por supuesto, el engorroso intercambio de agentes de calefacción y refrigeración que se representa de manera esquemática en la figura 7 no resulta práctico. El invento clave de Stirling consistió en lograr ese intercambio añadiendo un mecanismo denominado pistón de desplazamiento, que sirve para desplazar el gas entre una cámara caliente y otra fría, ambas estacionarias (figura 8). Estas cámaras (representadas por serpentines en la figura 9) están conectadas a los extremos opuestos de la sección de desplazamiento del cilindro. Cuando el pistón asciende (figura 9a) el gas caliente de la parte superior del cilindro pasa primero por el serpentín de calefacción. Luego pasa por el serpentín de refrigeración, donde se enfría hasta encontrarse casi en su totalidad en la sección fría por debajo del pistón

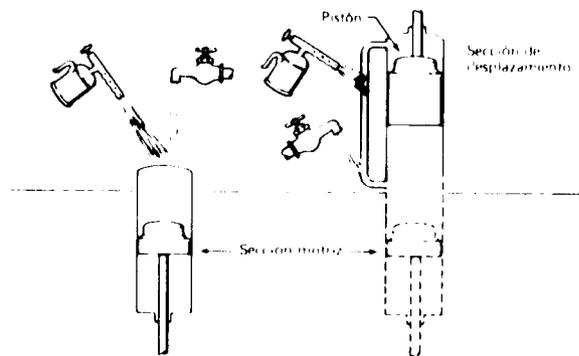


Figura 8. Representación simplificada del pistón de desplazamiento

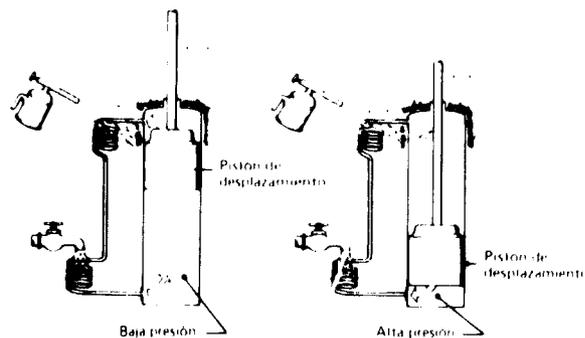


Figura 9. Acción del pistón de desplazamiento

de desplazamiento. Como el gas está frío, su presión es baja. El movimiento descendente del pistón (figura 9) obliga al gas a invertir su trayectoria a través de los serpentines de refrigeración y de calefacción, siendo calentado en este último e impulsado a la sección caliente por encima del pistón. Como el gas está caliente, su presión es elevada. En la trayectoria del gas no hay ninguna válvula, por lo cual cuando la cámara superior está a alta presión también lo está la inferior.

Para que la máquina de Stirling sea práctica precisa de una cosa más: el regenerador (figura 10). Situado entre los focos fijos de calefacción y de refrigeración, almacena el calor que de otra manera se desperdiciaría durante el proceso de enfriamiento y

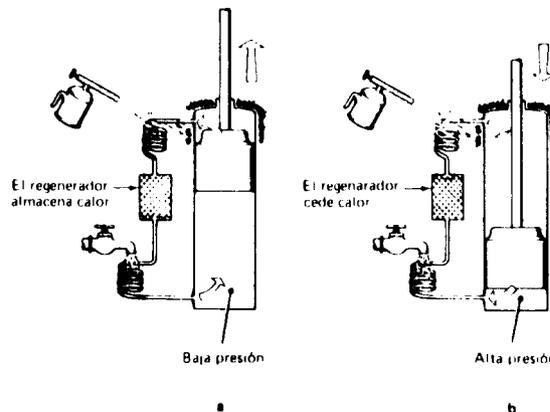


Figura 10. Acción del regenerador

permite recuperarlo durante la fase de calefacción. La cantidad del calor así almacenado es, en la práctica, varias veces mayor que la añadida por el foco caliente externo.

En la figura 11 se representan el regenerador y la sección de desplazamiento combinados con la sección motriz para integrar la unidad básica del ciclo de Stirling (no se muestra la articulación mecánica entre los pistones que mantiene la relación de fase correcta entre ambos). En la figura 11a se ve cómo el gas enfriado es comprimido por el pistón del motor, lo mismo que en un motor de combustión interna ordinario. En la figura 11b se va calentando el gas comprimido y su presión va aumentando porque el pistón de desplazamiento impulsa una parte del gas a la parte superior (caliente) de la sección de desplazamiento. Este aumento de presión actúa sobre el pistón inferior y lo impulsa hacia abajo. En la figura 11c, el gas caliente a alta presión ha terminado su ciclo de calentamiento por acción del pistón de desplazamiento descendente, y el pistón del motor ha terminado su carrera útil. En la figura 11d se observa cómo el pistón de desplazamiento asciende para impulsar al gas a la cámara de enfriamiento, disminuyendo de ese modo su presión. El pistón del motor está ya listo para repetir la carrera de compresión de la figura 11a, con lo que el ciclo queda terminado.

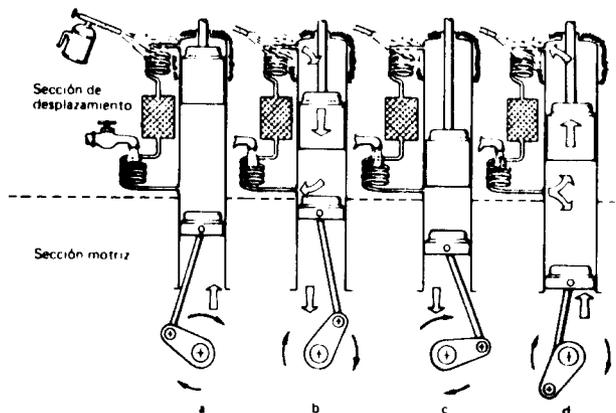


Figura 11. Ciclo de Stirling completo con sección de desplazamiento y regenerador

Máquina de aire caliente en ciclo cerrado

Máquina Philips

Philips ya ha puesto a punto máquinas de aire caliente pequeñas; una de ellas, de 750 W (1 hp) a 1.500 rpm, ha sido modificada por KHANA en la India con fines de experimentación con energía solar. Se quitó el sistema de calefacción, que era una cabeza cilíndrica de 6 cm de diámetro diseñada para quemar keroseno, y se utilizó energía solar concentrada para calentar la máquina. Se empleó un juego de espejos con una superficie de 8 m²; la máquina pudo accionar un generador eléctrico de 200 W, pero no fue posible alcanzar el rendimiento teórico del ciclo de Stirling.

Máquina de Farber

El Laboratorio de Energía Solar y Conversión de Energía de la Universidad de Florida (Estados Unidos) ha puesto a punto varios prototipos de máquinas de aire caliente y ciclo cerrado. Uno de los más interesantes es una máquina solar de aire caliente, sobrealimentada y con inyección de agua, en la que una válvula de retención ajustable permite a la máquina sobrealimentarse sola absorbiendo aire fresco o agua durante la parte del ciclo que se desarrolla a presión inferior a la atmosférica.

La máquina se puede "alimentar" con energía solar o puede utilizarse directamente sin modificación alguna para quemar madera, carbón o combustibles líquidos. Si se la emplea con energía solar, sólo hace falta concentrar ésta sobre el extremo del cilindro de desplazamiento que se encuentra dentro de la cámara de caldeo. Esta máquina puede construirse con máquinas herramientas muy sencillas.

En la parte superior va montado un cilindro de desplazamiento de 70 mm de diámetro interior y longitud interna de 257 mm. Dentro de él se mueve un pistón de desplazamiento con un diámetro exterior de 68 mm y una longitud de 203 mm. El pistón, cuya carrera es de 50 mm, tiene suficiente huelgo en el extremo y en la periferia para poder moverse con libertad dentro del cilindro.

El cilindro de desplazamiento está diseñado de tal manera que se pueda calentar un extremo mediante gas, petróleo o energía solar, y refrigerar el otro mediante aire o agua (en circuito cerrado o abierto). El pistón de desplazamiento es actuado por una varilla de 12 mm que penetra a través de un casquillo de manguito.

El cilindro de desplazamiento está conectado por un manguito de unión, de 3/4 de pulgada, al cilindro motor, que tiene un pistón de 60 mm de diámetro y una carrera de 38 mm.

La articulación entre el pistón de desplazamiento y el del motor permite regular la máquina. En funcionamiento normal, el pistón de desplazamiento precede al del motor en unos 100° aproximadamente. La regeneración tiene lugar a lo largo del pistón de desplazamiento y de las paredes del cilindro correspondiente. En estas últimas se almacena calor durante parte del ciclo, y se libera y aprovecha durante otra parte. El fluido motor, que se desplaza alternativamente en sentidos opuestos, cediendo su calor y absorbiéndolo más tarde, con lo que impide que abandone el sistema, proporciona una regeneración interna.

La máquina se pone en marcha cuando la presión interna es igual a la atmosférica. Por lo tanto, durante el funcionamiento la presión interna descenderá por debajo de la atmosférica durante una parte del ciclo. Durante el funcionamiento de la máquina en condiciones normales esta disminución es intensificada por fugas del fluido motor (aire) a través del manguito de la varilla del pistón de desplazamiento,

saliendo al exterior durante la parte del ciclo a alta presión y penetrando en el cilindro durante la parte a baja presión.

Se ha tropezado con muchas dificultades para impedir, o reducir al mínimo, tales fugas sin que aumenten considerablemente las pérdidas por rozamiento. Se han ideado dos métodos para resolver el problema:

a) **Inyección de aire.** Mediante una pequeña válvula de retención de bola ajustable, instalada como se indica en la figura 12, resulta fácil hacer que penetre rápidamente en el sistema aire nuevo durante la parte del ciclo que tiene lugar a presión inferior a la atmosférica. Esta sencilla adición permite a la máquina funcionar con una cantidad media mayor de fluido motor, lo cual se traduce en una mayor producción de energía.

b) **Inyección de agua.** Si la entrada de la válvula de retención se sumerge en agua, ésta es inyectada en el sistema en lugar de aire. Este procedimiento permite añadir al sistema cantidades del fluido todavía mayores, ya que se añaden en fase líquida, lo cual se traduce en aumentos aún mayores de la producción de energía. Otra de las ventajas que tiene el inyectar agua (u otros líquidos) es que con ello se intensifica enormemente la transferencia de calor en el extremo caliente.

Por lo tanto, la inyección espontánea de aire o de agua puede mejorar considerablemente el rendimiento de la sencilla máquina de aire caliente en ciclo cerrado (véase la figura 13).

Las máquinas del tipo aquí descrito pueden clasificarse en la categoría de "híbridas", porque combinan las ventajas del ciclo de Stirling con las de otros ciclos.

Máquina de aire caliente en ciclo abierto

La máquina de aire caliente en ciclo abierto absorbe aire de la atmósfera, lo comprime y lo calienta después mediante la energía solar; el aire comprimido se expande y escapa a la atmósfera. Se combina un compresor con la máquina (que también puede ser una turbina). La ventaja de este sistema es que la velocidad de la máquina no depende del ciclo de calefacción del aire.

Máquina KHANA

Se reparó a fondo una máquina pequeña de aire caliente en ciclo abierto procedente de un ventilador viejo a keroseno. Se sustituyeron las partes desgastadas y se modificó convenientemente la máquina antes de emplearla. Funcionó a una velocidad media de 250 rpm. En el extremo frío se disipaba el calor mediante aletas anchas y gruesas a lo largo de la caja de la máquina. Para conseguir un funcionamiento uniforme y continuo se deslizó sobre el fondo del cilindro de expansión un disco hueco de

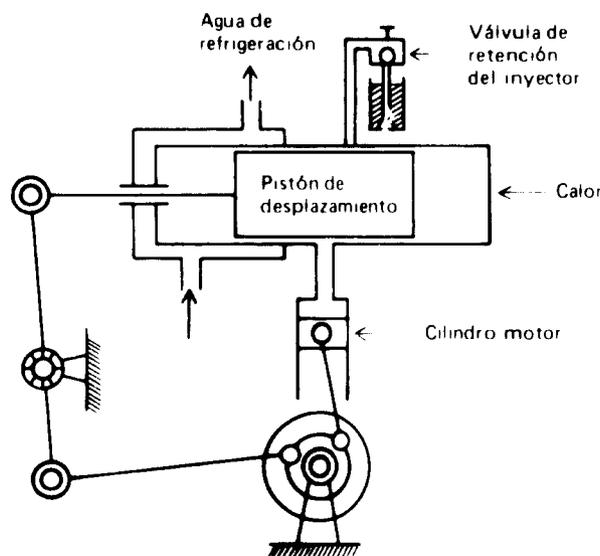


Figura 12. La máquina de Farber con inyección de aire y agua

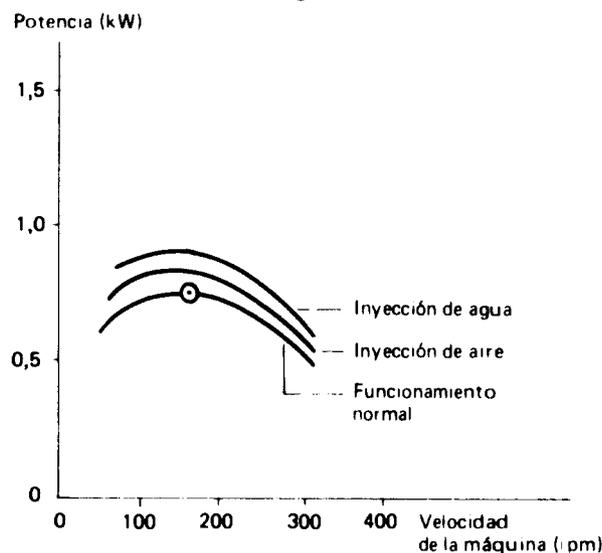


Figura 13. Curvas de potencia-velocidad de la máquina de Farber, en las que se observa el aumento de rendimiento que se consigue con la inyección

38 mm de espesor que formaba un fondo falso. El disco era de chapa de cobre y el espacio vacío estaba relleno con arena seca. Con él se conseguía un ajuste perfecto y un contacto total entre las superficies metálicas. El cilindro estaba encerrado en toda su longitud (216 mm), inclusive el fondo falso, en un tubo de vidrio Pyrex de diámetro ligeramente mayor y cerrado por un extremo. Con todo esto se contribuyó a elevar la temperatura del extremo caliente y a conseguir que la máquina funcionara de manera ininterrumpida y uniforme.

Acoplada a una pequeña bomba hidráulica alternativa, esta máquina se montó con los tres reflectores metálicos antes descritos y se la utilizó en experimentos de bombeo de agua desde distintas profundidades. La unidad acoplada sólo produjo unos 45 W, que es la mitad de la potencia prevista.

Posteriormente se consiguió otra máquina de aire caliente de capacidad casi doble a la utilizada anteriormente, se la modificó y se la montó en posición vertical sobre un tripode de hierro. Se la utilizó con concentradores de espejo plano. Una vez acoplada a la bomba de agua, la máquina produjo unos 95 W. Se colocó un pequeño reflector metálico cilíndrico-parabólico detrás del cilindro para que contribuyera a calentar el extremo caliente de la máquina de manera uniforme y lograr así que funcionara sin irregularidades.

Bombas solares

Las máquinas solares pueden accionar bombas de tipo tradicional; no obstante, en el Birla Institute of Technology and Science de Pilani (India), se están poniendo a punto prototipos de instalaciones para bombear agua sin piezas en movimiento. A continuación se describe el principio de las mismas.

En colectores solares de placa plana se evapora una mezcla de fracciones líquidas de petróleo con temperaturas de ebullición entre 35° y 40°C , que pasa después a un depósito cerrado lleno de agua ubicado dentro de un pozo. La presión del fluido energético hace que el agua ascienda hasta un nivel superior, que dependerá de la presión de la mezcla. El vapor se condensa durante la noche en los colectores solares. Esta modalidad discontinua de bombeo es muy sencilla, pero sólo se obtiene una cantidad muy pequeña de agua bombeada. También puede condensarse el vapor permitiéndole pasar por un condensador refrigerado por el agua bombeada. Utilizando dos depósitos de agua y un juego de válvulas de control, resulta posible un bombeo semicontinuo. Además del colector y del tanque de expansión rápida, hay dos depósitos de agua ubicados muy cerca de la fuente de agua y un condensador a nivel del suelo. En la figura 14 se observa la red de tuberías que interconectan los depósitos.

El fluido energético que penetra en el colector se vaporiza y regresa al tanque de expansión rápida. El vapor de dicho tanque pasa a uno de los depósitos de agua, desplazando a ésta. (Se supone que los depósitos de agua están llenos.) Al atravesar los serpentines del condensador, el agua desplazada enfría y condensa el vapor. Una vez que se ha vaciado el primer depósito, se hace pasar el vapor al circuito del segundo. Al mismo tiempo se va condensando el del primer depósito mediante el agua que se bombea del segundo. A medida que avanza la condensación, va disminuyendo la presión del primer depósito y el agua penetra por la válvula de retención. Así pues, mientras se vacía el segundo depósito, se va llenando el primero. Al invertir el ciclo mediante las válvulas, el primer depósito se vaciará por bombeo mientras el segundo absorbe agua. De esta manera se puede bombear el agua continuamente.

A fin de impedir que el fluido penetre en las tuberías del agua, dentro de los depósitos se mantiene

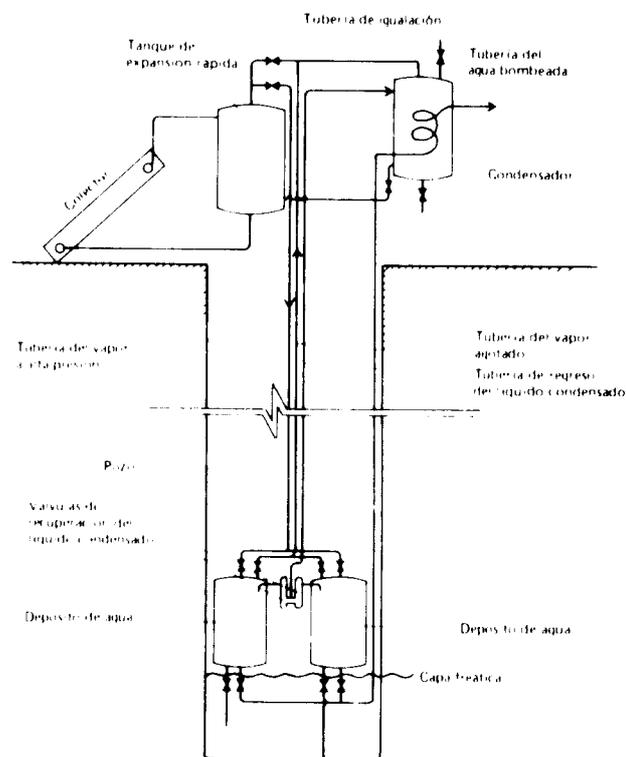


Figura 14. Bomba solar de agua

siempre un cierre hidráulico. El fluido que se condensa en el depósito de agua se puede bombar al condensador al comienzo de cada ciclo. El líquido condensado se bombea por la válvula de recuperación, que en principio es semejante a un purgador de agua del vapor. Además el líquido condensado se puede transferir al tanque de expansión rápida, periódicamente o al final de cada día, por igualación de presión.

Puede aumentarse la capacidad de la bomba añadiendo más colectores, lo cual solamente influye sobre la duración del ciclo.

El fluido energético debe ser inmisible con el agua; tener un punto de ebullición normal ligeramente superior a la temperatura atmosférica; ser inocuo y no inflamable, barato y fácil de obtener. El pentano cumple todos estos requisitos con excepción del de la no inflamabilidad.

Una fracción de destilación del petróleo cuyos componentes tuvieran puntos de ebullición muy próximos entre sí y propiedades semejantes a las del pentano sería más barata y más fácil de obtener que éste. La fracción de petróleo, que es una mezcla de hidrocarburos, ofrece una ventaja adicional, y es que se la puede preparar "a medida" para que se ajuste a las condiciones atmosféricas de la región en que se vaya a usar. Por ejemplo, en una región en la que la temperatura nocturna sea de unos 2°C y la diurna de 15°C , eligiendo una mezcla en la que predominen los hidrocarburos ligeros con puntos de ebullición entre 15° y 20°C puede bombearse agua a una altura considerable incluso a temperaturas del colector muy

bajas. En regiones como Pilani (situada al borde del desierto de Thar), donde se dan condiciones climáticas extremadas, pueden modificarse las propiedades del fluido energético para ajustarlas a las variaciones estacionales mediante la adición de pequeñas cantidades de hidrocarburos ligeros o pesados, a fin de obtener un elevado rendimiento de la bomba.

En la práctica, dos fluidos cualesquiera son siempre algo solubles mutuamente, por poco que sea; por ello, el contacto continuo del fluido energético con el agua nueva de cada ciclo se traducirá en cierta pérdida de dicho fluido. Afortunadamente, las condiciones de funcionamiento de la bomba son tales que las tasas de transferencia de masa en las proximidades de la interfase son sumamente bajas durante la mayor parte del tiempo. En consecuencia, la pérdida de fluido energético será insignificante.

A continuación figura una especificación propuesta para una bomba solar de agua del tipo antes descrito:

Area del colector de placa plana	100 m ²
Tasa de bombeo	150 m ³ /d
Altura de elevación	18 m
Dimensiones del depósito de agua	150 cm de altura x 90 de diámetro

El costo de la instalación, suponiendo que el costo unitario del colector sea 35 \$/m², ascendería a 6.000 dólares.

En los prototipos que se están poniendo a punto quedan por resolver muchos problemas tecnológicos, en particular el control del sistema de válvulas. El control eléctrico aquí propuesto no cumple los requisitos de una bomba solar de uso rural, que debe ser independiente de toda fuente exterior de energía.

Conversión directa de la energía solar en energía eléctrica

Cuando se ilumina una célula fotovoltaica con radiación solar se produce en ella una diferencia de potencial eléctrico. Las células que utilizan los semiconductores Si y CdS son las más conocidas en el mercado, y las de Si tienen la vida útil más larga. Se han emprendido importantes programas de investigación y desarrollo tecnológico para mejorar el rendimiento, simplificar la tecnología y disminuir los costos. En 1976, el costo unitario de la energía era de unos 15.000 \$/kW (carga máxima). Con los programas de investigación se desea disminuir este costo a 8.000 \$/kW en 1980 y a unos centenares de dólares por kilovatio en 1985.

En la actualidad, la tecnología disponible sigue pareciendo demasiado compleja para la mayor parte de los países en desarrollo, y no se puede planear a mediano plazo la fabricación ni siquiera de una serie

pequeña de células. Por estas razones, en el presente estudio no se profundizará más el tema, a pesar de que su porvenir es muy prometedor.

Refrigeración y climatización mediante energía solar

Climatizar significa tratar el aire de tal manera que se obtengan valores bien definidos de temperatura, humedad, velocidad y pureza en un espacio dado. En el presente estudio solamente se considerará el aspecto del enfriamiento, de modo que puedan relacionarse la refrigeración y la climatización de locales mediante energía solar. Por lo general, la temperatura es más baja en el caso de la refrigeración, sobre todo si se trata de la fabricación de hielo o de la mayoría de los casos de conservación de alimentos. En el caso de la climatización no pueden conseguirse valores bien definidos de temperatura y humedad sin una fuente externa de energía que accione ventiladores, bombas y sistemas de control.

Puede aprovecharse la energía solar para refrigerar recurriendo a una máquina solar que accione un compresor tradicional, pero en el presente informe sólo se discutirán máquinas de absorción calentadas por energía solar. Este tipo de máquina puede funcionar de manera continua o intermitente. En el régimen continuo se requiere una fuente externa de energía, por lo menos para accionar las bombas y el sistema de control. Los fluidos más conocidos son las soluciones acuosas de amoníaco y de bromuro de litio. Las primeras se prestan mejor al uso con colectores solares de placa plana.

Principio del funcionamiento (figura 15)

La mezcla de amoníaco y agua se calienta directamente mediante energía solar en el generador (caldera) o indirectamente mediante agua calentada con energía solar. Cuando se eleva la temperatura de la mezcla, el amoníaco empieza a evaporarse porque su solubilidad en agua disminuye al aumentar la temperatura. El vapor pasa a un condensador refrigerado por agua o aire, en el cual se condensa. A partir de este momento el funcionamiento es semejante al de un sistema tradicional de refrigeración con compresor. A la salida del condensador se dispone de un líquido subenfriado. La presión del amoníaco, que aumenta con la temperatura, está controlada por la temperatura de condensación. El líquido se expande a través de la válvula de expansión y comienza a evaporarse; su temperatura y presión disminuyen. El vapor frío a baja presión llega al evaporador en el cual absorbe el calor de las sustancias que se refrigeran (por ejemplo, agua muy fría para climatización y salmuera para fabricación de hielo). La temperatura del vapor aumenta y éste pasa

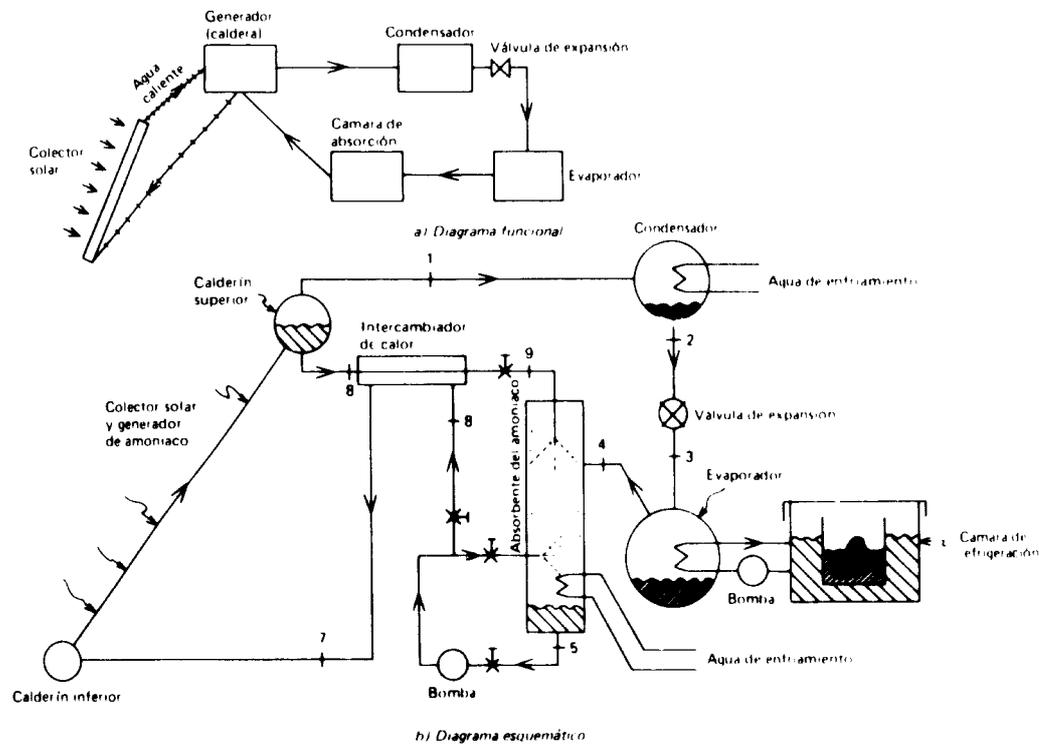


Figura 15. Ciclo de refrigeración con amoníaco y agua

a una cámara de absorción donde es rociado con una solución poco concentrada de amoníaco en agua y es absorbido. La absorción es exotérmica y es preciso enfriar la cámara de absorción para mantener la temperatura de la mezcla dentro de los límites que permitan alcanzar la concentración deseada. La concentración de la mezcla aumenta, se bombea esta última al generador y queda cerrado el ciclo.

Así pues:

a) Es preciso enfriar el condensador y la cámara de absorción; si el enfriamiento tiene lugar por convección natural, los intercambiadores de calor deben tener superficies muy grandes;

b) Se necesitan bombas alimentadas por energía externa, por lo menos para bombear la mezcla de la cámara de absorción al generador; si se pudiera utilizar un termosifón disminuiría enormemente la productividad;

c) En el caso de la climatización solar, el funcionamiento debe ser continuo;

d) Mediante un intercambiador de calor entre condensador y cámara de absorción puede aumentarse la productividad.

Se están realizando algunos experimentos (por ejemplo, en el Instituto de Refrigeración de la Universidad Técnica de Delft, en los Países Bajos) encaminados a producir 4 kg de hielo al día con 2 m² de colectores solares de placa plana, utilizando una máquina intermitente de absorción a base de amoníaco y agua, independiente de toda fuente exterior de energía. Durante la noche se condensa el

vapor de amoníaco por radiación celeste a través del colector solar de placa plana.

Caso concreto núm. 1: *Sistema solar de refrigeración con amoníaco-agua. Laboratorio de Energía Solar y Conversión de la Energía de la Universidad de Florida*

El generador es un colector solar cuadrado de placa plana de 1,2 m. Consiste en tubos de acero de 1 pulgada que van de un cabezal inferior de 1,25 pulgadas a uno superior de 2,5 pulgadas. Los tubos de acero están espaciados a intervalos de 100 mm entre centros y van soldados a una plancha de hierro galvanizada de espesor del 20. Este elemento se coloca en una caja de plancha metálica galvanizada entre una cubierta de un solo vidrio y 25 mm de aislamiento a base de espuma de poliestireno.

Todo el aparato forma un ángulo de 30° con la horizontal, lo cual es una solución intermedia para conseguir una buena captación de la energía solar y buenas características de flujo en dos fases y de transmisión de calor en los tubos inclinados. Como la unidad es estacionaria, está orientada hacia el sur, por ser ésta la mejor orientación media durante todo el día.

El condensador consiste en un tubo envolvente de tres pulgadas que contiene cuatro tubos estándar de hierro negro de 1/2 pulgada y 1,2 m de longitud, con los que se consigue una superficie de transmisión de calor de 0,325 m².

El evaporador está construido con un tubo envolvente de 4 pulgadas que contiene 7 tubos

estándar de hierro negro de 1/2 pulgada y 1,2 m de longitud que ofrecen una superficie de transmisión de calor de 0,572 m².

La cámara de absorción consta de un tubo envolvente de 6 pulgadas en el que hay 11 tubos estándar de hierro negro de 1/2 pulgada y 0,9 m de longitud, que dan 0,573 m² de superficie de transmisión de calor, la cual sirve además de soporte a la película líquida en que se reabsorbe parte del vapor de amoníaco.

La cámara de producción y almacenamiento de hielo es una caja cúbica de plancha metálica galvanizada de 46 cm de arista, aislada con 100 mm de espuma de poliestireno y protegida por una envoltura exterior de madera terciada fina.

El intercambiador de calor es una unidad sencilla de un solo paso, contracorriente y dobles tubos.

La bomba de circulación para la solución de anticongelante en agua es centrífuga de tipo estándar, y la bomba de circulación de la solución de amoníaco y agua es del tipo giratorio con rodillos de nilón. Mediante un circuito en derivación con la bomba puede controlarse la cantidad de solución distribuida a las diversas partes del sistema.

El sistema tiene, además de la válvula de expansión, otras cuatro válvulas que permiten controlar los caudales en las diferentes secciones. Mediante numerosos manómetros, termómetros, termopares y dispositivos de observación del nivel del líquido se pueden vigilar constantemente las condiciones de funcionamiento. La concentración de amoníaco en la solución varía del 48 al 60% en peso.

El sistema se ha ensayado hidrostáticamente hasta una presión de 20 barías y se considera que puede funcionar con seguridad a 13-15 barías. Esto corresponde a una temperatura de unos 66°C en el generador.

Para congelar el agua en el recipiente metálico donde se produce el hielo, la temperatura de diseño

del evaporador es 6° a 9°C, lo cual corresponde a una presión de unas 3 barías.

En la figura 16 se dan los datos correspondientes a un ensayo realizado el 6 de julio de 1968. Era un día totalmente despejado, aunque una cantidad considerable de energía solar llegó al colector como radiación difusa debido a que la humedad era relativamente alta. Una indicación de ello fue el ligero aumento de temperatura de la cámara de absorción y el generador incluso antes de que la radiación solar directa incidiera sobre la superficie frontal del aparato.

Al comenzar el día, la válvula de expansión estaba cerrada y se dejó que el sistema se fuera caldeando. (La capacidad calorífica de la combinación de cámara de absorción y generador de amoníaco solar era de 1,9 kJ/°C, aproximadamente.) Parte de la energía utilizada para el calentamiento previo se devolvió al sistema en las últimas horas de la tarde, cuando se liberó el calor almacenado a causa del descenso de temperatura.

Las presiones y temperaturas del sistema de refrigeración solar se controlaron eficazmente variando los caudales en las distintas partes del mismo mediante ajustes de las diversas válvulas. Durante ese día el sistema de absorción y generación recibió unos 41 MJ, y se produjeron 18,6 kg de hielo (a partir de agua a 24°C), lo que corresponde a una producción por unidad de superficie de colector de 1,25 kg/m².

Pueden formularse las siguientes observaciones:

a) Es posible diseñar y construir un aparato solar de refrigeración de pequeño tamaño que funcione satisfactoriamente;

b) El colector solar de placa plana puede captar una cantidad considerable de energía solar incluso en días nublados; a partir de 43°C en la cámara de absorción solar ya resulta posible hacer funcionar un sistema solar de refrigeración;

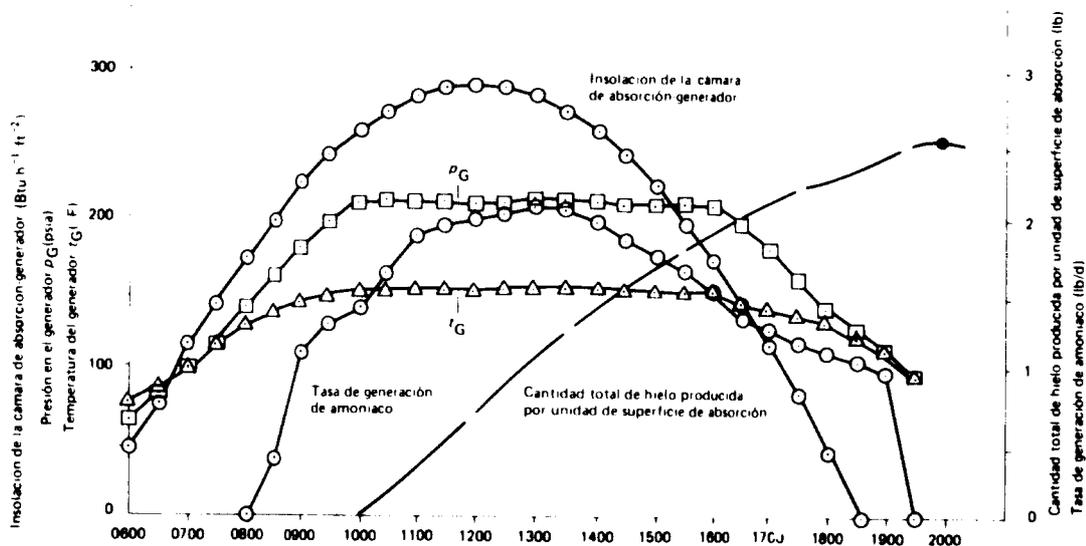


Figura 16. Datos obtenidos en un ensayo de un refrigerador solar efectuado el 6 de julio de 1968

c) El aprovechamiento de la energía solar para fabricar hielo resuelve el problema del almacenamiento;

d) Si se combinan en una sola unidad el colector solar y el generador de amoníaco, se eliminan las pérdidas de calor bastante considerables que se han observado entre esos componentes en sistemas anteriores. Sin embargo, esta ventaja sólo se consigue en aparatos pequeños, pues en sistemas grandes pueden plantearse problemas de circulación del fluido en dos fases y de estanquidad;

e) El detallado análisis teórico del sistema, especialmente respecto de la combinación cámara de absorción-generador de que se habla en otro lugar, ha demostrado que puede determinarse teóricamente el diseño y obtenerse el rendimiento deseado;

f) Como la tasa máxima de producción de hielo es de unos 20 kg/d en el caso de un sistema con dos bombas alimentadas por fuentes externas de energía y un condensador y cámara de absorción con enfriamiento por agua, ese sistema sólo suministra unos 10,5 MJ (2,4 Mcal) de enfriamiento al día.

Caso concreto núm. 2: *Climatizador de absorción a base de amoníaco y agua, enfriado por aire, con nuevas temperaturas en el generador, División de Energía y Medio Ambiente, Laboratorio Lawrence Berkeley de la Universidad de California (1976)*

El sistema es parte de un proyecto apoyado por la ERDA y está concebido para que funcione con temperaturas en el generador de 80° a 99°C, compatibles con el intervalo de temperaturas de los colectores solares de placa plana.

El climatizador se basa en el condensador, la cámara de absorción, el evaporador preenfriador y bomba de solución de un refrigerador de agua de absorción, a base de amoníaco-agua y calentado con gas, modelo Arkla ACB-60-00, que tiene una capacidad nominal de enfriamiento de 3,5 kW (5 toneladas de refrigeración). La potencia total necesaria para las bombas y el ventilador es 1,6 kW. Se añadieron los siguientes componentes: generador, precalentador, rectificador, depósitos de almacenamiento, válvulas de expansión ajustables, e instrumentos de medida (6 manómetros, 25 termopares, 2 rotómetros y 2 tubos de muestreo para medir la concentración).

El generador es un intercambiador de calor en contracorriente de torre con relleno. La solución concentrada gotea a través de los anillos de relleno, en contacto con cuatro serpentines de agua caliente en paralelo. La superficie externa total de dichos serpentines es 3,3 m². El condensador y la cámara de absorción son intercambiadores de calor en contra-

corriente, con tubos de aletas refrigerados por aire y superficies totales externas de tubo de 1,3 m² y 2,0 m², respectivamente. Las aletas eran hojas de aluminio de 0,25 mm de espesor, espaciadas a intervalos de 1,55 mm.

El sistema se pone en marcha bombeando agua caliente a una temperatura constante de entrada a través de los serpentines del generador. Cuando la presión en éste llega a las 10 barías aproximadamente, se ponen en marcha el ventilador del condensador-cámara de absorción y las bombas de la solución. El sistema tarda unos 15 minutos en caldearse hasta las condiciones de funcionamiento (con una carga de solución en el sistema de unos 29 kg y una concentración de amoníaco del 55%). Mediante las válvulas de expansión, se reajustan los valores deseados de los caudales de amoníaco y de solución diluida.

Todas las pruebas que se hicieron durante la fase inicial de ensayo confirmaron los cálculos del ciclo basados en la hipótesis de estados de equilibrio. Es decir, dados los gastos básicos medidos y las temperaturas y presiones también medidas, se pueden satisfacer los balances de energía entre componentes, dentro de los límites de error experimental (alrededor de ± 5%), utilizando las entalpías de equilibrio termodinámico. Los balances de masa se pueden satisfacer utilizando las concentraciones de equilibrio.

El funcionamiento del sistema es muy estable. No se observan cambios apreciables tras muchas horas de marcha. Esta sigue siendo estable incluso con elevados valores de la relación de circulación (masa de absorbente por unidad de masa de refrigerante), hasta de 27.

Para que el sistema funcione en condiciones próximas al umbral (es decir, con Δx próximo a cero, si x es la concentración total de amoníaco en la solución) se requiere más energía y una bomba de más capacidad para hacer circular la solución. Así pues, si se impone un límite a la potencia de bombeo, por ejemplo de 48 mW por vatio de carga de enfriamiento, Δx queda limitado a valores superiores a 0,03; o la relación de circulación a valores inferiores a 16 (suponiendo que la bomba tenga un rendimiento del 40%). En la figura 17 se resumen las posibles temperaturas de funcionamiento de un climatizador de absorción a base de agua y amoníaco que funcione en estas condiciones.

Si se desea conseguir un enfriamiento y una deshumidificación aceptables valiéndose de serpentines de agua fría de un tamaño razonable, t_E queda limitada a valores inferiores a 8°C. Si se utilizan colectores baratos de placa plana, la temperatura de generación, t_G , puede quedar limitada a valores inferiores a los 90°C.

La combinación de las limitaciones prácticas mencionadas impone temperaturas de condensación y de absorción inferiores a los 43°C. A esa limitación se le puede hacer frente duplicando los caudales de aire de enfriamiento y el tamaño del condensador-cámara

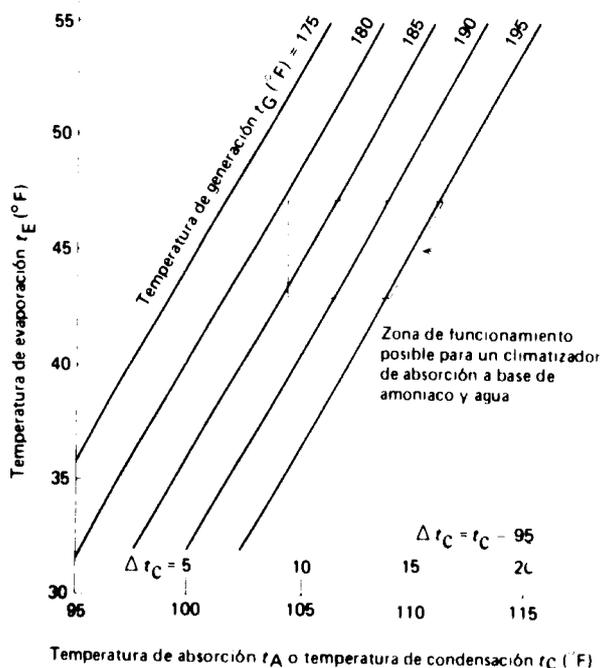


Figura 17. Temperatura de evaporación t_E de un climatizador de absorción a base de amoníaco y agua en función de las temperaturas de absorción, condensación y generación t_A , t_C y t_G , en las siguientes condiciones:

caída de presión en la cámara de absorción $p = 0,2$ barías; diferencia de concentración $\Delta x = 0,03$; y $t_A = t_C$

de absorción, en comparación con los utilizados en sistemas tradicionales de gas que utilizan un condensador y cámara de absorción de tubos de aletas. (Básicamente, estas condiciones ya se cumplen, puesto que el condensador, la cámara de absorción y el ventilador están sobredimensionados.)

Es imprescindible duplicar los caudales de aire de enfriamiento, pero mediante nuevos diseños de condensador-cámara de absorción más eficientes se podría reducir el requisito de duplicar el tamaño (y el costo) de estos intercambiadores de calor. Al duplicar los caudales de aire de enfriamiento, lo normal es que la potencia necesaria para el ventilador aumente de 24 mW a 48 mW por vatio de enfriamiento dando un rendimiento global de 10 W de enfriamiento por vatio de energía eléctrica de alimentación (en comparación con unos 2 W por vatio en el caso de un compresor mecánico).

El coeficiente de rendimiento (CDR) depende muchísimo del rendimiento η_{PC} del precalentador y de Δx , y prácticamente nada de los valores de los restantes parámetros. Para conseguir un valor de $CDR > 0,65$ con $\Delta x = 0,03$ el valor de η_{PC} debe ser del 90%, como mínimo. No debe resultar caro alcanzar este valor de η_{PC} , ya que en la solución diluida hay suficiente presión para favorecer altos coeficientes de transmisión de calor. Es imprescindible que el valor de η_{PC} sea alto para evitar que el calor contenido en la solución diluida se libere en la cámara de absorción.

La experiencia adquirida con el climatizador recién descrito indica que es técnicamente viable utilizar el ciclo de absorción de amoníaco y agua para refrigeración, con una temperatura de foco caliente por debajo de los 93°C y una de foco frío (utilizando enfriamiento por aire) inferior a los 43°C .

Caso concreto núm. 3: *Sistema de climatización solar de absorción con bromuro de litio. Universidad del Estado de Ohio (1975)*

El sistema se diseñó para climatizar un laboratorio de un solo piso con una superficie de 204 m^2 , construido sobre un sótano bajo de 1,2 m de altura. Además, hay tres patios cerrados pero no climatizados. La superficie de ventana del edificio se limita a seis franjas estrechas, con $1,7\text{ m}^2$ de vidrio. El alumbrado natural procede fundamentalmente de los patios. Los elementos de soporte de las paredes y del techo son de acero y, además de las cargas normales del edificio soportan más de 1.500 kg de colectores, bastidores y tuberías. Las paredes y el tejado están aislados con 50 mm y 75 mm de espuma de poliestireno con juntas calafateadas, para reducir al mínimo la infiltración y el intercambio de calor con el exterior. Los valores de U correspondientes a la pared y al tejado son $0,40$ y $0,28\text{ W m}^{-2}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, respectivamente.

Los colectores montados sobre el tejado están orientados hacia el sur y forman un ángulo de 45° con la horizontal. El conjunto de colectores consiste en 37 de éstos conectados en paralelo (superficie total: 61 m^2). Los colectores se construyen con dos láminas de vidrio templado, de 3 mm de espesor, colocadas sobre un absorbente de aluminio negro mate laminado. Para evitar pérdidas de calor de la parte posterior del colector se utiliza un aislamiento de fibra de vidrio de 90 mm de espesor. Para las tuberías del sistema se utiliza cobre con uniones dieléctricas en cada una de las dos conexiones por colector solar. Al comienzo se puso sumo cuidado en limpiar el sistema y llenarlo de agua destilada. Funcionó de esta manera durante un año, y luego se lo modificó para que utilizara una mezcla de glicol y agua como fluido motor del colector.

El sistema de almacenamiento de energía térmica consiste en dos depósitos de acero de 1,5 m de diámetro y 3,7 m de longitud revestidos de una capa de Tinkolite. Están montados horizontalmente y se encuentran en el sotano que hay bajo uno de los patios. El espacio restante de dicho sotano en torno a los depósitos se llenó con espuma de poliuretano para reducir al mínimo las pérdidas de energía.

La máquina solar de refrigeración es una máquina de absorción y expansión directa con bromuro de litio/agua, de tipo Arkla de 3 toneladas (10,5 kW), modificada por Arkla Industries para que funcione con agua caliente. La circulación dentro de la máquina tiene lugar por efecto de termosifón, lo cual

requiere una temperatura de entrada en el generador de 88°C o mayor para poner en marcha la circulación. Además de la fuente de calor a base de agua caliente, la máquina de refrigeración precisa de un sumidero de calor a base de agua fría. La eliminación del calor tiene lugar en una torre de enfriamiento Marley de 7,5 toneladas (25 kW). La presencia de este elemento añade a la operación dos motores que consumen energía, una bomba para la torre de refrigeración de 375 W y un ventilador para dicha torre de 250 W.

En la figura 18 se da el rendimiento del colector en función de la relación $\Delta t/HR$, siendo $\Delta t = t_{in} - t_a$, la diferencia entre la temperatura de entrada y la temperatura ambiente, y HR la insolación. Para enfriar a razón de 10,6 kW, la máquina refrigeradora de absorción requiere un insumo de calor constante a razón de 16 kW. Para lograrlo, el sistema de colectores debe captar energía a razón de 262 W por metro cuadrado. Si la temperatura ambiente es de 32°C y la temperatura de entrada del fluido en el colector, de 85°C , tendremos $\Delta t = 53^{\circ}\text{C}$, y en la figura 18 observamos que HR debe ser 946 W m^{-2} y el rendimiento del colector 28%, lo cual evidentemente fuerza el sistema de colectores hasta sus límites.

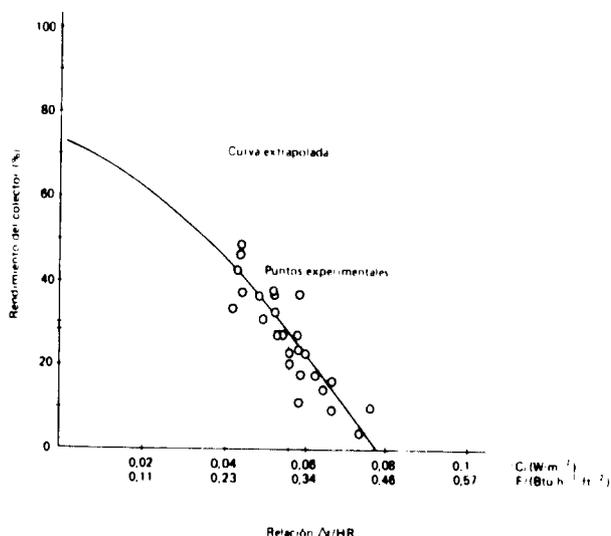


Figura 18. Rendimiento del colector en función de la relación entre la diferencia de temperaturas de entrada y ambiente y la insolación

A comienzos del verano de 1975, las temperaturas de los tanques de almacenamiento nunca pasaron de los 71°C , por lo cual no se consiguió enfriamiento solar. Tras una inspección se observó que se producían grandes pérdidas de calor en el tanque de almacenamiento. Con un sistema de control adecuado se pudo conseguir calentar periódicamente el agua a 93°C ; sin embargo, el sistema era sumamente sensible al paso de nubes. Al pasar una de éstas, el flujo disminuía muchísimo y las pérdidas en el colector hacían que la temperatura del circuito disminuyera rápidamente. Las válvulas de control accionadas por motores no podían responder a estas

condiciones de funcionamiento; por consiguiente se abandonó esta modalidad del mismo.

La comparación que se hace a continuación entre la energía necesaria con una máquina tradicional de compresión de vapor y una máquina solar de absorción muestra que la refrigeración por absorción requiere tres veces más energía que la refrigeración por compresión de vapor.

Absorción solar		Compresión de vapor tradicional	
Insumo de energía (W)			
Eléctrica			
Bomba del colector	560	Compresor	5 400
Bomba mecánica	125	Ventilador	640
Bomba del generador	350	Ventilador del condensador	620
Ventilador Arkla Bomba de la torre de refrigeración	560		
Ventilador de la torre de refrigeración	350		
	250		
Suma	2 195		6 660
Solar	16 100		
Total	18 295		6 660
Refrigeración conseguida	10 560		11 720
COP (producto/insumo)	0,58		1,76

De la comparación anterior se desprende una ventaja importante de la máquina solar de absorción: sus seis motores eléctricos sólo necesitan la tercera parte de la energía que consumen los tres motores de la máquina tradicional de compresión de vapor. Esto es importante cuando es necesario ahorrar energía eléctrica.

Los inconvenientes del sistema descrito son:

a) El bromuro de litio requiere una temperatura mínima de unos 90°C , que es muy difícil de conseguir con colectores solares de placa plana, a no ser que se utilice material selectivo muy caro;

b) El sistema es voluminoso;

c) Con seis motores independientes, el sistema es complicado; requiere un sistema de control tan complejo como el de la máquina tradicional.

Calefacción de locales mediante energía solar

Se han hecho muchos estudios sobre los aspectos económicos de la calefacción de locales por energía solar. El ahorro de energía varía del 30% al 80% del calor consumido total. Entre otras cosas, depende de las condiciones climáticas; de la forma, ubicación y orientación del edificio; del número de pisos; de la superficie acristalada en las paredes externas; de los materiales utilizados en la construcción; del tipo y

método de aislamiento; y de la modalidad de utilización de los locales.

Se ha empezado a trabajar intensamente en la esfera de la calefacción solar tanto en países desarrollados como en desarrollo, por ejemplo, en los Estados Unidos, Francia, la India, los Países Bajos y la República Federal de Alemania. Desde el punto de vista tecnológico, la calefacción de locales con energía solar ya es operacional. No obstante, se están llevando a cabo programas de investigación y desarrollo encaminados a aumentar el rendimiento, encontrar mejores soluciones arquitectónicas y reducir los costos. En muchos casos, como ocurre en el de los sistemas de calefacción tradicionales, el calentador solar puede además producir agua caliente para usos domésticos.

Cuando se emplea energía solar para calentar locales se recurre por lo general a dos modalidades de calentamiento: pasivo y activo.

Sistema pasivo

En la figura 19 se ilustra el principio del sistema pasivo. La radiación solar calienta la superficie absorbente, o sea la superficie externa oscura de la pared que está orientada hacia el sur (en el hemisferio norte). El espacio entre esta superficie absorbente y la doble placa de vidrio es un conducto en el que el aire se calienta y se eleva por efecto de termosifón, penetrando después en el espacio que se ha de calentar por una apertura ubicada en la parte superior de la pared. A medida que el aire caliente va cediendo su calor al local se va enfriando, desciende y regresa al conducto antes mencionado por una apertura ubicada al pie de la pared.

Ese diseño es fácil de construir. Las paredes constituyen el sistema de almacenamiento. En Odeillo, al sur de Francia, tales sistemas han suministrado del 60% al 70% de la energía total necesaria para calefacción.

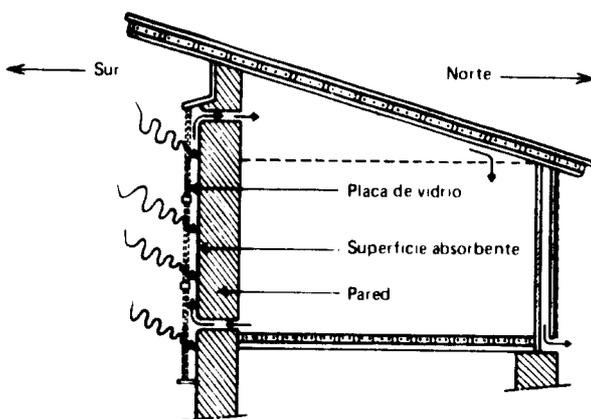


Figura 19. Sistema pasivo de calefacción de locales mediante energía solar

Sistema activo

Se calienta agua en colectores solares planos y se la hace circular a través de un tanque de almacenamiento haciéndola llegar a radiadores o a convectores ubicados en el espacio que se desea calentar. También se la puede hacer circular por serpentines sobre los cuales se sopla aire; de esta manera se calienta el local con aire caliente. En condiciones climáticas normales puede utilizarse una fuente térmica auxiliar (figura 20).

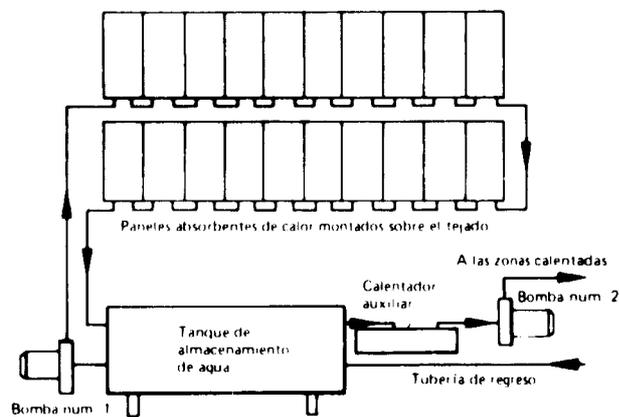


Figura 20. Sistema activo de calefacción de locales por energía solar con calentador auxiliar

Calentamiento de agua mediante energía solar

En Australia, Chipre, los Estados Unidos y el Japón ya se utilizan a escala relativamente grande calentadores de agua por energía solar. Han superado ya la etapa de investigación y desarrollo y de proyectos piloto, y la tecnología es fiable y bien conocida. En el mercado internacional se dispone de varios modelos. El más corriente de ellos tiene un colector solar de placa plana de 2 m^2 y un depósito de almacenamiento de 200 l.

En muchos países los calentadores de agua solares pueden suministrar toda el agua caliente necesaria para usos domésticos durante todo el año. En otros países, cuyo régimen de radiación solar es menos favorable, se necesita un calentador auxiliar tradicional.

El desarrollo técnico de los calentadores solares de agua depende del de los colectores solares de placa plana para otros fines, como la calefacción solar de locales o los motores solares.

El calentador solar de agua puesto a punto por el Brace Research Institute de la Universidad McGill (Canadá) puede utilizarse en una amplia gama de países en desarrollo. En la figura 21 se da un diagrama del mismo.

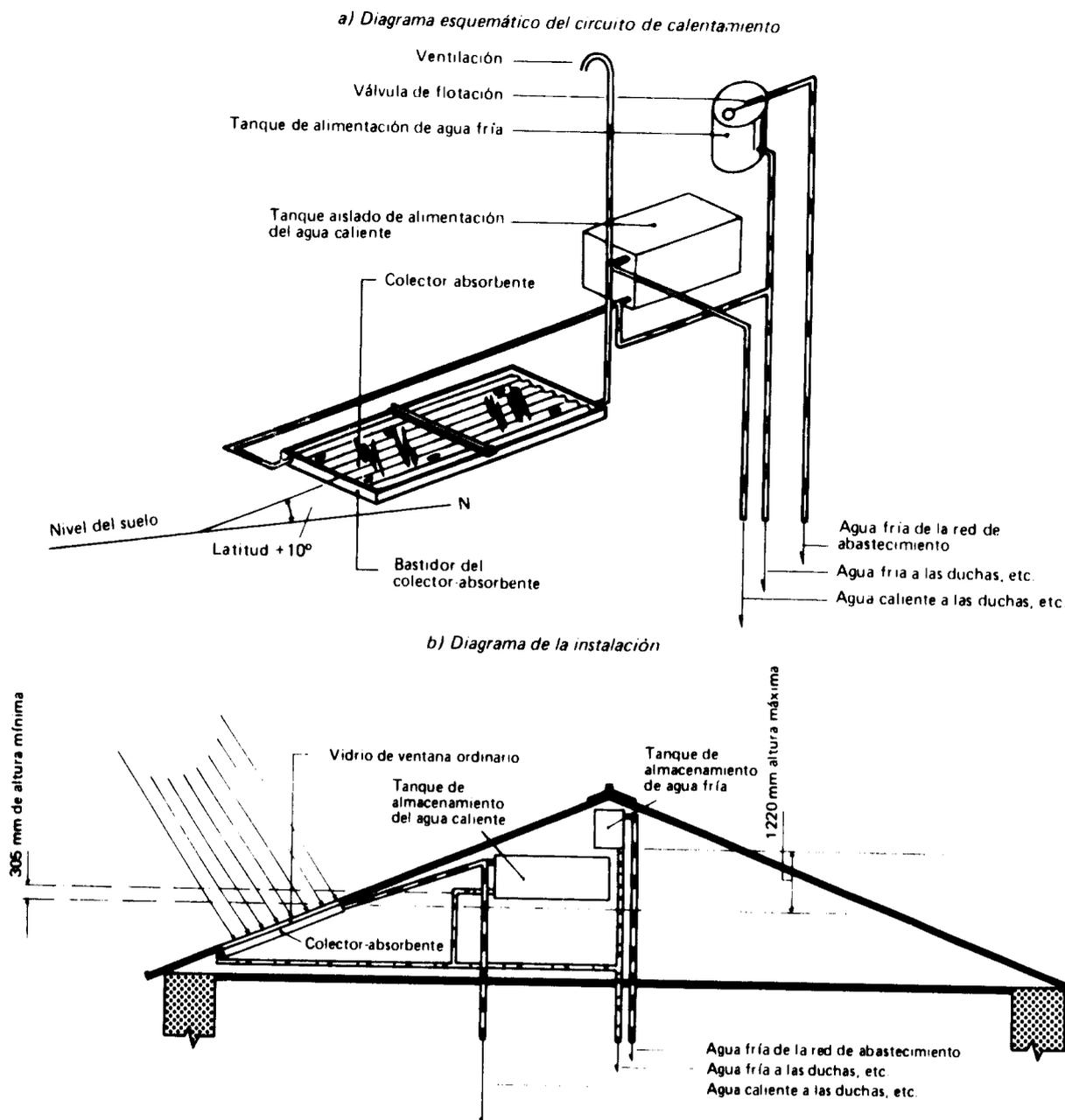


Figura 21. Calentador solar de agua puesto a punto por el Brace Research Institute (Canadá)

Destilación de agua mediante energía solar

Consideraciones generales

Se puede destilar agua del mar o agua salobre mediante alambiques solares o por métodos tradicionales como los de efecto múltiple, compresión térmica, osmosis inversa, electrodiálisis, humectación-deshumectación y desalación por congelación. En este artículo solamente se comentará la destilación directa en alambiques solares que no requieren fuentes de energía externas.

El principio de la destilación solar de agua se basa en el efecto de invernadero. Se coloca una capa de agua salobre o salada en un recipiente cerrado

herméticamente y cubierto con una lámina de vidrio u otro material transparente. El fondo del recipiente es negro; absorbe una gran parte de la radiación solar y calienta el agua, que comienza a evaporarse. El vapor llega a la etapa transparente, más fría, en la cual comienza a condensarse. Se dispone de un sistema para recoger el agua condensada.

Se han construido en varios países muchas plantas de destilación de diversos tamaños. En 1973, Dolyannis, de la Comisión de Energía Atómica de Grecia, publicó la lista que figura en el cuadro 2 y se ilustra en la figura 22. En la figura 23 se da la variación anual de la productividad de la planta de Nisiros (Grecia) durante el período 1969-1973.

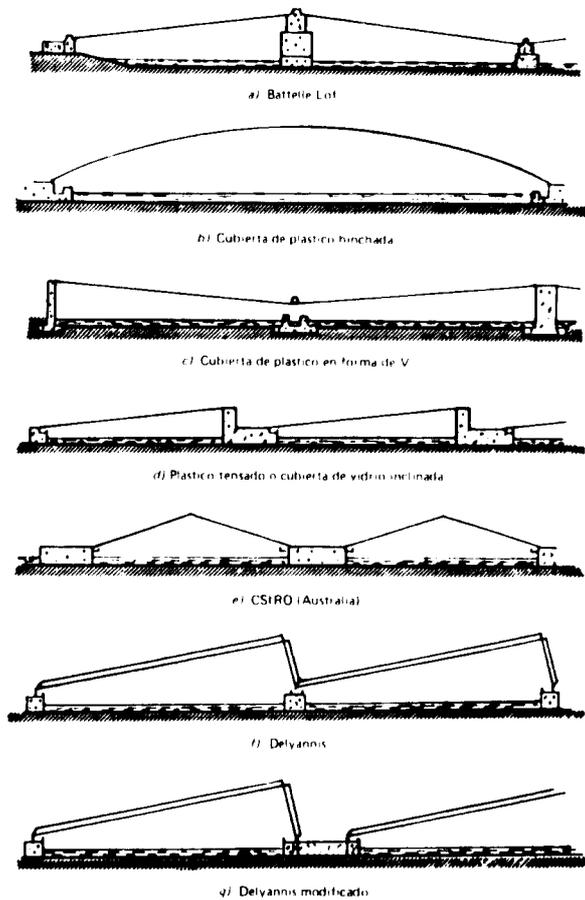


Figura 22. Diseños de alambiques solares

El número de variables que influyen sobre la productividad de los alambiques solares es muy elevado y dichas variables suelen ser interdependientes. Entre las más importantes figuran:

- Régimen de radiación solar;
- Velocidad del viento;
- Precipitación pluvial;
- Diseño del alambique;
- Profundidad de la capa de agua;
- Régimen de llenado y de vaciado;
- Mantenimiento.

Materiales de construcción

La Oficina de Aguas Saladas (Estados Unidos) ha publicado lo siguiente respecto de los materiales de construcción de alambiques solares:

“Desde que se construyó el primer alambique solar comercial de gran tamaño en Las Salinas (Chile), alrededor de 1872, los progresos más importantes en la tecnología de alambiques solares se han conseguido mejorando los materiales de construcción. La productividad no ha aumentado mucho, pero se han reducido considerablemente los gastos de mantenimiento y de funcionamiento. Por ejemplo, el alambique de 4.800 m² de Las Salinas se construyó a base de madera, vidrio y masilla, y para su funcionamiento se necesitaba un empleado de oficina, un vidriero, dos operarios a jornada completa y, de

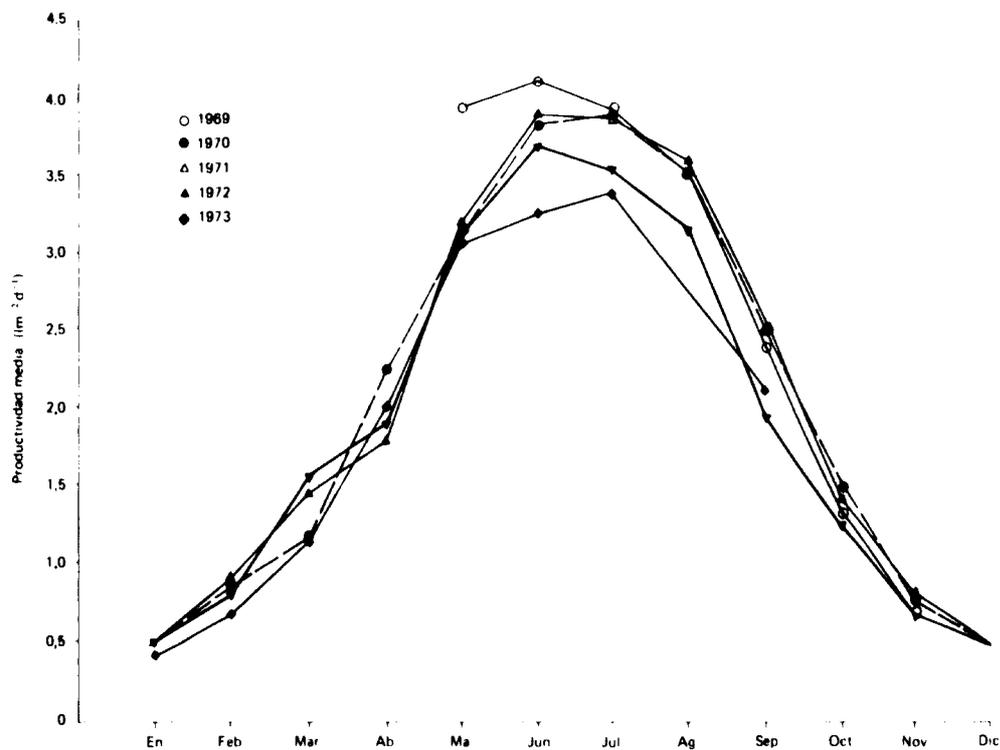


Figura 23. Variación anual de la productividad (cantidad de agua potable producida por unidad de superficie de alambique y por día) de instalaciones solares de destilación en Nisiros (Grecia), 1969-1973

CUADRO 2. DATOS CORRESPONDIENTES A LAS PLANTAS SOLARES DE DESTILACION MAS IMPORTANTES QUE SE HAN CONSTRUIDO EN EL PERIODO 1872-1973

<i>País o zona</i>	<i>Ubicación</i>	<i>Diseño^a</i>	<i>Año de construcción</i>	<i>Superficie (m²)</i>	<i>Agua de alimentación</i>	<i>Cubierta</i>	<i>Situación en 1973</i>
Australia	Muresk I	e	1963	372	Salobre	Vidrio	Reconstruida
	Muresk II	e	1966	372	Salobre	Vidrio	En funcionamiento
	Cooper Pedy	e	1966	3 160	Salobre	Vidrio	En funcionamiento
	Caiguna	e	1966	372	Salobre	Vidrio	En funcionamiento
	Hamelin Pool	e	1966	557	Salobre	Vidrio	En funcionamiento
	Griffith	e	1967	413	Salobre	Vidrio	En funcionamiento
Cabo Verde	Santa María	c	1965	743	Agua de mar	Plástico	
	Santa María	c	1968				Abandonada
Chile	Las Salinas	e	1872	4 460	Salobre	Vidrio	Abandonada
	Quilagua	e	1968	100	Agua de mar	Vidrio	En funcionamiento
España	Las Marinas	a	1966	868	Agua de mar	Vidrio	En funcionamiento
Estados Unidos	Daytona Beach	a	1959	228	Agua de mar	Vidrio	Reconstruida
	Daytona Beach	a	1961	246	Agua de mar	Vidrio	Desmontada
	Daytona Beach	b	1961	216	Agua de mar	Plástico	Desmontada
	Daytona Beach	b	1963	148	Agua de mar	Plástico	Desmontada
Grecia	Simi I	b	1964	2 686	Agua de mar	Plástico	Reconstruida
	Simi II	d	1968	2 600	Agua de mar	Plástico	Desmontada
						tensado	
	Aegina I	c	1965	1 490	Agua de mar	Plástico	Reconstruida
	Aegina II	d	1968	1 486	Agua de mar	Plástico	Abandonada
						tensado	
	Salamis	c	1965	388	Agua de mar	Plástico	Abandonada
	Patmos	f	1967	8 600	Agua de mar	Vidrio	En funcionamiento
	Kimolos	f	1968	2 508	Agua de mar	Vidrio	En funcionamiento
	Nisiros	f	1969	2 005	Agua de mar	Vidrio	En funcionamiento
	Fiskardho	f	1971	2 200	Agua de mar	Vidrio	En funcionamiento
	Kioni	f	1971	2 400	Agua de mar	Vidrio	En funcionamiento
	Megisti	f	1973	2 528	Agua de mar	Vidrio	En funcionamiento
Haití		d	1969	223	Agua de mar	Vidrio	En funcionamiento
India	Bhavnagar	e	1965	377	Agua de mar	Vidrio	En funcionamiento
Islas de							
	Barlovento	Petit St. Vincent	b	1967	1 710	Agua de mar	Plástico
México	Natividad	d	1969	95	Agua de mar	Vidrio	En funcionamiento
Pakistán	Gwadar I	f	1969	306	Agua de mar	Vidrio	En funcionamiento
	Gwadar II	g	1972	9 072	Agua de mar	Vidrio	En funcionamiento
Túnez	Shakmou	d	1967	440	Salobre	Vidrio	En funcionamiento
	Mahdia	d	1968	1 300	Salobre	Vidrio	En funcionamiento
URSS	Bakharden	e	1969	600	Salobre	Vidrio	En funcionamiento

Fuente: AEC.

^aVéase la figura 22.

vez en cuando, un carpintero. En cambio, algunos alambiques construidos hace poco sólo requieren un operario en régimen de jornada completa y algunos de ellos se han diseñado de manera que funcionen sin vigilancia durante largos períodos. El vidrio, el hormigón y el asfalto sólo parecen exigir un mantenimiento mínimo.

“Normalmente se prefieren materiales autóctonos. Sin embargo, al seleccionar los materiales es preciso estudiar cuidadosamente los aspectos económicos globales, inclusive los intervalos para mantenimiento y reconstrucción, así como el costo inicial de capital. Actualmente se registra una tendencia hacia el uso de materiales que

duren 20 años con un mantenimiento mínimo. Entre ellos figuran el hormigón, el vidrio, la goma butílica y el acero inoxidable.

“A continuación se da una lista de materiales utilizados en componentes de alambiques que han dado resultados razonablemente satisfactorios al utilizarlos en la práctica en todo el mundo. Respecto de cada componente se enumeran los materiales por orden de preferencia desde el punto de vista de la duración. Cuando se vaya a construir un alambique solar directamente sobre el suelo utilizando un revestimiento, es aconsejable emplear antes un insecticida y un yerbicida para reducir la posibilidad de pinchazos.

Componente	Materiales
Revestimiento de la artesa	Goma butílica (0,015 a 0,30 pulgadas de espesor) Láminas de asfalto (0,12 a 0,25 pulgadas de espesor) Polietileno negro (0,08 pulgadas de espesor) Asfalto para techar (sobre hormigón, etc.)
Cubierta	Vidrio de ventana (0,10 ó 0,12 pulgadas de espesor) Película de FPV* (0,004 pulgadas de espesor)
Estructuras	Hormigón. Bloques de hormigón. Aluminio Metal galvanizado. Madera*
Artesa para el agua destilada	Acero inoxidable. Goma butílica (revestimiento) Polietileno negro (revestimiento)
Compuesto obturador	Goma de siliconas. Asfalto para calafatear Extrusiones de goma butílica
Tuberías y válvulas	CPV (cloruro de polivinilo). Cemento de asbestos (para agua salada). ABS (acrolonitrilo-butadieno-estireno)
Depósitos de agua	Hormigón. Mampostería

*Vida relativamente corta.¹

Planta solar de destilación ONUDI/UNICEF de Somalia

La ONUDI, con financiación del UNICEF, está ejecutando en Somalia un proyecto de destilación solar cuyo principal componente es una planta solar de destilación de agua de unos 2.000 m² de superficie neta de evaporación. Se espera que el alambique produzca de 5 a 6 m³ de agua potable al día, que incluyen la lluvia recogida.

El diseño de la planta se adaptó de uno preparado por el Central Salt and Marine Chemicals Research Institute (India) para su uso en la India. Entre las modificaciones introducidas figura el perfeccionamiento del diseño de las tuberías, una disminución de los pasos entre alambiques, la modificación de la inclinación de la cubierta de vidrio a 15° en lugar de 20°, el uso de aluminio en lugar de madera para los soportes del lado superior de la lámina de vidrio, y una ubicación distinta de los depósitos de agua de mar, agua destilada y mezcla de aguas.

¹ Oficina de Aguas Saladas, informe núm. 546.

La planta consta de 15 bloques, cada uno de los cuales consiste en 6 cubas simétricas que comunican entre sí, de unos 13 m de largo y 1,5 m de ancho. Los principales materiales de construcción son ladrillos, hormigón, lámina de vidrio, plástico, brea, pintura de tanques mezclada con un mástique, cinta aislante de algodón para recubrir las juntas de las láminas de vidrio y servir de apoyo a la masilla, perfiles y chapas de aluminio, y tubería galvanizada. El costo estimado de estos materiales y de dos bombas manuales en la India asciende a unos 23.000 dólares, y el de la mano de obra, a unos 4.600 dólares. Por lo tanto, el costo por unidad de superficie evaporadora neta es de unos 14 \$/m².

Se ha sugerido que, en otra planta de destilación de 200 m², se construyan 12 unidades experimentales de 3 m² cada una para comparar el comportamiento de los materiales, los efectos del aislamiento, etc. Una de las unidades servirá de referencia; cada una de las 11 restantes será idéntica a la de referencia excepto en una de las variables siguientes: inclinación, profundidad del agua, construcción de la pared, material de revestimiento, aislamiento de la cubeta.

Consideraciones de diseño

Todavía no se ha llegado a un consenso respecto de cuál sea el diseño óptimo de una planta solar de destilación. Sin embargo, las consideraciones siguientes parecen ser objeto de acuerdo general:

a) Deben utilizarse en la medida de lo posible materiales locales y tecnología sencilla;

b) Debe utilizarse ladrillo enlucido o bloques de hormigón que puedan resistir las condiciones atmosféricas y los efectos del agua salada y conferir propiedades de estanquidad;

c) La estructura de aluminio con lámina de vidrio para las paredes y la cubierta es una solución buena pero cara, y no será frecuente que pueda recurrirse a ella;

d) Para la superficie negra absorbente pueden considerarse por el momento dos soluciones: hormigón con pinturas bituminosas especiales, que se ha experimentado con éxito en la India, o una lámina delgada de goma butílica, de 1 mm de espesor aproximadamente, que también se ha experimentado con éxito en Austria, Grecia y otros países. Este último material, si bien requiere una tecnología bastante más avanzada (sellado por vulcanización o con adhesivos) no es afectado por la radiación solar, las temperaturas elevadas o los puntos secos. Sin embargo no es frecuente que se disponga de él en países en desarrollo;

e) No se justifica aislar el alambique por debajo de la cubeta cuando la superficie es grande porque el suelo actúa como medio semiinfinito a través del cual se experimentan pocas pérdidas térmicas, y el aislar los lados del alambique no aumenta considerablemente la productividad a causa de que la superficie de

transmisión de calor que éstos representan es relativamente pequeña. Por lo tanto, dado el costo de los materiales aislantes y de su instalación, el aislamiento no es económico por lo que respecta al aumento de la productividad de alambiques grandes. No obstante, siempre debe estudiarse la posibilidad de utilizar materiales aislantes disponibles en la localidad. Es imprescindible que el aislamiento se mantenga seco, sea cual fuere el material usado. Por lo general, a efectos de aislamiento basta con una capa de tierra seca por debajo del revestimiento de la cubeta;

f) Respecto de la cubierta, la mejor solución parece consistir en el uso de lámina de vidrio de unos 3 mm de espesor. No se justifica el empleo de una cubierta con dos capas de vidrio. La experiencia obtenida hasta la fecha con los materiales plásticos todavía no es concluyente. Hay varios tipos (CPV, FPV, PTFE, polieteno, poliéster, politrifluoromonocloroetileno y nilón) que se han ensayado en condiciones menos rigurosas que las de los alambiques de gran tamaño. Los únicos materiales que durarán hasta cinco años son PTFE de 0,13 mm, FPV de 0,10 mm, y poliéster tratado para resistir a la intemperie, de 0,13 mm. En general, la vida útil de los plásticos expuestos a la radiación solar es muy corta. Además, las cubiertas muy finas no resisten la acción del viento;

g) Es muy importante que el alambique sea estanco, y por ahora no se encuentran en el mercado materiales obturadores eficientes y baratos. La goma de silicona es muy buena pero también muy cara. En la India se ha utilizado con éxito en alambiques un compuesto bituminoso con mástique, para aplicación en frío, destinado a la reparación de goteras en tejados, pero todavía es muy pronto para pronosticar la vida útil de los cierres;

h) Por lo que respecta a la profundidad de la capa de agua del alambique, se conviene generalmente en que las capas poco profundas dan una mayor productividad, pero si el terreno no es horizontal pueden producirse puntos secos en el fondo absorbente si no se emplea goma butílica o material equivalente; 5 cm de profundidad parece ser una solución realista;

i) No hay acuerdo general en cuanto a la inclinación óptima de la cubierta de vidrio. Es importante asegurar que se forme una película que permita la buena condensación y transmita bien la radiación solar; una inclinación de 10° a 20° parece aceptable. Para cubrir una superficie horizontal determinada, al aumentar la inclinación aumenta la superficie de la cubierta y por lo tanto su costo, y puede disminuir la productividad del alambique;

j) La influencia de la geometría de la cubierta sobre la fracción de energía incidente que penetra en el alambique es insignificante en instalaciones grandes, donde el área de sombra causada por los lados es pequeña en comparación con la de la superficie de evaporación;

k) Los alambiques de cubeta suelen orientarse con su eje más largo en la dirección E-O o N-S. En los alambiques de cubierta simétrica o de poca pendiente, la orientación tampoco influye sobre la productividad: estas cubiertas deben orientarse con el eje más largo en dirección E-O, con la cubierta de poca pendiente o de placa única mirando hacia el ecuador (S en el hemisferio norte, N en el sur);

l) El alambique también debe servir de superficie de captación de la lluvia;

m) Todavía no se ha determinado cuál es el régimen óptimo de alimentación del alambique con agua dulce (continua o por cargas). Sin embargo se sabe con seguridad que el enjuague periódico del alambique con agua dulce puede prevenir el depósito de sal y el crecimiento de algas, fenómenos ambos que disminuyen la productividad. Debe evitarse el depósito de sal porque ésta aumenta la reflectividad de la superficie negra y disminuye en consecuencia la productividad;

n) Normalmente, añadiendo unas pocas partes por millón de una sal de cobre se puede impedir el crecimiento de algas.

Secado solar

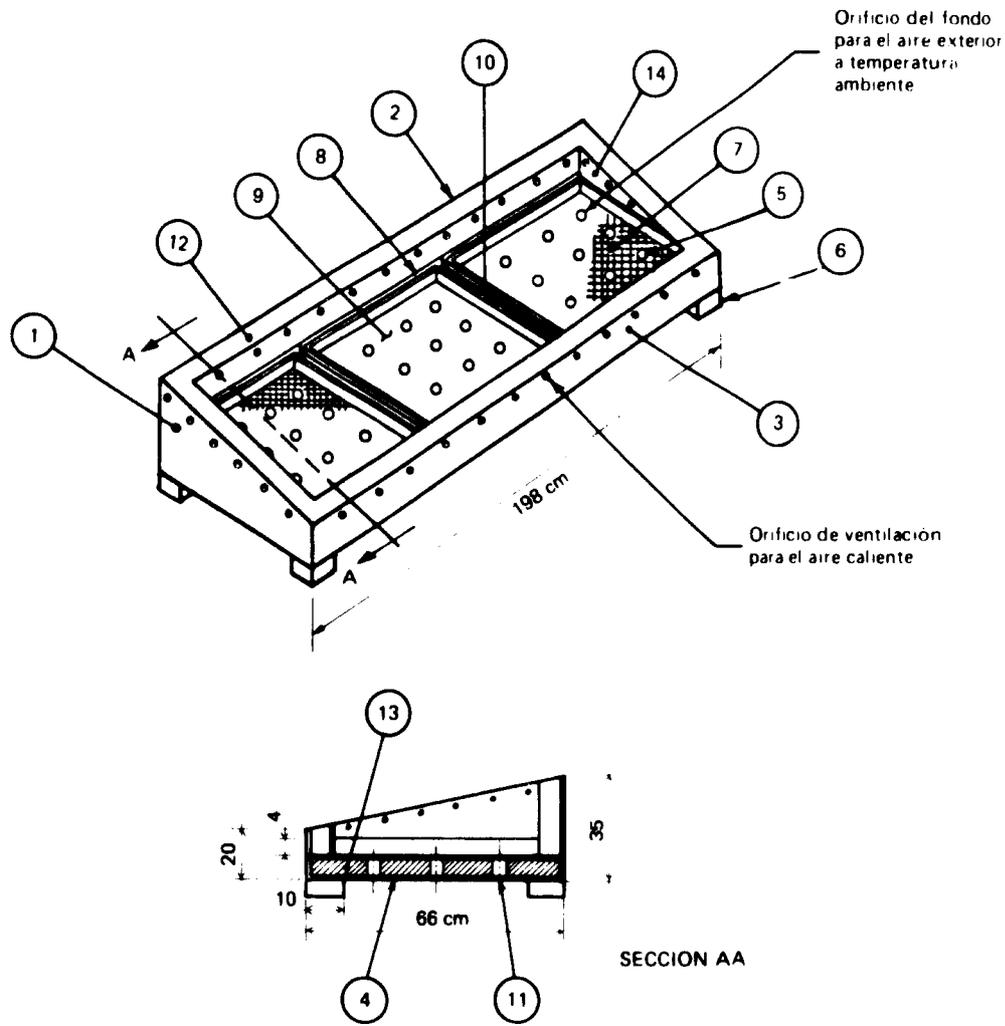
El secado de alimentos, productos agrícolas o pescado mediante energía solar es una práctica muy antigua. Sin embargo, en los últimos años se han desarrollado intensas actividades de investigación y desarrollo tecnológico en países desarrollados y en desarrollo con miras a sistematizar el proceso y a proteger a los productos puestos a secar de la lluvia, el polvo y los insectos. El Brace Research Institute² (Canadá) ha preparado un estudio muy útil del proceso, en el cual se basa la mayor parte de esta sección. Los datos relativos a secadores solares se presentan en forma de estudios de casos concretos en los que se dan descripciones de los secadores, resultados experimentales y dibujos. También se ha incluido información sobre aspectos económicos.

Caso concreto núm. 1. *Secador solar de armario: diseño general*

El secador solar de armario consiste básicamente en una caja calentada por el sol en la que se deshidratan frutas, legumbres y hortalizas u otras sustancias en pequeñas cantidades. Está aislado y cubierto con un tejado transparente de dos capas. En la base se practican orificios que permiten la penetración en el armario, por convección, de aire del exterior para ventilación.

La construcción de semejante secador puede revestir muchas formas. No obstante, se pueden recomendar ciertas especificaciones para todos los secadores de este tipo (figura 24).

² A Survey of Solar Dryers, Technical Report T99, Brace Research Institute, McGill University, Ste. Anne de Bellevue, Quebec, Canadá (1975).



Descripción	Material	Dimensiones (cm)	Número necesario
1 Panel lateral	Madera	2 espesor	2
2 Panel posterior	Madera	2 espesor	1
3 Panel frontal	Madera	2 espesor	1
4 Base	Madera terciada	198 x 66 x 2	2
5 Revestimiento de los orificios	Tubo de politano	12,7 diámetro x 6 longitud	27
6 Pata	Madera		4
7 Bandeja	Madera y tala metálica	62 x 62	3
8 Puerta	Madera		3
9 Cubierta transparente	Vidrio	61 x 62	3
10 Guías de las bandejas	Madera		4
11 Pantalla	Fibra de vidrio		27
12 Marco de la cubierta	Madera		1
13 Aislamiento	Fielto de lana	5 espesor	-
14 Recubrimiento interno de las paredes laterales	Papel de aluminio		2

Figura 24. Dibujos y especificaciones de un secador solar de armario

El armario debe tener una longitud tres veces mayor, como mínimo, que la anchura, a fin de reducir al mínimo la sombra que den los paneles laterales. La pendiente de la cubierta debe determinarse a partir de la figura 25, que da el ángulo recomendado para las temporadas de secado en función de la latitud. Este gráfico es aplicable por igual a las zonas al norte y al sur del ecuador. Se debe observar que, en latitudes inferiores a los 20° , la pendiente del techo transparente se mantiene constante a 6° . Esto tiene por objeto permitir una diferencia mínima de elevación entre un lado del colector y el otro, a fin de que el aire pueda circular bien por convección sobre la zona de secado y de que la lluvia se deslice sobre la cubierta. La cubierta transparente debe consistir en dos capas de vidrio (2 mm de espesor) o de película de plástico (unos 0.13 mm de espesor).

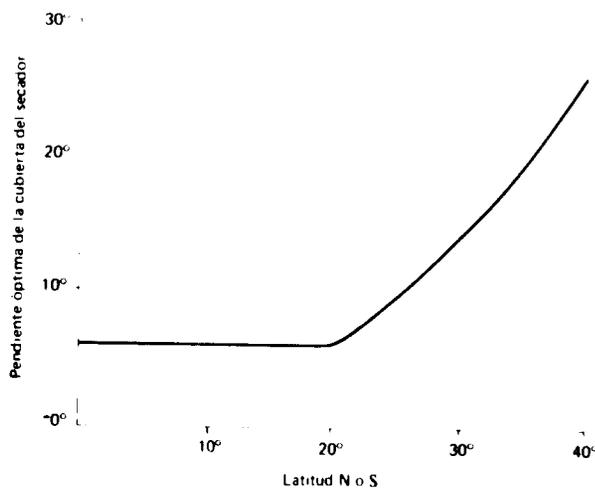


Figura 25. Pendiente óptima de la cubierta del secador solar en función de la latitud de su ubicación

Por lo general, las cubiertas de plástico tienen una vida limitada, por lo cual deben utilizarse materiales tratados para protegerlos de la radiación ultravioleta. Pueden ser de poliéster o de CPV; no deben utilizarse películas de polietileno ni de acetato de celulosa porque habría que renovarlas al final de cada temporada de secado y tal vez no dieran buenos resultados durante éstas. Aunque en algunos casos puede ser conveniente renovar las cubiertas cada temporada, puede tropezarse con dificultades si se emplean películas que no puedan soportar las altas temperaturas generadas en el armario, que pueden llegar de 80° a 100° en algunos secadores. En estos tipos de unidades es aconsejable recurrir a vidrio de ventana ordinario con un marco adecuado.

La estructura de los modelos portátiles puede ser de madera, metal o tablero conglomerado. Puede utilizarse madera terciada para las unidades más complicadas, y trabajo de cestería con bambú o mimbre para las unidades más primitivas. Pueden fabricarse bases perforadas y paneles laterales

colocando un aislamiento entre capas de mimbre ennegrecido o de trabajo de trenzado abierto. Con ello se reducen costos y se da trabajo a la industria local.

Las estructuras permanentes pueden hacerse de adobe, ladrillo, piedra u hormigón.

El aislamiento debe consistir en materiales disponibles en la localidad, como virutas de madera, serrín, bagazo, fibra de coco, desperdicios de lana o pelo de animal. En las zonas donde hay plagas de hormigas, termitas u otros insectos nocivos, deben protegerse bien los materiales susceptibles de ataque antes de colocarlos en la base.

El armario se debe construir siguiendo las pautas esbozadas en la figura 24. (Las dimensiones que en ella se dan son las del secador del caso concreto No. 2, que se expone más adelante.) Las capas aislantes que revisten la base y los lados deben tener un espesor mínimo de 5 cm. Se deben practicar orificios en la base aislada e introducir en ellos trozos cortos de tubería (tubo de plástico o de goma, bambú, etc.). Cuando sea muy frecuente el ataque por los insectos, todos los orificios del armario deben taparse con red fina contra mosquitos (de preferencia de fibra de vidrio) o con gasa. Por lo general, la elevada temperatura del interior del armario disuade a los insectos y roedores de penetrar en él y devorar los comestibles que se están secando. Además, en zonas áridas en que hay una gran concentración de polvo y residuos en el aire, la cubierta transparente protege al producto de la contaminación.

Esta cubierta se puede enmarcar, fijándose el marco al bastidor del armario. Si se utiliza vidrio, tal vez sea preciso utilizar un agente obturador para adherir la cubierta al marco; de lo contrario, el vidrio se debe mantener fijo mediante una moldura adecuada. Hay que tener mucho cuidado en cerciorarse de que la cubierta sea completamente estanca, a fin de que no se deteriore el producto que hay en el interior del armario y de que no se moje el aislamiento. Deben pintarse de negro o de otro color oscuro adecuado todos los componentes del marco de la cubierta a fin de absorber la máxima cantidad de radiación solar. Deben fijarse listones de sujeción al borde superior externo del marco de la cubierta a fin de proteger a la película contra el efecto excesivo de elevación provocado por el viento.

Una vez fijados la cubierta y el bastidor, deben practicarse varios orificios en los paneles posterior y laterales. Con ellos se consigue un mecanismo de ventilación para eliminar el aire caliente y húmedo. El número de los orificios dependerá de las condiciones climáticas y de la naturaleza del material que se seque. Un buen método consiste en practicar inicialmente un número mínimo de orificios laterales de ventilación en el secador, y luego ir aumentando su número hasta tener los necesarios para que no haya condensación interna de humedad. De esta manera se tiene la certeza de que se ha hecho el número exacto de perforaciones necesarias.

CUADRO 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE UN SECADOR EN KAMPUR (INDIA)

Producto	Cantidad secada (g)	Tratamiento previo	Contenido de humedad (%)		Temperatura máxima permisible (°C)	Tiempo de secado (h)
			Inicial	Valor final preferido		
Ciruelas	750	Sulfuración	85	15-20	77	18
Melocotones o duraznos	275	Ninguno	80	5-6	77	11
Guisantes	420	Escalado	80	5-6	66	5
Coliflor		Ninguno	85	5-6	66	2.5

El panel posterior debe llevar puertas de entrada al armario. Todas las puertas deben estar ubicadas en la parte posterior para evitar que se arrojen demasiadas sombras sobre el secador durante las operaciones de mantenimiento.

Las bandejas se deben construir, según se indica, de tela metálica galvanizada o algún material parecido. Se las debe colocar sobre guías a unos cuantos centímetros de altura para que haya buena circulación del aire por debajo y alrededor del producto que se seca.

El interior del armario debe pintarse de negro y el exterior de los paneles laterales, posterior y de la base, con pintura de aluminio. Si se desea, pueden cubrirse con una capa de papel de aluminio los interiores de los paneles laterales y posterior. Si no se dispone de este material, debe pintarse de negro las superficies mencionadas.

El funcionamiento del secador no es complicado. Los productos que se van a secar se tratan previamente del modo habitual (es decir, se los escalda y fumiga) y se los coloca en las bandejas perforadas, a razón de unos 7.5 kg por metro cuadrado de superficie de secado. Un accesorio útil es un termómetro pequeño que se inserta en uno de los orificios de ventilación con el depósito protegido de los rayos del sol; los límites superiores de temperatura que pueden soportar los productos agrícolas varían enormemente.

Cuando los productos que se secan pudieran resultar perjudicados por la radiación solar directa, o cuando son de color claro y reflejan gran parte de la radiación incidente, es conveniente cubrir las bandejas cargadas con una malla negra de plástico o con gasa negra. Con ello no se debe impedir el flujo de aire a través de las bandejas sino absorber la radiación y transmitir el calor al producto por conducción y convección. El aumento de temperatura resultante se puede controlar abriendo las puertas posteriores de acceso. Este sistema aproximado de control de la temperatura se puede dominar fácilmente con un poco de experiencia.

Caso concreto núm. 2: *Secador solar de armario de Kanpur (India); resultados experimentales*

Datos climatológicos

Los datos climatológicos pertinentes al lugar de ensayo son:

Temperatura máxima en el verano	45°C
Temperatura mínima en el invierno	10°C
Horas de sol anuales	4 000
Días nublados anuales	30

Se observó que la inclinación óptima del secador era de 13° en verano y 40° en invierno.

Datos de secado

El secador se utilizó con carácter experimental de junio de 1971 a julio de 1972. En el cuadro 3 se dan los resultados obtenidos.

A efectos de comparación, en el cuadro 4 se da cierta indicación de los límites de temperatura y el posible rendimiento con otros alimentos, en un secador del mismo tamaño y especificaciones pero en el clima seco, árido y sin nubes del Mediterráneo.

CUADRO 4. RENDIMIENTO PROBABLE DEL SECADOR EN EL CLIMA MEDITERRANEO

Producto	Cantidad (fresca) secada por unidad (kg)	Tiempo de secado (d)	Temperatura máxima permisible (°C)
Albaricoques	4	2	66
Ajos	2,6	2	60
Uvas	5,7	4	88
Ocra	3	2	66
Cebollas	3	2	71

Condiciones del funcionamiento

Se observó que dentro del secador podía alcanzarse una temperatura media de 75°C, frente a una temperatura media exterior de 35°C.

El secador se construyó conforme a las especificaciones de la figura 24, tardándose en ello dos días, y a un costo de unos 20 dólares en 1973. Los gastos anuales de funcionamiento fueron los siguientes (rupias):

Amortización	16
Interés del capital (al 10%)	16
Imprevistos	8
Total	40 (unos 5 dólares)

Conclusiones

La vida útil del secador se estima en 10 años. El secado solar ahorra mucho tiempo en comparación con el simple secado al aire libre. Además, se observó que el producto final obtenido en el secador tenía mejor sabor y aroma y no estaba contaminado por polvo ni dañado por insectos.

A veces puede ser preferible que la cubierta sea de plástico en lugar de vidrio, que se puede romper con piedras, etc. Si se pasa por alto el riesgo de rotura, el vidrio tiene normalmente una vida más larga, de unos 10 a 20 años si el secador se instala en el tejado de un edificio. En último extremo, es el propio agricultor quien debe decidir cual es la cubierta que le resulta más económica y aceptable.

Como la construcción del secador es muy simple puede correr por cuenta del propio agricultor, quien necesitará para ello herramientas manuales sencillas y de esta manera disminuirán los costos de mano de obra.

También puede utilizarse el secador para calentar alimentos y otras materias. Resulta especialmente útil como fuente autónoma de calor a 70°-80°C sobre el terreno y en explotaciones agrícolas aisladas.

Caso concreto núm. 3: *Secador solar ventilado por energía eólica (República Árabe Siria)*

Durante 1964-1968 se utilizaron con carácter experimental en la República Árabe Siria varios secadores ventilados por energía eólica, del tipo que se describe a continuación.

Características

Cabe describir el secador como una cámara de secado a través de la cual se hace pasar aire caliente, calentado en un colector solar, mediante un ventilador rotatorio impulsado por el viento (véase la figura 26).

El colector solar en que se calienta el aire consiste en un tablero de fibra pintado de negro, aislado en su parte inferior y recubierto por una lámina de plástico (o de vidrio). El colector se monta mirando al sur y se le da el ángulo de inclinación óptimo para la zona y la temporada.

El aire penetra por el extremo abierto del fondo del colector y pasa entre el tablero negro (absorbente) y la cubierta. Si entre éstos, y a la misma distancia de ambos, se coloca una malla negra, aumenta la eficacia del colector; la radiación solar que pasa a través de la cubierta transparente es absorbida por la malla y por el tablero. La malla proporciona una superficie de transmisión de calor adicional y el aire que pasa por este conducto recibe más calor. Mediante estos sistemas se han conseguido rendimientos del colector superiores al 75%.

El aire caliente que sale del colector pasa a la base de la cámara de secado, en la que hay pilas adyacentes de seis bandejas cada una. El aire caliente circula en sentido ascendente a través del producto puesto a secar. Se obtiene calor adicional de la radiación solar que atraviesa las láminas transparentes que recubren los lados este, sur y oeste del armario de secado. El panel vertical posterior y el horizontal inferior del secador son de tablero ennegrecido y

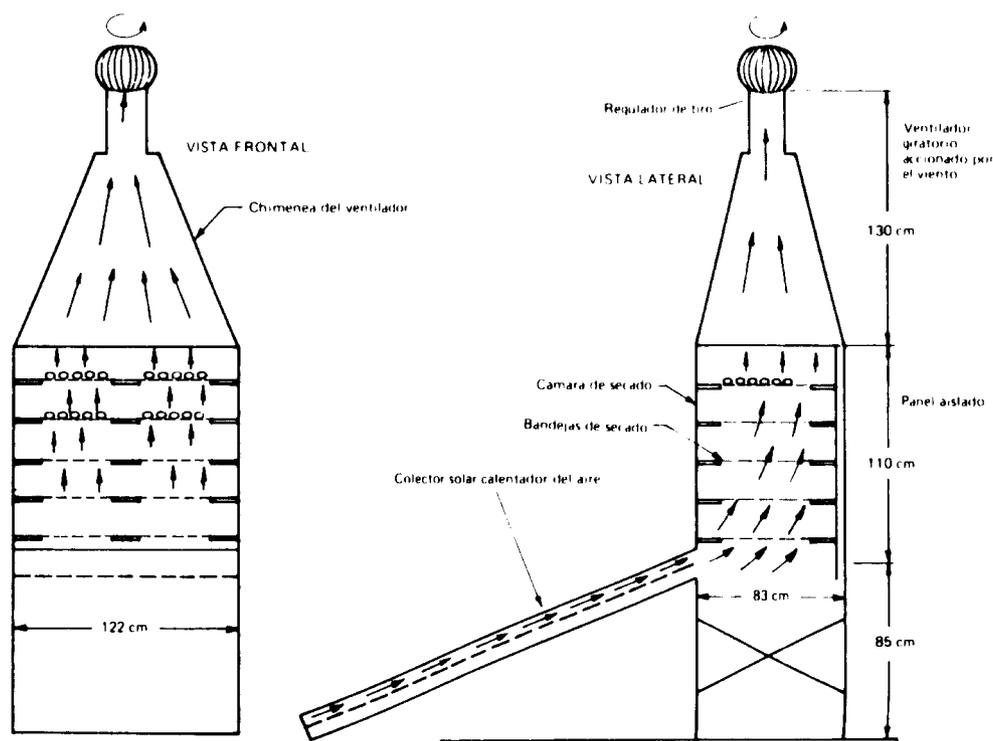


Figura 26. Secador solar con ventilador accionado por el viento

aislado para reducir las pérdidas de calor. En el extremo de una chimenea colocada encima de la cámara de secado hay un ventilador que es accionado por el viento. La chimenea debe tener una longitud adecuada para conseguir el efecto de tiro y para captar más viento.

El ventilador es un rotor de aletas corrugadas. Al girar bajo la acción del viento extrae aire de la chimenea de ventilación. El rotor va montado sobre una suspensión con rodamientos a bolas. La fricción es muy baja y la inercia mantiene al ventilador en marcha incluso en condiciones de vientos esporádicos. Los ensayos cuantitativos realizados con los ventiladores indican que con este tipo de aparato se consigue una salida constante de un gran volumen de aire aunque los vientos sean intermitentes. También podría utilizarse un eductor estacionario colocado en el extremo de la chimenea; sin embargo, funcionaría solamente por convección natural en los periodos en que no soplara el viento.

Los materiales de construcción son los siguientes:

Cámara de secado

Cubierta transparente	Película de poliéster
Estructura	Tablero ennegrecido para la pared posterior y los paneles de fondo
Aislamiento	Paja
Bandejas	Tela metálica

Calentador solar de aire

Cubierta transparente	Película de poliéster
Absorbente	Tablero ennegrecido con una malla de plástico negra a 2 cm de la superficie
Aislamiento	Paja
Estructura	Hojas de tablero ennegrecidas en el fondo y en las paredes laterales

Datos climatológicos

El secador se encuentra en Duma (cerca de Damasco) a 33°33' de latitud norte y 36°24' de longitud este. El clima se caracteriza por veranos secos y sin nubes e inviernos frescos y algo lluviosos. Las temperaturas medias mensuales exhiben una variación anual considerable que divide el año en cuatro estaciones bien diferenciadas. No obstante, los periodos de primavera y otoño parecen preceder y seguir sin solución de continuidad al clásico clima estival del desierto: elevadas temperaturas diurnas; bajas humedades relativas; días claros y sin nubes; ausencia de precipitación durante casi seis meses. En la mayor parte del país el porcentaje de insolación durante el periodo mayo-octubre es superior al 85% y durante el periodo junio-septiembre suele estar por encima del 95%.

Datos de secado

La instalación secó satisfactoriamente okra, cousa (variedad Baladi), calabaza, berenjena, pasta de tomate y ñame. Para dar un ejemplo de los rendimientos de secado conseguidos en la instalación

puede indicarse que se comunicaron tiempos de secado de la okra y la cousa más cortos en un 20% y 58%, respectivamente, que si se las hubiera secado al Sol. Además, la calidad del producto final obtenido en el secador solar se consideró superior.

Se comunicó que el rendimiento del calentador solar de aire variaba entre 64% y 88% (relación entre el calor útil absorbido por la corriente de aire y la energía transmitida a través de las superficies transparentes).

Las condiciones de funcionamiento durante los ensayos cuyos resultados se han comunicado anteriormente fueron las siguientes: el día fue bastante soleado, y la temperatura ambiente del aire fue de 30° a 34°C. La temperatura del aire caliente que penetraba en la cámara de secado era de 36.2° a 58.4°C.

Comentarios

En las operaciones de secado solar, cuanto mayor sea el caudal de aire que penetra en la cámara de secado, mayor será el rendimiento. Si la velocidad media del viento es elevada, tan practicable resulta el uso de un eductor estacionario como el de un ventilador giratorio. Cuando se deseen temperaturas superiores para secar determinados productos, instalando reguladores de tiro en la chimenea del ventilador resultará posible controlar el caudal de aire y en consecuencia la temperatura del secador. Si el diámetro del ventilador es pequeño, parece más conveniente utilizar una chimenea de gran sección transversal con una transición suave a la sección del ventilador. Con esto se reduce la fricción del aire y se consigue un caudal adecuado.

Evaluación

La construcción de estos secadores solares es sencilla y su funcionamiento económico. Sin embargo, deben aprovecharse al máximo los materiales y la tecnología locales. Puede estimularse a los agricultores a que construyan sus propios secadores solares basándose en modelos diseñados por instituciones locales y disponibles para fines de demostración.

Cuando se trata de aplicaciones en pequeña escala, en las condiciones actuales la única fuente externa de energía posible es el viento. Cuando se recurre a la convección forzada mediante ventiladores accionados por motores térmicos, eléctricos o solares, debe hacerse un estudio de viabilidad para averiguar qué porcentaje de la energía consumida puede ser suministrado como energía mecánica por los motores. Se están emprendiendo muchos proyectos de investigación en países en desarrollo, y parecería posible incluir las siguientes sugerencias en estos programas cuando se utiliza convección forzada:

a) Estudio de la influencia de la temperatura del aire calentado por energía solar. Esta temperatura

puede variarse, hasta el valor máximo compatible con la conservación de la calidad de los productos secos, variando el rendimiento de los colectores solares o la velocidad del aire calentado;

b) Estudio de la influencia del número de Reynold de la corriente de aire a través del producto que se seca, haciendo variar la descarga del ventilador;

c) Reducción de la potencia útil del fluido optimizando la caída de presión entre los colectores solares y la salida del secador. Con un régimen de secado intermitente, al final de cada período deben hacerse cálculos y mediciones de la humedad.

II. EVALUACION TECNOECONOMICA DE EQUIPO SOLAR

Comparación de motores solares con motores de combustión interna

La expresión "motor solar" designa en el presente estudio la instalación completa de un motor alimentado por energía solar, y la expresión "motor de combustión interna" se limitará a motores diesel y de gasolina (todavía no hay en el mercado turbinas de gas de muy baja potencia).

Pueden considerarse muchos factores al realizar una comparación tecnoeconómica de esta índole pero, con miras a simplificar el estudio, se los limitará todo lo que sea posible sin alterar por ello de manera significativa la validez de la comparación. Se discutirá el costo del equipo instalado, la amortización, el mantenimiento, las reparaciones y la energía consumida, y las repercusiones de la tecnología solar sobre el desarrollo industrial.

Más adelante se da una ecuación general para determinar el costo máximo por unidad de potencia instalada a partir del cual el motor solar comienza a ser más económico que uno diesel o de gasolina. A fin de que la ecuación fuera sencilla se formularon ciertas hipótesis; se las debe tener presente al sacar conclusiones de la ecuación.

Hipótesis

En condiciones favorables de insolación, una máquina solar puede funcionar unas seis horas al día, pero no lo hace a plena capacidad durante todo ese tiempo. Por consiguiente parece razonable tomar 1.500 horas al año como tiempo de funcionamiento a la potencia nominal. Esta duración podría ampliarse en el caso de que se contara con instalaciones adecuadas de almacenamiento de calor.

Excepto con fines experimentales, no parece justificado el uso de motores solares de menos de un kilovatio en países en desarrollo a plazo corto y medio. Por ejemplo, puede sustituirse una bomba solar de ½ kW por otra de tracción animal de ¼ kW que funcione ocho horas al día. El ahorro de energía que se consigue utilizando motores solares pequeños es muy reducido; por ejemplo, un motor solar de ½ kW ahorrará solamente 250 kg de combustible al año, cuyo transporte no debiera plantear dificultades. Los motores solares en el intervalo de 2 a 15 kW serían más económicos y se venderían mejor.

Un motor diesel o de gasolina puede trabajar ocho horas al día sin dificultad (3.000 horas al año). Se considera un grupo de dos motores, cada uno de los cuales tenga la mitad de la potencia del motor solar, de manera que se disponga de uno de repuesto y se pueda contar con un funcionamiento fiable.

La mayor parte de los pequeños motores diesel actuales con regímenes entre 1.000 y 15.000 rpm tienen una potencia de 2 kW o mayor. Por lo tanto, en el intervalo de bajas potencias solamente se considerarán motores de gasolina, y en el de 10 a 15 kW, solamente motores diesel.

Se supondrá que el costo anual de los préstamos concedidos para financiar la instalación será igual a la mitad de la tasa de interés multiplicada por la cuantía del préstamo. Esta simplificación no afectará de manera significativa a la precisión de la comparación porque se aplica tanto a las instalaciones solares como a las tradicionales y tiene relativamente poca importancia en comparación con los otros términos de la ecuación.

En la comparación se pasan por alto los efectos de la inflación.

Ecuación de comparación de costos

En base a las consideraciones anteriormente expuestas, puede formularse la siguiente ecuación:

$$\left(a_s + b_s + \frac{i}{2}\right) K_s = \left(a_t + b_t + \frac{i}{2}\right) K_t + q_t c_t + q_l c_l \quad (1)$$

cuyos símbolos significan lo siguiente:

Variables

- a* tasa anual de amortización (numéricamente igual a la inversa de la vida útil prevista del motor, expresada en años).
- b* relación entre el costo anual de mantenimiento y reparación y el costo del motor instalado.
- i* tasa de interés del préstamo empleado para financiar el costo del motor instalado.
- K* costo del motor por unidad de potencia instalada.
- q* tasa anual de consumo de combustible diesel, gasolina o lubricante (por unidad de potencia instalada).
- c* costo unitario del combustible diesel, la gasolina o el lubricante.

Subíndices

- s motor solar.
- t motor térmico (más concretamente: d = diesel; g = gasolina).
- f combustible diesel o gasolina.
- l lubricante.

Aplicación numérica

Valores de las variables

A continuación se discutirá el valor probable de las variables de la ecuación (1).

Vida útil prevista del motor

Motor solar. Las empresas comerciales dan 20 años como vida útil del motor solar. En vista de la situación actual de la tecnología, esta cifra parece optimista. En el presente trabajo supondremos una vida útil de 10 años; por consiguiente, tenemos $a_s = 0,1$.

Motor diesel. La vida útil de un motor diesel puede llegar hasta las 20.000 horas de funcionamiento, según sea la potencia, el diseño y especialmente la velocidad de rotación, la velocidad del pistón, el sistema de refrigeración, los materiales usados, la precisión y el proceso de manufactura, y las condiciones de funcionamiento (ciclo de trabajo, nivel de mantenimiento, condiciones climáticas). En el presente trabajo se supondrá una vida útil de 6.000 horas de funcionamiento. Esta cifra parece razonable en lugares aislados en los que está justificado económicamente sustituir el motor antes de que precise reparaciones de importancia. En este caso, la tasa de amortización será $a_t = 0,25$.

Motor de gasolina. Al motor de gasolina se le supondrá una vida útil de 3.000 horas de funcionamiento, lo cual da $a_t = 0,5$.

Mantenimiento y reparaciones

Motor solar. Las empresas comerciales dan a entender a veces que los costos de mantenimiento y reparación de los motores solares son nulos (o insignificantes). La máquina que sea accionada por un motor solar, y el motor propiamente dicho, siempre necesitará cierto mantenimiento y reparación (sustitución de vidrios rotos en los colectores solares, de aislamiento deteriorado, pintura de las estructuras de los colectores, posible pintura de la superficie negra de los absorbentes solares, sustitución del fluido motor, reparación de fugas, problemas de fontanería). No se incluirá el sueldo, en régimen de jornada total o parcial, de la persona que se ocupe del mantenimiento cotidiano porque también se la necesitará en los casos de los motores diesel y de gasolina. Teniendo en cuenta la vida útil prevista, se supondrá que $b_s = 0,02-0,03$ en el caso de los motores térmicos

solares y $b_s = 0,01$ en el caso de las células fotoeléctricas solares.

Motor térmico. Para la relación de mantenimiento y reparación de los motores tanto diesel como de gasolina se tomará $b_d = b_g = 0,20$.

Tasa de interés

Se tomará 8% ($i = 0,08$) para la tasa de interés, aunque en la actualidad la cifra real es superior a este valor.

Consumo de combustible y lubricante

Motor diesel. El consumo de combustible diesel asciende a unos 0,25 kg/kWh y el de lubricante a unos 0,007 kg/kWh.

Para combinar los costos de combustible y de lubricante, se supondrá que el costo de este último es cinco veces mayor que el del combustible. Así pues, el consumo equivalente de combustible es $0,25 + 0,007 \times 5 = 0,285$ kg/kWh. Si el motor funciona 1.500 horas al año, obtenemos q_f (equiv) = $0,285 \times 1.500 = 427,5$ kg/kW para la tasa anual de consumo por unidad de potencia instalada. Como las condiciones de funcionamiento del motor no siempre serán las óptimas, no sería descabellado aumentar esta cifra en un 17% aproximadamente, para obtener un valor redondeado de 500 kg/kW, o sea 0,5 t/kW, para el valor de q_f .

Motor de gasolina. Se supondrá que el consumo equivalente anual de combustible de los motores de gasolina es un 20% superior al de los motores diesel, lo cual arroja un valor de $q_f = 0,6$ t/kW.

Comparaciones

Se comparará un motor solar de 10 kW que funcione 1.500 horas al año con un grupo de dos motores diesel de 5 kW y 1.500 rpm cada uno que funcionen 6.000 horas durante cuatro años. Se comparará además un motor solar de 2 kW con un grupo de dos motores de gasolina de 1 kW cada uno y 3.000 horas de funcionamiento durante dos años.

Teniendo en cuenta las hipótesis anteriormente enunciadas, se puede formular la ecuación siguiente:

Para los motores diesel:

$$(0,10 + 0,03 + 0,04) K_s = \\ = (0,25 + 0,20 + 0,04) K_d + 0,5 c_f$$

ó

$$K_s \approx 3 K_d + 3 c_f \quad (2)$$

y para los motores de gasolina:

$$0,17 K_s = (0,50 + 0,20 + 0,04) K_g + 0,6 c_f$$

ó

$$K_s = 4,35 K_g + 3,53 c_f \quad (3)$$

expresándose los valores de K en unidades monetarias por kilovatio y c_f en las mismas unidades por tonelada de combustible.

Como los impuestos varían de un país a otro, se supondrá que el equipo, su instalación y el combustible consumido están exentos de los mismos.

Es difícil estimar el costo unitario del combustible diesel; depende de muchos factores, como el precio del petróleo crudo, la distancia entre la refinería y el proveedor de petróleo crudo, y el costo de transporte y distribución en el país.

El costo unitario de instalación de un motor diesel del tamaño que se considera puede estimarse, en las condiciones actuales (1976) del mercado internacional, en 150 \$/kW. En las mismas condiciones, el costo unitario de instalación de un motor de gasolina en el intervalo de 1 kW sería de 50-70 \$/kW.

Sustituyendo $K_d = 150$ \$/kW, $K_g = 50$ \$/kW y $c_f = 150$ \$/t en las ecuaciones (2) y (3), se llega al resultado de que el costo de la instalación de un motor solar no debe pasar de 900 \$/kW si se desea que compita con un motor diesel, ni de 834 \$/kW si ha de competir con un motor de gasolina. Es importante señalar que estas cifras representan el costo del motor solar sin acumulación térmica.

El costo actual de los motores solares varía enormemente; los fabricantes han pedido desde 3.000 \$/kW hasta 20.000 \$/kW. El precio depende mucho del tamaño del motor y del número de unidades idénticas fabricadas, según se puede observar en el ejemplo facilitado por un fabricante que se presenta en la figura 27.

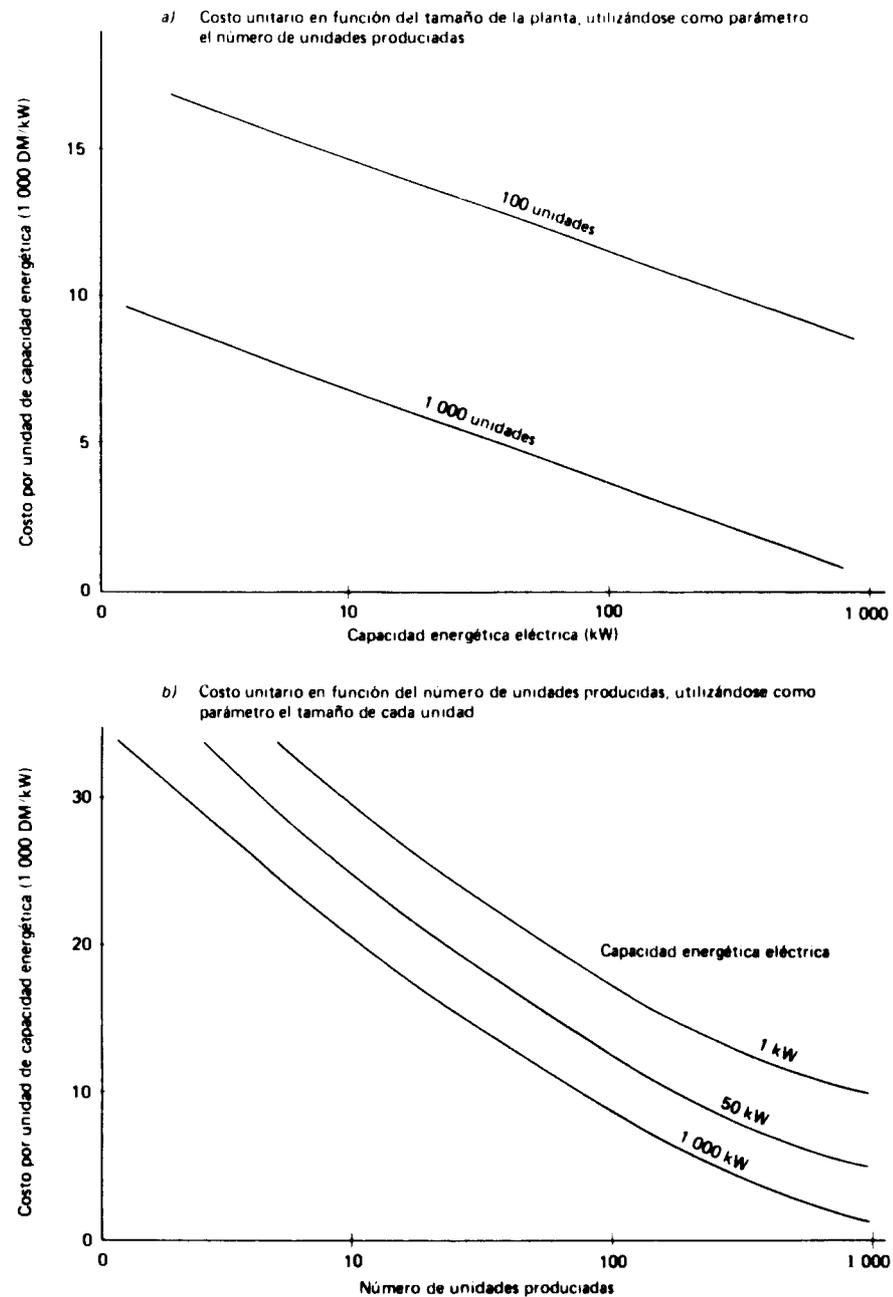


Figura 27. Costo unitario de la instalación de plantas energéticas solares

Comentarios y conclusiones

a) No resulta útil calcular el costo por unidad de energía (kWh, por ejemplo) porque las variables tienen valores muy distintos de un país a otro. Es más útil una ecuación general, como la ecuación (1) expuesta anteriormente;

b) El motor térmico solar en el intervalo de 2 a 10 kW empieza a ser viable desde el punto de vista económico cuando su costo unitario no pasa de 1.000 \$/kW. El costo actual en el mercado es de 3 a 20 veces mayor (1976);

c) Las células solares fotovoltaicas resultarían viables económicamente a 2.000 \$/kW porque los costos de reparación y mantenimiento y de amortización son más bajos. Además, el costo del generador eléctrico no se incluyó en el cálculo de los costos de los motores diesel y de gasolina;

d) No puede aplicarse plenamente el concepto de economía de escala en el caso de los motores térmicos solares, ya que la superficie de colector solar necesaria es aproximadamente proporcional a la potencia del motor. (En una primera aproximación se puede pasar por alto la mayor eficiencia de los motores más potentes). Los colectores solares representan una parte importante del costo total de la instalación. No obstante, el costo por unidad de potencia de otros componentes, el transporte y de la instalación disminuirán mucho al aumentar la potencia;

e) La inversión es mayor en el caso de los motores solares;

f) La instalación del motor solar ocupará de 20 a 50 m² de terreno por kilovatio de capacidad instalada; debe tenerse presente este costo adicional del terreno. En cambio, si se utilizan colectores solares como techos de edificios, disminuirá el costo por unidad de capacidad instalada;

g) Si hubiera algún sistema viable de almacenar la energía solar, el costo por unidad de capacidad instalada aumentaría, pero disminuiría el costo por unidad de energía suministrada;

h) Es difícil obtener una velocidad constante en el eje de un motor solar, a no ser que se instale un sistema de control caro y posiblemente complicado. Para ciertas aplicaciones puede necesitarse una velocidad constante;

i) La máquina que se acople a un motor diesel o de gasolina que produzca la misma energía tendrá la mitad de potencia que la acoplada al motor solar, con lo cual su costo, transporte e instalación serán más baratos y más fáciles.

Refrigeración y climatización mediante energía solar

Los sistemas de refrigeración y climatización mediante energía solar todavía son voluminosos, complicados y demasiado caros, y hasta un 30% de la energía de alimentación debe proceder de una fuente externa. En el caso concreto núm. 3, relativo a un sistema solar de climatización, se determinó que, con un costo de combustible de 480 \$/t que aumentara anualmente el 20%, y una tasa de interés de 9%, se necesitarían 20 años para amortizar una instalación de climatización solar de 10 kW, siendo ese cálculo bastante optimista. Es evidente que se requiere más investigación y desarrollo, sobre todo para conseguir que disminuya la fracción de energía externa necesaria.

III. APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA SOLAR EN PAISES EN DESARROLLO**Evaluación de la experiencia de algunos países en desarrollo***Grecia*

En Grecia, el mayor adelanto en la esfera de la energía solar es la destilación de agua. En este país se encuentran las instalaciones más importantes del mundo, por ejemplo en Nisiros y Fiskardho (véase el cuadro 1).

El diseño básico de los alambiques consiste en una estructura de aluminio con placas de vidrio como paredes y techo (figura 22f). La superficie absorbente negra consta de láminas finas de goma butílica selladas con goma de siliconas. Esa tecnología parece fiable, pero requiere materiales de los que no se dispone con frecuencia en la mayor parte de los países en desarrollo y su costo es relativamente elevado. Estos alambiques solamente se pueden reproducir si se dispone de personal técnico competente.

India

La India tiene un programa ambicioso de investigación y desarrollo técnico en la esfera de la energía solar:

Desalación de agua por energía solar

En Bhavnagar hay una instalación de desalación solar de agua con una capacidad de 0,9 m³/d y se está

construyendo otra de $5 \text{ m}^3/\text{d}$. Los materiales principales son ladrillo, hormigón, vidrio, madera y cinta aislante eléctrica de algodón. También se emplea una pequeña cantidad de aluminio. La superficie absorbente negra es de hormigón pintada con mástique. El costo total estimado de esta instalación asciende a unos 28.000 dólares o sea unos 14 dólares por metro cuadrado de superficie efectiva de evaporación. La tasa media de producción prevista para esta instalación es de unos $2,51 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. La tecnología parece fiable y fácil de transferir a otros países en desarrollo.

Calentadores solares de agua

Una empresa productora de equipo eléctrico está experimentando con colectores solares con miras a producir en serie calentadores solares de agua. Para construir los colectores se propone utilizar las instalaciones existentes de laminación de aluminio.

Calefacción solar de locales

Se ha puesto a punto un sistema de calefacción por aire caliente, pero no se pueden evaluar sus costos mientras no se conozcan los resultados del programa de investigación y desarrollo de colectores solares.

Bombas solares

El Birla Institute of Technology and Science, de Pilani, ya ha construido dos prototipos de una bomba solar sin piezas móviles que en la actualidad están siendo objeto de experimentos. La primera evaluación indica que la bomba de agua es prometedora y que el costo por unidad de potencia del prototipo instalado podría ascender a unos 2.000 \$/kW. Todavía quedan por resolver muchos problemas tecnológicos.

Otros trabajos

Se está empezando a trabajar en las esferas del secado, la climatización y la refrigeración por medios solares y en la transformación de energía solar en energía mecánica. El Laboratorio Nacional de Aeronáutica está preocupándose de molinos de viento que utilizan una tecnología similar a la empleada en países desarrollados. Esta labor se lleva adelante en tres direcciones:

Riego: Perfeccionamiento del modelo actual de varias palas.

Producción de energía eléctrica: Modelo con dos o tres palas y control de aleta, con una potencia nominal de 1-5 kW en vientos de 5 m/s de velocidad.

Bombeo: Molinos de viento que accionan bombas para salinas.

Se está intentando combinar el bombeo de agua con la producción de electricidad. Se espera alcanzar un costo por unidad de potencia de 1.000 \$/kW.

México

El programa más importante de energía solar de México es el de bombeo solar, que se basa en la tecnología de SOFRETES. En San Luis de la Paz, a unos 350 km de la Ciudad de México, funciona una turbina solar de baja temperatura de 25 kW que acciona un generador eléctrico, el cual a su vez suministra energía a una o varias bombas. Sin embargo, el costo todavía es prohibitivo. Ya se han instalado 11 bombas de 1 kW, hay ocho en construcción y se proyecta una bomba solar que sea accionada por un motor rotatorio solar.

Se ha hecho una labor interesante en la construcción de colectores solares a base de un recipiente de cemento de asbesto, aluminio laminado importado para el conducto del agua y la superficie absorbente, vidrios dobles, obturación con goma de siliconas y aislamiento de fibra de vidrio. Hay un colector solar con recipiente de fibra de vidrio en la fase de investigación y desarrollo técnico.

México planea producir bombas solares de baja potencia en grandes lotes para su exportación a otros países en desarrollo. Sin embargo, con el actual motor alternativo de Freón, y dado el elevado costo de los otros componentes del sistema (colectores solares, cambiadores de calor) será muy difícil hacer frente a la competencia de los motores diesel y de gasolina.

Discusión de problemas y soluciones

Entre las aplicaciones de la energía solar que resultan viables para los países en desarrollo en las condiciones actuales se encuentran:

a) Destilación solar de agua del mar y aguas salobres con tasas de producción de agua dulce bajas e intermedias; unos $30 \text{ m}^3/\text{d}$ parecería una cifra razonable;

b) Calentamiento solar de agua para uso doméstico a escala individual o colectiva. Los calentadores solares de agua han resultado competitivos y ya son muy populares en Australia, Chipre, los Estados Unidos y el Japón. La tecnología de esta aplicación es sencilla y puede adaptarse a las condiciones locales;

c) Secado solar. Hasta la fecha este tipo de secado se ha llevado a cabo al aire libre. Actualmente, con un aparato sencillo debe ser posible obtener productos limpios, higiénicos y de mejor calidad. El equipo es sencillo y se puede fabricar sin grandes dificultades. Las instituciones locales deben preparar diseños adecuados para fines de demostración. Los agricultores podrían utilizar estos modelos para fabricar sus propios secadores. Puede contemplarse el uso de secadores solares con una fuente adicional de energía allá donde ésta sea barata y el mantenimiento y las reparaciones no planteen problemas. Pero raramente será una buena solución transformar la energía mecánica o eléctrica en calor para accionar los

ventiladores necesarios. Una buena solución puede ser combinar la energía eólica con el secado solar.

Entre las aplicaciones que todavía no son viables figuran:

a) Motores solares. Ya hay muchos prototipos en el mercado. Algunos de ellos se han ensayado durante años, algunos durante meses y otros empiezan a estar listos ahora para el ensayo. No sería aconsejable que los países en desarrollo utilizaran estos motores solares para fines distintos de los puramente experimentales. Su costo aún es prohibitivo y la tecnología no se ha ensayado todavía a fondo;

b) Producción de electricidad por células fotovoltaicas. Aunque se dice que estas células son fiables, su costo aún es muy elevado y no es aconsejable utilizarlas en países en desarrollo para fines distintos de los puramente experimentales. Aún se está desarrollando la tecnología en esta esfera, y se espera que en un futuro no muy lejano estas células tendrán el mismo éxito que han tenido los transistores. De ser así, los pequeños países en desarrollo podrían contemplar la posibilidad de montar unidades de esta naturaleza, y los países grandes podrían considerar su fabricación parcial o total;

c) Refrigeración solar. Se están poniendo a punto unidades independientes de fuentes externas de energía, pero incluso con capacidades pequeñas de refrigeración son muy grandes y pesadas. En el caso de máquinas de absorción intermitentes o continuas, el equipo solar será un suplemento de las máquinas tradicionales. La tecnología disponible parece viable; sin embargo, debe prepararse un estudio riguroso de viabilidad para determinar en qué medida serían aceptables fuentes externas de energía. La fabricación de hielo suele ser una buena solución porque éste se puede transportar y utilizar para conservar alimentos u otros productos.

BIBLIOGRAFIA

- American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers. *The 1972 handbook of fundamentals*. Nueva York.
- _____. *The 1972 handbook of systems*. Nueva York.
- _____. *The 1972 handbook of applications*. Nueva York.
- _____. *The 1972 handbook of equipment*. Nueva York.
- Organismo Austriaco para la Energía Solar y el Espacio Ultraterrestre. *Small solar power systems*. Agosto de 1976 (FA-3). El Ministerio Federal de Ciencia e Investigación encomendó al Organismo Austriaco para la Energía Solar y el Espacio Ultraterrestre (ASSA) que realizara una encuesta entre todos los países miembros de la AIE sobre las actividades nacionales en materia de pequeños sistemas de energía solar. En ella se incluye la labor que se está realizando en los Estados miembros en materia de investigación y desarrollo relacionados con plantas energéticas solares y sus subsistemas, así como los sistemas de información que abarcan este campo.
- Backus, Ch. E., ed. *Solar cells*. Nueva York, IEEE Press, 1976.
- Brace Research Institute, Macdonald College of McGill University. *A survey of solar agricultural dryers*. Ste. Anne de Bellevue, Quebec, Canadá, diciembre de 1975 (Technical Report T99).
En este informe se describen algunos de los secadores solares agrícolas ya construidos sobre el terreno por experimentadores y usuarios.
- Brinkworth, B. J. *Solar energy for man*. Salisbury Compton Press, 1972.
- Eggers-Lura, A. *Flat plate solar collectors and their application to dwellings*. Low temperature conversion of solar energy. Comisión de las Comunidades Europeas.
En la sección de documentación de este informe se estudia el estado actual de la técnica y después se da un resumen de las actividades de investigación y desarrollo emprendidas hasta la fecha en la esfera solar por los diversos países de la CEE, por otros países europeos y por países fuera de Europa que han aportado importantes contribuciones a la investigación en el campo de la energía solar.
- International Solar Energy Society, U.K. Section. *Solar energy a United Kingdom assessment*. Londres, mayo de 1976.
Análisis de todos los aspectos de los sistemas de energía solar realizado para evaluar las posibilidades de aprovechamiento de la misma y las necesidades en materia de investigación y desarrollo en el Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte y para la exportación.
- Kredder y Kreith. *Solar heating and cooling*. Nueva York, McGraw Hill, 1975.
- Messel, H. y Butler, T. S. eds. *Solar energy a course of lectures*. Oxford, Pergamon, 1975.
- Mustacchi, C. y colaboradoras. *Solar desalination status and potential*. Roma, ASIS, mayo de 1976.
Preparado para la Comisión de las Comunidades Europeas. Entre los objetivos de este estudio figuran: resumen del estado de la técnica en el campo de la desalación solar; elección de prioridades para futuros programas de investigación y desarrollo; e indicación de los posibles beneficios del proceso tecnológico y de la ubicación apropiada para los esfuerzos de investigación.
- Noyes Data Corporation. *Solar energy for heating and cooling of buildings*. Patton, 1975.

Photovoltaic power and its applications in space and on earth. Trabajo preparado para el congreso internacional sobre "El sol al servicio de la humanidad", París, 2-6 de julio de 1973.

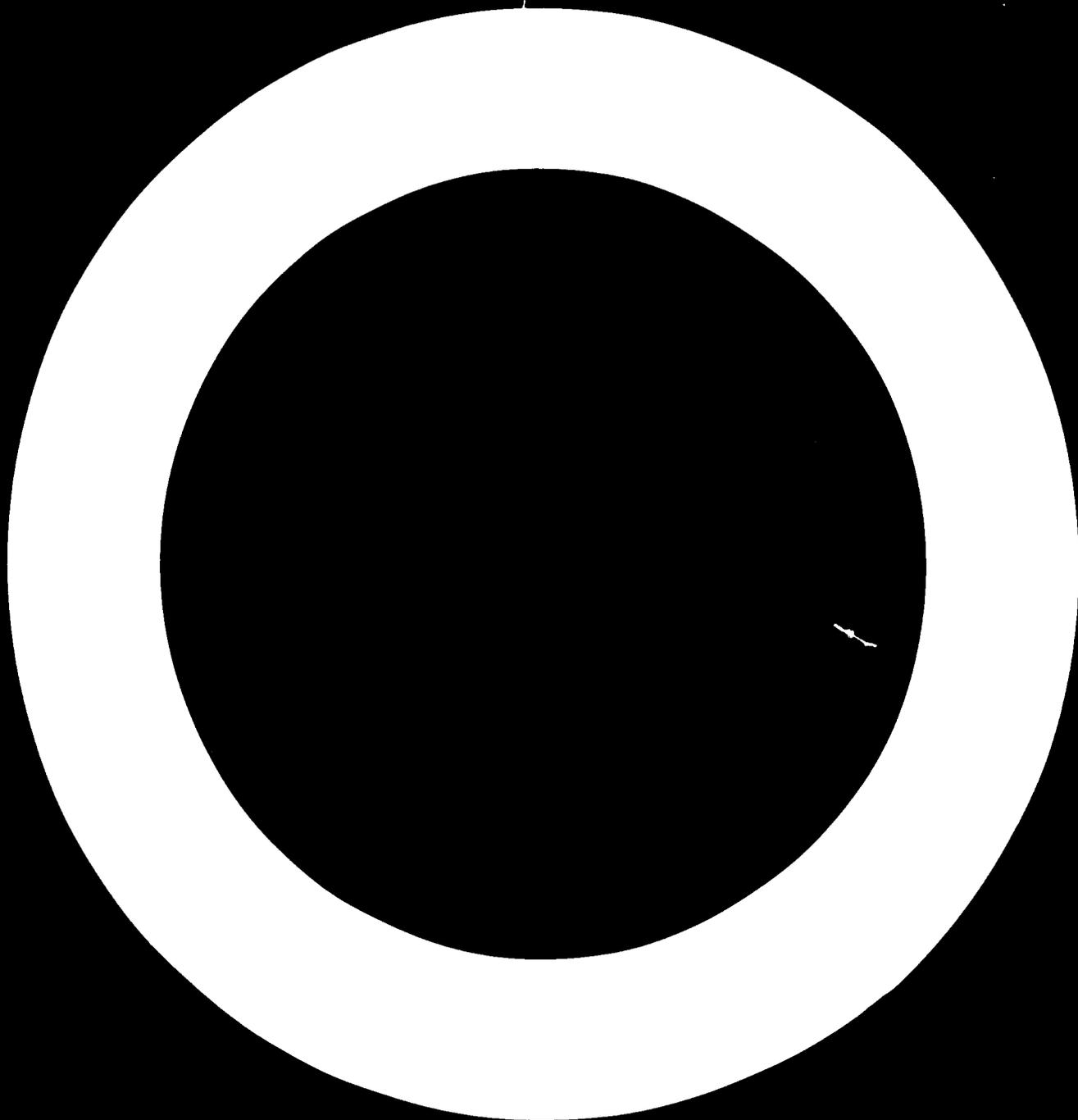
Estados Unidos. Library of Congress, Science Policy Research Division. *Survey of solar energy products and services*, mayo de 1975.

Este estudio se llevó a cabo para obtener información descriptiva sobre equipo relacionado con la energía solar y servicios conexos.

Vaillant, J. R. *Les problèmes du dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres*. París, Eurolles Editeur, 1970.

Segunda parte

**RESUMENES DE PROGRAMAS NACIONALES
E INSTITUCIONALES EN
MATERIA DE ENERGIA SOLAR**



Programas nacionales

Austria

Organismo Austriaco para la Energía Solar y el Espacio Ultraterrestre

El Organismo Austriaco para la Energía Solar y el Espacio Ultraterrestre (ASSA) coordina en Austria las investigaciones sobre la energía solar y las aplicaciones de ésta. Sus principales tareas son:

a) Servir de contacto con organizaciones extranjeras e internacionales que se ocupan de la energía solar;

b) Asesorar al Gobierno de Austria acerca de las investigaciones sobre la energía solar y su tecnología y aplicaciones que sean de interés para Austria, habida cuenta de los progresos que se realicen, a nivel mundial, en esta esfera;

c) Procesar y distribuir información y datos sobre la tecnología solar a la industria y los institutos científicos austriacos; organizar disertaciones y conferencias; capacitar especialistas austriacos en energía solar.

Hasta la fecha, el ASSA ha realizado tres estudios. Uno versa sobre los sistemas de energía solar empleados en los países miembros de la Asociación Internacional de Ciencias Económicas, y de manera especial sobre las centrales solares y sus subsistemas.

En otro, *Kleine Sonnenkraftwerke für Entwicklungsländer* (FA-4) (Pequeñas centrales solares para países en desarrollo), se estudian las pequeñas centrales heliotérmicas existentes de una capacidad máxima de 50 kW y se propone el establecimiento de un prototipo de una capacidad de 10 kW (de colectores planos o de concentración).

En un tercero, *Meteorologische Messdaten für die Nutzung der Sonnenenergie* (FA-5) (Datos meteorológicos para la utilización de la energía solar), se examinan los factores meteorológicos que influyen en la aplicación directa de la energía solar, en vista de la importancia que tienen para la construcción de instalaciones solares.

El ASSA desea promover, en estrecha colaboración con otros países, proyectos de investigación y desarrollo en institutos científicos, universidades, centros de investigación y en la industria. Austria participa en el programa de la Agencia Internacional de la Energía (AIE) y ha iniciado un programa en cooperación con la ONUDI.

Actividades de otras instituciones

En universidades, centros de investigación y establecimientos industriales de Austria se han creado grupos de trabajo que se dedican a actividades de investigación y desarrollo de la energía solar, especialmente en lo referente a sistemas de calefacción y refrigeración solares y producción de energía eléctrica o mecánica.

Calefacción y refrigeración solares

Para promover la utilización de la energía solar en Austria en condiciones económicas, se han establecido en diversos puntos del país, con el apoyo del Ministerio Federal de Ciencia e Investigación, varios proyectos, como casas, piscinas, estaciones para la prueba de colectores, etc. Se están resumiendo y evaluando los factores esenciales para la explotación económica de instalaciones de energía solar, en determinadas condiciones geográficas, meteorológicas y ambientales. En el marco de ese programa se investiga también la posibilidad de combinar las técnicas solares con los sistemas tradicionales. La experiencia que se adquiriera servirá para establecer pautas en orden al equipamiento de instalaciones solares para la producción de agua caliente y la calefacción de viviendas, con los sistemas de control más sencillos que sea posible.

Diseño de casas solares

Uno de los métodos más eficaces de economizar energía consiste en diseñar los edificios de modo que sus necesidades de energía primaria sean mínimas. Desde hace más de cinco años, el Instituto de Construcción de Edificios viene abogando por la adopción, tanto en la construcción de edificios como en el método de diseño, de un concepto basado en una alta economía energética, y ha promovido un método de diseño integral "de peso pesado", que se ha traducido en un rendimiento térmico muy superior, un ahorro de energía y una economía de sistemas de construcción.

Construcción de colectores solares

Empresas austriacas construyen diversos tipos de colectores de placa plana y de concentración, y se han establecido estaciones de prueba especiales para el ensayo comparativo de los mismos.

Sistemas de calefacción solar

En 1976 se inició la construcción de instalaciones solares completas para la calefacción de viviendas y piscinas. Actualmente funcionan unas 100 instalaciones de este tipo. Se ha ideado un sistema especial de control del colector que permite regular el régimen de flujo del fluido de éste, según sea el nivel de temperatura.

Al considerar la aplicación de la calefacción solar en Austria, han de investigarse las siguientes posibilidades:

- Almacenamiento de calor fuera de temporada;
- Combinación de la energía solar y de bombas caloríficas para aumentar la temperatura del agua o el rendimiento de los colectores solares;
- Combinación de la calefacción solar con calentadores auxiliares de tipo tradicional durante los periodos fríos o nublados.

Por razones económicas, el almacenamiento estacional de calor no resulta práctico en Austria por ahora. En cuanto a las otras dos posibilidades, el Instituto de Física Aplicada de la Universidad de Viena llevó a cabo un estudio que tenía por objeto el diseño de una instalación de energía solar para el Instituto de Biología Molecular, de la Academia de Ciencias Austriaca, recién fundado en Salzburgo. Esta instalación servirá como planta de demostración para el empleo de la energía solar en las condiciones climáticas específicas de Salzburgo. Es el primer proyecto de calefacción solar en gran escala que se ejecuta en Austria. Los fines principales de esa planta de demostración son:

- a) Comprobar, a largo plazo, el rendimiento de los colectores solares y su resistencia a la corrosión;
- b) Adquirir experiencia sobre el funcionamiento combinado del colector solar y la bomba calorífica;
- c) Reunir y evaluar abundantes datos que proporcionen una base tecnoeconómica para la ulterior aplicación de la calefacción (y la refrigeración) solar en edificios de Austria.

Sistemas de refrigeración solar

Se están realizando investigaciones sobre la refrigeración de locales con una máquina de absorción y colectores de placa plana. La primera instalación se efectuará en un edificio de apartamentos de España. Se proyecta alcanzar una temperatura de 80°C en el fluido de calefacción y de 30°C en el de refrigeración.

Transformación de la energía solar en energía eléctrica o mecánica

Sistemas fotovoltaicos

Con el fin de evaluar los paneles de células solares, cuatro institutos universitarios realizan

actualmente estudios teóricos, y un laboratorio estatal de ensayos está llevando a cabo un amplio programa de experimentos sobre el terreno.

El Instituto de Física de la Universidad de Viena, que participa de cerca en estas actividades, está planificando una investigación sobre preparación y propiedades de células solares destinadas a utilizarse en la tierra. Se piensa que los materiales que más prometen, a estos efectos, son el CdS y el Si policristalino.

El Instituto de Físicoquímica de la Universidad de Viena estudia la caracterización material de los semiconductores.

En el Instituto de Física Aplicada de la Universidad Técnica de Viena se realizan investigaciones, desde 1965, sobre la fotoconductividad de los cristales simples de CdS y el aumento de su sensibilidad por adulteración con Te. En 1972, las investigaciones se extendieron al estudio de películas finas de CdS. Los trabajos se concluyeron en 1974 con una monografía sobre técnicas de evaporación y fotoconductividad de dichas películas. Se proyecta llevar a cabo investigaciones sobre células fotovoltaicas.

Un equipo de investigadores del Instituto de Física del Estado Sólido, de la Universidad de Linz, se ha venido ocupando desde hace varios años en la investigación y preparación de detectores de rayos infrarrojos. Los investigadores poseen experiencia en la preparación de dispositivos de película delgada mediante técnicas de crecimiento epitaxial y de implantación iónica. Estas investigaciones podrían trasladarse al campo de las células solares.

En Viena, el Instituto Federal de Ensayos e Investigaciones ha instalado cuatro paneles de células solares en un emplazamiento de experimentación situado en la parte oriental de Austria. Los paneles, compuestos de células solares de Si, serán probados durante dos años. Cada uno de ellos tiene una capacidad máxima de 1,6 W. El programa de ensayos comprende el registro de la capacidad eléctrica en función de la radiación solar, las condiciones atmosféricas, etc.

Sistemas termoelectrónicos solares (incluidos los colectores)

Sistemas para la transformación de la energía solar en energía térmica. En los últimos años, universidades, instituciones de investigación e industrias han cooperado estrechamente en la construcción de colectores solares. Se está investigando la posibilidad de obtener mayores índices de concentración en los colectores planos cambiando la estructura superficial o empleando revestimientos selectivos. Parece posible que puedan alcanzarse temperaturas de agua comprendidas entre 300° y 400°C. Este tipo de colectores puede servir para centrales termoelectrónicas pequeñas. Entre las instituciones colaboradoras, se cuentan: en Viena, el Instituto de Física General, de la Universidad

Técnica, el Instituto de Físicoquímica, de la Universidad de Viena, y el Instituto Federal de Experimentación e Investigación; y en Graz, el Instituto de Energía Térmica e Ingeniería Nuclear, de la Universidad Técnica, y el Centro de Investigaciones, del Instituto de Investigaciones sobre el Medio Ambiente.

Centrales solares. El Instituto Internacional de Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA), que funciona en Laxenburg, cerca de Viena, está evaluando centrales heliotérmicas de grandes dimensiones del tipo torre de energía.

El Instituto de Energía Térmica e Ingeniería Nuclear de la Universidad Técnica de Graz ha concebido sistemas de almacenamiento de energía térmica (almacenamiento de vapor mediante agua caliente a presión) para el almacenamiento de energía en las centrales. El sistema propuesto se adapta muy bien a efectos de equilibrar la carga en las centrales solares. Según las dimensiones y la presión de trabajo, se emplearán recipientes a presión de acero soldado o de hierro fundido pretensado.

Dinamarca

Alrededor del 50% de toda la energía que se consume en Dinamarca se destina al calentamiento del agua y el espacio domésticos. Por ello, los trabajos de investigación y desarrollo en materia solar están orientados hacia esos fines.

En 1975 se terminó de construir la vivienda de "energía nula", una casa para una sola familia con una superficie de piso de 125 m². La casa está calentada por la energía solar, por el calor residual de las instalaciones eléctricas (lámparas, refrigerador, lavadora, etc.) y por el calor del cuerpo de quienes la habitan. La casa de "energía nula" tiene un colector solar vertical de 42 m² de superficie y un tanque de almacenamiento de agua con una capacidad de 30 m³. Este tipo de casa es caro, pero es una prueba concluyente de que, incluso a altas latitudes, como la de Dinamarca (56°), es posible calentar una vivienda utilizando exclusivamente energía solar, siempre que la casa esté bien aislada.

En 1976 apareció un nuevo reglamento de la construcción, por el que se exigía un mejor aislamiento de los edificios nuevos. Nada más que con un aislamiento adecuado, las necesidades anuales de energía de una vivienda de una sola planta para una sola familia pueden reducirse de unos 25.000 kWh a 10.000 kWh.

Los trabajos ulteriores se han orientado, de manera especial, hacia el calentamiento de locales y del agua mediante una combinación de energía solar y bombas caloríficas. En 1977 se construyó una casa solar en Skive, al norte de Dinamarca. Las necesidades totales de calor de esa vivienda se satisfacen mediante

un colector solar de 28 m² de superficie, combinado con dos bombas caloríficas que recuperan el calor del aire rarificado y del agua residual de la casa.

Por último, se realizan importantes trabajos de investigación y desarrollo en la esfera de la refrigeración solar mediante una planta de absorción de sólidos. El estudio preliminar se refiere a una planta que produce hielo a razón de 500 kg/d.

En Dinamarca hay muchas casas calentadas con energía solar, y tres o cuatro empresas que producen colectores solares de placa plana para el calentamiento de locales y del agua.

Francia

Desde la aparición de la crisis energética, a comienzos de la década de 1970, el Gobierno de Francia ha mostrado vivo interés por las nuevas fuentes de energía, habiéndose creado un ministerio especial, "La délégation aux énergies nouvelles", encargado de coordinar los programas de investigación y desarrollo así como los industriales. Unos 300 investigadores de diversos laboratorios nacionales se ocupan en trabajos de investigación fundamental, en busca de posibles aplicaciones de la energía solar (procesos biológicos, químicos y físicos). La aplicación industrial de esos progresos varía mucho, según que se trate de países desarrollados o de países en desarrollo, desde el punto de vista de los objetivos y las necesidades de los países.

La industria francesa ha desarrollado calentadores solares de agua para fines domésticos e industriales, así como para el calentamiento de viviendas. Se han construido unas 50 casas experimentales que utilizan colectores de placa plana (de 20 m² de superficie). En la industria, la superficie total de los colectores instalados asciende a unos 15.000 m².

El Gobierno espera poder reducir el consumo total de energía en un 5% antes de 1980. La industria francesa está estudiando la posibilidad de transformar la energía solar en electricidad mediante un proceso térmico a altas temperaturas, dentro de un programa que realizarán conjuntamente los laboratorios nacionales y participantes de otros países. En Odeillo funciona ya un convertidor que emplea el sistema de concentración y que suministra, día y noche, energía eléctrica a razón de 60 kW. La temperatura de trabajo es de unos 350°C.

Para atender las necesidades de los países en desarrollo, la industria francesa ha emprendido un programa que abarca las siguientes esferas:

- Bombas de riego dotadas de pequeños colectores;
- Suministro de electricidad;
- Refrigeración (de alimentos);
- Desalación;
- Refrigeración por aire.

Para mayor facilidad de transferencia de tecnología, se ha elegido la tecnología del colector de placa plana con conversión de ciclo a baja temperatura. Unos 50 prototipos de bombas solares de 1 kW funcionan en el mundo entero. El colector tiene una superficie de unos 50 m² y su rendimiento global es de aproximadamente un 2%. Se espera poder aumentar el rendimiento, pero teniendo presente el mismo objetivo principal, es decir, la posibilidad de transferir tecnología.

India

El interés por la utilización de la energía solar se reavivó en 1973 como secuela de la crisis energética. Ese año, el Comité Nacional para la Ciencia y la Tecnología designó una comisión encargada de preparar un informe sobre el estado de los trabajos en materia de energía solar y de recomendar al Gobierno medidas oportunas. La comisión hizo público en 1974 un informe muy completo titulado *Solar energy - hope and challenge* (La energía solar: una esperanza y un desafío). En ese informe se hacía una evaluación crítica de la tecnología disponible en el país y de la situación mundial en esa materia. Asimismo, se examinaba la cuestión del consumo de energía de diversos sectores de la sociedad y se identificaban los programas de investigación y desarrollo que urgía emprender. A base de esas recomendaciones, el país desarrolla programas de energía solar, habiéndose otorgado la máxima prioridad al desarrollo de colectores.

El panorama energético indio se caracteriza por un bajo consumo por habitante (unos 100 kWh por día) y, por ende, por un bajo producto interno bruto por habitante. La India es un país fundamentalmente agrícola (el 70% de su población vive en las zonas rurales). Hay no menos de 350.000 aldeas que no reúnen 500 habitantes. Por su bajo factor de utilización y por la distancia a que se encuentran el cinturón industrial, resulta sumamente antieconómico electrificar dichas aldeas. Es igualmente difícil abastecerlas de combustibles fósiles. Por consiguiente, es preciso encontrar fuentes de energía locales. Así, todo programa de energía solar deberá prestar una atención prioritaria a la satisfacción de las necesidades energéticas del sector rural.

La India posee un amplio y bien coordinado programa de investigación y desarrollo de la energía solar, en el que se fijan plazos para el logro de determinadas metas. El Comité de Investigaciones Energéticas, organismo encargado de vigilar ese programa, se compone de Secretarios de Estado y está presidido por el Ministro de Energía del país.

El Gobierno se ha entregado de lleno a la tarea de desarrollar las aplicaciones de la energía solar. Destina grandes sumas a los trabajos de investigación y

desarrollo, y permite que todos los gastos ocasionados por las aplicaciones industriales de la energía solar sean tratados como gastos de investigación y, por consiguiente, se deduzcan de los impuestos. Entre las organizaciones que participan activamente en la utilización de la energía solar, o que financian trabajos de investigación y desarrollo, figuran Tata Energy Research Institute, Kirloskar's, Jyoti Ltd., Metal Box y Khatau.

Se realizan trabajos de investigación y desarrollo sobre los tres métodos de utilización de la energía solar: a) dispositivos térmicos de pequeño poder calorífico, b) transformación directa de la energía y c) transformación biológica. Para cada una de esas esferas, se ha designado un coordinador encargado de vigilar los proyectos y tomar las disposiciones necesarias para la fabricación de esos dispositivos. Además, en el Departamento de Meteorología de la India se hacen amplios preparativos para establecer una red de estaciones de radiación con el fin de recoger datos sobre la energía solar en el mayor número posible de puntos del país. Hasta la fecha, se han creado unas 36 de esas estaciones, de las cuales 13 son estaciones principales que miden la radiación total, difusa y de haz normal y las horas de sol. Otras estaciones miden la radiación total y las horas de sol. El instrumental necesario para esas mediciones (piranógrafos, pirheliómetros y registradores de luz solar) se fabrica en la India.

Desarrollo de colectores

Se están investigando varios revestimientos selectivos. Se han alcanzado temperaturas de remanso de hasta 180°C. La Universidad Agrícola del Punjab está desarrollando colectores Winston, modificados, de baja concentración. Se ha obtenido vapor a presiones de hasta 5 atm. En los Radio Telescope Laboratories, en Ootacmund, se están desarrollando colectores de alta concentración y elevada temperatura. Bharat Heavy Electricals Ltd. (BHEL) tiene a su cargo la fabricación de esos colectores, así como la coordinación del programa.

Bombas solares

Las bombas solares han sido objeto de especial atención. El Laboratorio Nacional de Física (NPL) ha desarrollado un motor orgánico de ciclo Rankine que emplea expansores espirales. Desde mediados de 1976, se han venido utilizando prototipos de la bomba ABHIMANYU de 1 kW. El Centro de Estudios del Medio Ambiente de Auroville está desarrollando motores orgánicos de ciclo Rankine análogos a las bombas SOFRETES. El Instituto de Ciencia y Tecnología de Birla ha desarrollado una bomba de vapor de contacto directo y baja temperatura para riego de alta impulsión. Se han terminado varios

estudios de viabilidad y de análisis de costos para bombas de una elevación de hasta 30 m y una capacidad de 10^5 l/d. El Instituto Central de Investigaciones de Ingeniería Mecánica ha desarrollado también bombas similares. En el Central Salt and Marine Chemicals Research Institute (CSMCRI), se están desarrollando motores de aire caliente, de 200 W y temperatura media, basados en el ciclo de Stirling. Una empresa privada, Metal Box Ltd., ha concertado un acuerdo para la fabricación de bombas Fluidyne desarrolladas en Harwell. Jyoti Ltd. está desarrollando bombas de 1 kW que utilizan concentradores cilindroparabólicos estacionarios y ciclos de vapor Rankine.

Desecado solar

El Instituto de Investigación de la Zona Árida Central de Jodhpur, el RRL de Jammu y el Instituto Indio de Tecnología (IIT) de Kharagpur han desarrollado secadores tipo armario. En 1976, una gran parte de la cosecha de albaricoque de Cachemira se secó en armarios desarrollados en el RRL. La Universidad de Annamalai ha construido un prototipo de secador de arroz con cáscara, con una capacidad de 1 t/d, que viene funcionando desde hace más de un año. También la Corporación Nacional de Desarrollo Industrial ha fabricado un secador de arroz, de igual capacidad, que está siendo probado. El Instituto de Investigaciones Forestales ha emprendido un proyecto piloto que tiene por objeto establecer cuatro hornos de desecado de madera en otras tantas partes del país. Amul Ltd. ha emprendido el proyecto de fabricar leche en polvo utilizando la energía solar.

Desalación

El CSMCRI (Bhavnagar) trabaja activamente en la esfera de la desalación. Ha proporcionado instalaciones para agua potable a varios faros, así como instalaciones de agua destilada a muchos laboratorios de investigación y desarrollo e instituciones docentes. Asimismo, va a proporcionar instalaciones potabilizadoras a dos aldeas de Gujarat. El laboratorio ha construido también un alambique solar con capacidad para 10^3 l/d. Basándose en una técnica de humidificación-deshumidificación, el laboratorio ha instalado una planta piloto con una capacidad de 2×10^3 l/d.

Central solar

En Madrás, el Gobierno de la India y el Gobierno de la República Federal de Alemania están estableciendo, en régimen de empresa mixta, una central solar de 10 kW. Los organismos de ejecución son, por un lado, BHEL, NPL e IIT (Madrás), y, por otro, MBB. Esta central solar contará con una serie de

colectores de placa plana y un motor orgánico de ciclo Rankine, con tornillo de expansión Linde. Asimismo, se están realizando estudios de viabilidad en torno a otra central, también de 10 kW, que utilizará mecanismos espirales de expansión.

Calentador solar de agua

Varios laboratorios han desarrollado calentadores solares de agua que ya están a la venta en el país. Algunas otras empresas comerciales han empezado a trabajar en este campo. El calentamiento de agua con energía solar para fines industriales es también objeto de estudio en dos o tres empresas industriales.

Sistemas de calefacción y refrigeración de locales

En 1975, BHEL emprendió, con la colaboración técnica del NPL, un importante proyecto destinado a dotar de calefacción a un ala de su fábrica de Harwar. El sistema empleado tiene una superficie de colector de 200 m^2 y almacena 10^4 litros de agua, a 60°C , durante el día. Este agua caliente se hace pasar a través de unidades ventilador-serpentin para proporcionar calefacción a los trabajadores de la fábrica.

IIT (Madrás) ha desarrollado un sistema de refrigeración que se viene ensayando desde hace meses. El NPL ha proporcionado calefacción a un local del edificio y está instalando un sistema combinado de calefacción y refrigeración. El ciclo de refrigeración, basado en el principio de refrigeración por absorción de vapor, funcionará durante el verano. IIT (Madrás) y BHEL han desarrollado acondicionadores de aire de 1 t, basados en el ciclo de absorción de agua y amoníaco.

Transformación directa de la energía

Se ha instituido un programa bien coordinado de investigación y desarrollo relativo a diversos aspectos de la transformación directa de la energía. Se han ensayado varias opciones. El Laboratorio de Física del Estado Sólido está fabricando pilas solares de un monocristal de silicio de la calidad empleada en los programas espaciales. El rendimiento de estas pilas es de aproximadamente un 10%. El Instituto Central de Investigaciones Electrónico-Mecánicas de Pilani está estudiando la posibilidad de emplear concentraciones altas con el fin de reducir el costo de las pilas solares. El Laboratorio Aeronáutico Nacional estudia las posibilidades de producir bandas monocristalinas de silicio. IIT (Kampur) y NPL están explorando la posibilidad de fabricar pilas solares de Si con películas policristalinas. IIT (Delhi) y NPL están desarrollando pilas solares de CdS-Cu₂S. La empresa Central Electronics Ltd., del Gobierno de la India, coordina los programas de transformación directa.

Transformación biológica

Es relativamente escasa la atención que se presta a la transformación biológica. Los sistemas de biogás adquieren cada vez mayor aceptación en el país. La energía solar se utiliza para calentar el fango orgánico con miras a aumentar el rendimiento de la transformación en biogás. Además, ha habido algunos intentos de transformar los desechos agrícolas en metano, etanol, etc.

Italia

Colectores de placa plana

Pasan de 20 los fabricantes que han lanzado al mercado colectores estándar de placa plana, en su mayor parte de 2 m x 1 m, de una sola capa de vidrio o de una capa doble y con camisa de acero galvanizado, vitrofibra o acero pintado. Los precios comerciales giran alrededor de los 100 dólares/m²; y las instalaciones de agua caliente para casas o apartamentos para una sola familia varían entre 600 y 800 dólares, componiéndose de un colector de 4 m² de superficie, un depósito de 100 litros, tuberías, aislamiento y dispositivos de control. Los fabricantes han tenido poco éxito en el mercado.

Los trabajos de investigación sobre colectores, iniciados en 1958, se llevan a cabo en cinco universidades y en seis empresas manufactureras privadas. Esos trabajos se refieren, entre otras cosas, a sustancias obturadoras, tratamiento de superficies y empleo de panales de plástico para aumentar el rendimiento. Son escasos los fondos que se han destinado para esos trabajos.

Unidades solares de bombeo

En el decenio de 1940, la Universidad de Milán llevó a cabo trabajos de investigación sobre un motor solar que empleaba anhídrido sulfuroso como fluido activo. Ese motor, acoplado a una bomba, ha sido fabricado en pequeñas series por una empresa privada e instalado en varios países tropicales.

Centrales solares

La primera caldera solar, que funcionaba a alta temperatura y presión elevada, fue construida en 1961. Con concentradores cónicos y seguimiento manual, esta instalación podía producir vapor a razón de 7 kg/h, a una presión de 100 barías y una temperatura de 500°C.

En 1963, se construyó una segunda caldera solar, que suministraba 38 kg/h a 100 barías y 450°C con

un rendimiento de 0.6. Dicha instalación fue montada más tarde, en 1964, en Marsella. En 1965, con apoyo del Consejo Italiano de Investigaciones, se contruyó una tercera caldera solar (150 barías, 500°C), dotada de 121 espejos cónicos que giraban merced a un mecanismo apropiado, la cual producía vapor a una tasa media de 40 kg/h desde las 11 hasta las 15 horas.

Entre 1966 y 1977, se desarrolló un nuevo mecanismo, con 271 espejos planos de 80 cm de diámetro (205 m² de superficie total), gracias al cual se producía vapor a razón de 130 kg/h a 150 barías y 600°C, con un rendimiento de 0.73 y una insolación de 800 W/m². En las pruebas llevadas a cabo a 800°C, el rendimiento que dio fue también bueno.

Desalación

Las Universidades de Cagliari, Bari y Roma realizan algunos trabajos sobre desalación. Durante los últimos 20 años, se han estudiado los alambiques solares, construyéndose varias instalaciones piloto (en su mayor parte por la Universidad de Nebbia, Bari, con apoyo financiero del Consejo Italiano de Investigaciones), las cuales han venido funcionando satisfactoriamente. En la Universidad de Roma se efectúan estudios de viabilidad y estimaciones técnicas en torno al colector plano ya terminado y a las unidades escalonadas de vaporización.

Pilas de silicio

En dos universidades se realizan trabajos de carácter muy restringido sobre los daños causados a este tipo de pilas por las radiaciones.

República Federal de Alemania

El programa de investigación y desarrollo de la República Federal de Alemania para la utilización de la energía solar se inició, como parte del programa de investigación y desarrollo no nucleares, a comienzos de 1974, inmediatamente después de la crisis del petróleo. Hasta entonces, la energía solar no se había considerado interesante, en razón de la alta latitud del país que tiene una insolación media de tan sólo 110 W/m² y una media anual de sol de 1.300 a 2.000 horas, según la región de que se trate. Sin embargo, los estudios y ensayos realizados con casos experimentales en los últimos años han demostrado que la utilización de la energía solar es interesante incluso para países situados en el centro de Europa.

Por el momento, las actividades se concentran, principalmente, en las posibilidades de proporcionar agua caliente o calefacción a los edificios, y no en la generación de electricidad, a causa de la estructura del consumo energético del país. Alrededor del 40% de la

energía final consumida en la República Federal de Alemania se destina al calentamiento de locales y del agua, un 36% al proceso de generación de calor para usos industriales y tan sólo un 24% a la generación de luz y fuerza motriz. Así, el sector de la calefacción es el que merece mayor atención desde el punto de vista de asegurar el abastecimiento de energía a largo plazo. Por concepto de trabajos de investigación y desarrollo relacionados con la energía solar se gastaron 6.2 millones de marcos en 1974, 15.9 millones en 1975 y 27 millones en 1976.

A base de la experiencia adquirida desde 1974, se ha iniciado un nuevo programa de investigación en la esfera de la energía solar (1977-1980), con un presupuesto de unos 150 millones de marcos. A continuación se reseñan los objetivos principales del programa.

Aplicaciones térmicas

En la República Federal de Alemania, ya están en venta en el comercio sistemas que producen agua caliente utilizando la radiación solar. Sin embargo, es preciso perfeccionar los elementos principales, como el colector y el depósito de almacenamiento del agua caliente, a fin de que esos sistemas puedan competir con los de petróleo, gas o carbón. Además, han de evaluarse aún los aspectos del comportamiento y mantenimiento de los sistemas de calentamiento solares. Por consiguiente, las actividades más importantes del programa de investigación y desarrollo del Ministerio de Investigación y Tecnología son las siguientes:

- Medición de datos para evaluar el rendimiento de los sistemas de abastecimiento de agua caliente;
- Ensayos a corto y largo plazo;
- Normalización de componentes y sistemas;
- Desarrollo de nuevos absorbentes, y minimización de las pérdidas de los colectores.

En varias viviendas de demostración se están ensayando diversos sistemas solares para la calefacción de edificios. El objetivo principal que se persigue es la mejora de la economía de los sistemas ya existentes, de modo que las casas puedan ponerse a la venta dentro de un plazo de 10 años. Los trabajos se concentran, primordialmente, en:

- Perfeccionamiento técnico de los colectores y los tanques de almacenamiento, a fin de facilitar la producción en serie;
- Ampliación de los conocimientos sobre el comportamiento de los sistemas;
- Aumento del número de arquitectos, ingenieros y trabajadores calificados dotados de conocimientos adecuados en esta materia.

Además de estos trabajos, se recogerán datos sobre las condiciones meteorológicas, los tipos de edificios que puedan ser equipados con sistemas

solares, los efectos sobre el medio ambiente y las prácticas de construcción.

El calor para usos industriales es otra esfera de interés para la aplicación de la energía solar. Por lo que respecta a la República Federal de Alemania, son importantes los intervalos inferiores a 200°C y de alrededor de 2.000°C. Actualmente, los trabajos de investigación y desarrollo se orientan principalmente hacia temperaturas inferiores a los 200°C para los procesos de desecado, destilación, refrigeración, petroquímica o evaporación.

Aplicaciones eléctricas

En la esfera de las aplicaciones eléctricas, los trabajos se concentran, por el momento, en los sistemas de ciclo térmico cerrado. En estos sistemas pueden emplearse los colectores que se han construido para el suministro de calor. Ya existen turbinas y máquinas de expansión que funcionan con freón. Las posibilidades de generar energía por medio de fotocélulas son escasas, en razón del alto costo y el bajo rendimiento de las células solares y de la enorme superficie que se requeriría para ello en Europa central. Sin embargo, a la larga, pudiera ser posible utilizar este método en las regiones soleadas del mundo.

La generación de electricidad con ayuda de la energía solar por medios termodinámicos o por medios fotovoltaicos es una de las posibilidades más prometedoras a efectos de suministrar energía a las zonas rurales de los países en desarrollo. Las actividades de investigación y desarrollo están orientadas primordialmente hacia ese fin, es decir, el desarrollo de sistemas que funcionen bien en la gama de 10 kW y sean fáciles de mantener, y la fabricación de sistemas menos caros.

Existen planes para la construcción de centrales solares de 500 kW dentro del marco de las Comunidades Europeas (tipo torre) y de la AIE.

El aprovechamiento de la energía eólica presenta en teoría grandes posibilidades en el área abarcada por la República Federal de Alemania (la energía media de los vientos es de unos 200×10^9 kW), si bien, a fines prácticos, esa energía no puede utilizarse sino a escala muy limitada. Por un lado, es preciso aplicar nuevos tipos de esfuerzo técnico; por otro, se plantea el problema del almacenamiento de la energía, lo mismo que ocurre de manera inevitable cuando se utiliza la energía solar en gran escala. Esas limitaciones hacen imposible el empleo generalizado de la energía eólica en la República Federal de Alemania, lo que significa que esa energía sólo podría utilizarse para fines especiales, o en lugares donde las condiciones locales fuesen particularmente propicias. Las actividades de investigación y desarrollo se concentran hoy, primordialmente, en el diseño de una instalación de molino de viento de 1.3 MW, que empezará a construirse en 1979, y otra para un molino de eje vertical de 10 kW.

La energía generada por el movimiento de las olas se ha utilizado, durante muchos años, para suministrar electricidad a balizas y faros. Sin embargo, la capacidad de las instalaciones generadoras de esa energía es reducida, normalmente inferior a los 100 W. Se explotan cuando resultaría difícil y costoso emplear otra forma de electricidad, lo que significa que incluso los altos costos de generación de esa energía aún pueden ser aceptables. El paso de las pequeñas instalaciones a las instalaciones industriales entraña varios problemas. Hasta la fecha, no se ha construido ninguna instalación de grandes dimensiones. Los análisis efectuados han revelado invariablemente que esas instalaciones no podrían competir con otras plantas generadoras de energía. Se ha estimado que, en lo relativo a la República Federal de Alemania, la energía de las olas oceánicas en todo el litoral del Mar del Norte es modesta: 3.600 MW. Es incuestionable que sólo podría utilizarse para fines prácticos una pequeña proporción de esa capacidad. A este respecto, la situación de los países con un litoral más largo, como Irlanda o el Reino Unido, es sin duda más prometedora. Dada la escasa energía que podría obtenerse en este sector, las actividades correspondientes de investigación y desarrollo son mínimas en la República Federal de Alemania.

Aplicaciones biológicas y químicas

Otro campo que ofrece grandes posibilidades es el de las aplicaciones biológicas y químicas de la

energía solar. Como resultado de procesos biológicos naturales, una gran cantidad de energía solar se transforma en energía químicamente combinada y queda almacenada. Esa energía puede liberarse de nuevo con la ayuda de procesos térmicos de fermentación. Sin embargo, el rendimiento de esos sistemas es muy bajo. Las posibilidades técnicas y económicas de utilización son tan escasas en la República Federal de Alemania, que los proyectos de investigación y de desarrollo correspondientes se promueven sólo a escala muy modesta. Los trabajos de investigación y desarrollo actualmente en curso giran en torno a la investigación de los procesos biológicos que tienen lugar en la fotosíntesis y la fotólisis.

Cooperación internacional en materia de investigación y desarrollo

El nuevo programa de investigación y desarrollo de la energía solar se lleva a cabo, en parte, en cooperación con otros países. Los principales participantes en esa cooperación multilateral son la Comunidad Europea, la AIE y la UNESCO. Además, se han firmado numerosos acuerdos bilaterales sobre utilización de la energía solar, así como acuerdos sobre transferencia de tecnología con países en desarrollo, como el relativo a la construcción y explotación de una planta generadora de electricidad, de una capacidad de 10 kW, en Egipto y otra parecida en la India.

Programas institucionales

Arabia Saudita: Colegio de Ingeniería, Universidad de Riyadh

De 1969 a 1973 se construyeron y probaron en el Colegio de Ingeniería de la Universidad de Riyadh varios calentadores de agua y alambiques solares. Desde 1973 se vienen realizando trabajos en los siguientes campos: estimaciones de la radiación, alambiques de hormigón de una sola pendiente, refrigeración nocturna, casas solares y sus perspectivas, supresión de la convección y estructuras alveolares, efecto de la luz ultravioleta sobre la piel, almacenamiento con pilas térmicas y otros tipos de almacenamiento, colectores de placa plana y sus condiciones ambientales, y calentadores de aire.

Austria: Instituto de Investigaciones sobre el Medio Ambiente

Desde 1974, un equipo de expertos viene estudiando las posibilidades de utilizar la energía solar en Austria. El Instituto de Investigaciones sobre el Medio Ambiente, en Graz, desarrolló un colector solar que actualmente se fabrica a escala comercial en Austria.

En 1976 se instaló un colector solar, de 600 m² de superficie, para calentar una piscina en el pueblo de Eggersdorf. Los criterios en que se basó el diseño fueron la obtención de una temperatura de agua de 24°C entre los meses de mayo y septiembre. Entre los demás proyectos que entrañaban el uso de la energía solar, figuraban la reducción de los costos de calefacción de invernaderos y secaderos de productos agrícolas (tabaco) y de los de refrigeración (aire acondicionado). Actualmente se está diseñando una casa solar austriaca.

Se ha firmado un contrato que prevé la colaboración, en el campo de la energía solar, con la Universidad de Dharhan (Arabia Saudita).

Canadá: Instituto de Investigaciones Brace

Las actividades que despliega el Instituto Brace de Quebec están consagradas, primordialmente, a los problemas de las zonas rurales de los países en

desarrollo. El Instituto se ocupa activamente en el desarrollo y aplicación de instalaciones de destilación, secaderos agrícolas y cocinas solares.

El Instituto tiene cierto número de proyectos cooperativos en las esferas del desarrollo, fabricación, instalación y prueba de alambiques, secaderos y cocinas solares en diversos países en desarrollo. Además, ha ayudado a instituciones de países en desarrollo en la formulación de programas de energía solar.

Egipto: Centro de Desarrollo Industrial para los Estados Arabes

El Centro de Desarrollo Industrial para los Estados Arabes (IDCAS), con sede en El Cairo, está afiliado a la Liga Árabe. Los 21 Estados árabes son miembros de la Junta directiva. Una de las principales actividades del IDCAS consiste en impulsar la cooperación entre los países árabes en las distintas ramas de la industria.

Como primer paso hacia la obtención de la información necesaria sobre las medidas que han de tomar los países árabes en orden a una utilización económica de la energía solar, el IDCAS ha celebrado dos reuniones sobre la aplicación de esa energía en dichos países. El IDCAS está dispuesto a cooperar con cualquier organización interesada en la energía solar, así como a preparar estudios lo más completos posible sobre las posibilidades de utilizar la energía solar en los países árabes.

Estados Unidos: Laboratorio de Energía Solar y de Conversión de Energía, de la Universidad de Florida

A lo largo de los años, este laboratorio ha venido midiendo la cantidad y características de la energía solar disponible, y ha preparado cuadros de datos para fines de diseño. Las propiedades solares del material se miden en un calorímetro solar, concebido por el laboratorio, que es el único instrumento de su género descrito en la Guía de la American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning (Sociedad Norteamericana de Calefacción, Refrigeración y Aire

Acondicionado), que es el principal libro de consulta en la materia.

El laboratorio ha desarrollado colectores para el calentamiento de agua, calefacción y refrigeración de locales, calefacción de piscinas, purificación del agua y la reutilización de líquidos de desecho. Entre sus otros trabajos figura la transformación de la energía solar a los fines de preparar alimentos en cocinas y hornos solares. Asimismo, el laboratorio ha desarrollado dos automóviles y dos autobuses helioeléctricos y una casa en la que más del 90% de la energía utilizada es de origen solar.

**India: Laboratorio Nacional de Física,
Nueva Delhi**

El Laboratorio Nacional de Física inició sus trabajos en la esfera de la energía solar a comienzos de la década de 1950, prosiguiéndolos hasta 1958, aproximadamente. Durante ese periodo el Laboratorio desarrolló calentadores de agua, cocinas y alambiques solares. Se construyeron e instalaron algunos calentadores de agua, que todavía están en servicio. También se fabricaron numerosas cocinas solares. Sin embargo, dada la abundante oferta de las formas tradicionales de energía, la demanda de dispositivos accionados con energía solar fue escasa, abandonándose, en gran parte, los trabajos realizados en esa esfera.

Este Laboratorio tiene a su cargo el desarrollo de colectores de placa plana de alto rendimiento para temperaturas medias. En el curso de sus trabajos, ha investigado diversos revestimientos selectivos, como óxidos de cobre, níquel y cromo, sulfuro de plomo, telururo de cadmio y películas de cerametal a base de MgO y oro. También ha desarrollado revestimientos selectivos para construcciones y ventanas selectivas para superficies encristaladas utilizando SnO₂ o In₂O₃. Se han alcanzado temperaturas de remanso de hasta 180°C.

El Laboratorio se encarga también de establecer los procedimientos de ensayo de esos colectores, así como las normas que han de cumplirse, habiendo

montado importantes instalaciones de prueba. La capacidad de emisión y de absorción de los revestimientos selectivos así como las características de transmisión de las superficies encristaladas pueden medirse en la gama espectral de 300 nm a 20 m. Actualmente, es posible medir todos los parámetros de un colector de placa plana. También pueden probarse los colectores ya montados, a efectos de determinar su rendimiento. Asimismo, se cuenta con medios para estudiar la influencia de las condiciones ambientales, la humedad, la neblina salina, etc., en el rendimiento de los colectores solares. Las pruebas sobre el terreno las realiza BHEL. El Laboratorio está estableciendo en estos momentos heliocentros en los que se crearán condiciones artificiales de insolación para probar los colectores y las pilas solares.

El Laboratorio ha desarrollado calentadores solares de agua, de 75 y 150 litros de capacidad, que están siendo probados actualmente.

**Jamahiriyá Árabe Libia:
Instituto Árabe de Desarrollo**

El Instituto Árabe de Desarrollo fue creado, en la Jamahiriyá Árabe Libia en 1975, con el fin de movilizar los esfuerzos de los científicos árabes en beneficio de sus países. El objetivo que persigue es el desarrollo a través de las investigaciones científicas y tecnológicas.

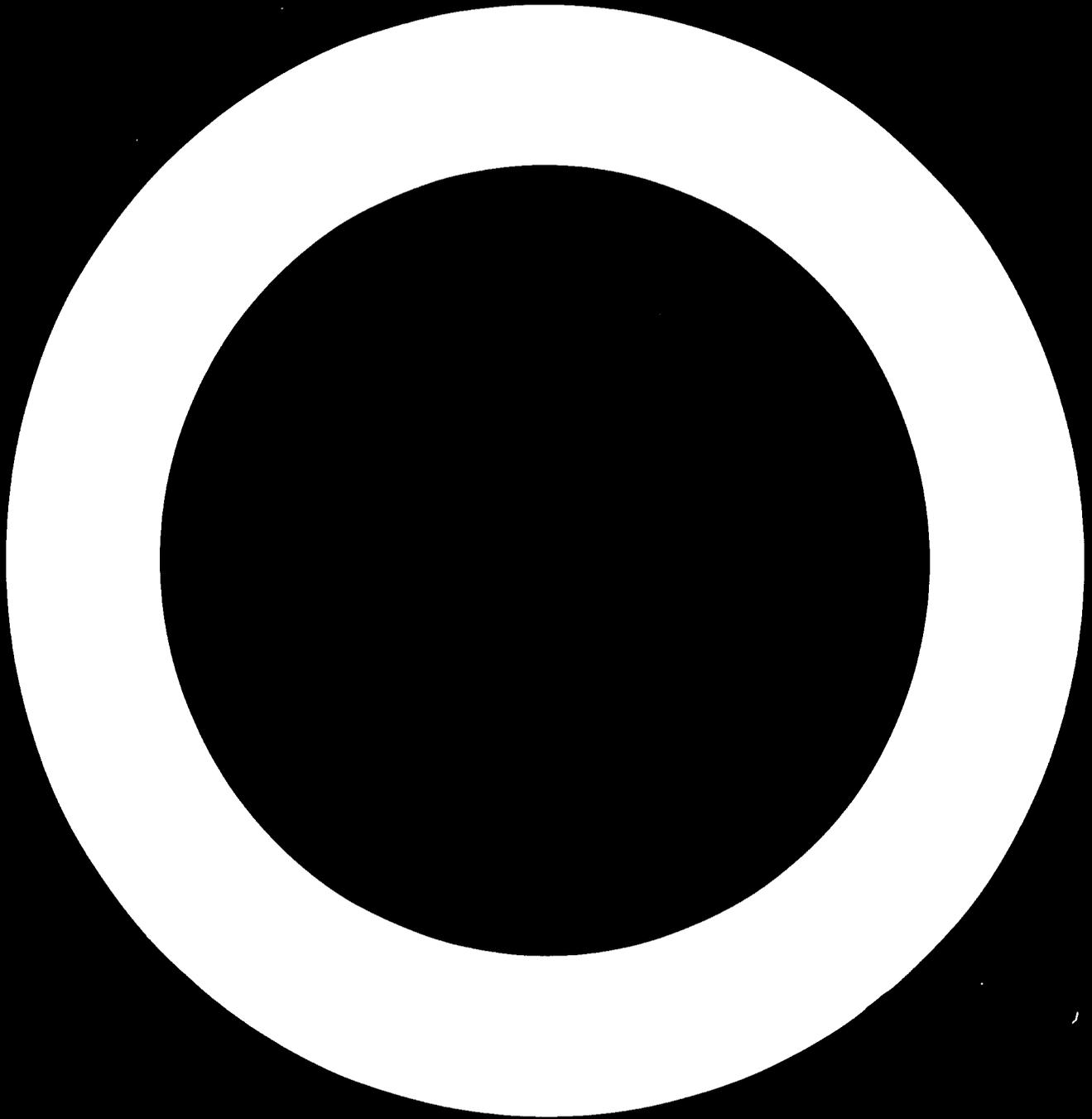
La conferencia que sobre física de la energía solar se celebró en la Universidad de Gar Yumo, en Benghazi, en 1976, formuló recomendaciones al Instituto sobre el establecimiento de un centro para el estudio de la energía solar. El Instituto procede actualmente a la creación de dicho centro.

En la actualidad, los trabajos de investigación se concentran en los colectores solares. Dentro de poco, se empezará a trabajar sobre la optimización del ciclo de los motores solares y sobre el intercambio radiante a través de las placas de vidrio.

Simultáneamente con los trabajos del Instituto, un grupo de investigadores de la Universidad de El-Fateh (Trípoli) realiza investigaciones sobre alambiques solares.

Tercera parte

**SELECCION DE MONOGRAFIAS TECNICAS
SOBRE APROVECHAMIENTO DE LA
ENERGIA SOLAR**



Una central solar de 10 kW

Hans Kleinrath

Institut für Elektrische Maschinen, Technische Universität, Viena (Austria)

El diseñador de una central solar con una capacidad generadora aproximada de 10 kW dispone de muchas opciones, algunas de las cuales se enumeran a continuación.

Componente de la planta	Opciones
Colector	Placa plana Concentrador (coeficiente de concentración bajo) Concentrador (coeficiente de concentración elevado)
Fluido activo	Agua Líquido orgánico Mezcla de sistemas
Almacenamiento	Térmico Eléctrico
Motor primario	Máquina de vapor Turbina (de poca velocidad) Turbina (de gran velocidad)
Generador primario	Máquina de alta frecuencia Máquina con una frecuencia aproximada de 50 Hz, con o sin engranajes
Red eléctrica	Corriente continua (CC) Corriente alterna (CA)

Por consiguiente, en los proyectos que actualmente llevan a cabo varios fabricantes se emplea una gran variedad de ideas y muchas permutaciones distintas de las posibilidades mencionadas. En el presente

documento se describe un proyecto austriaco para la construcción de una planta que tenga el menor número posible de mecanismos de control y pueda funcionar automáticamente. La figura 1 es un diagrama esquemático de dicha planta.

Circuito del colector

Los colectores concentradores seleccionados eran del tipo cóncavo parabólico, con un coeficiente de concentración de 10. En comparación con los colectores de placa plana y dirección constante, los del tipo cóncavo parabólico admiten una temperatura de funcionamiento más elevada sin una gran disminución del rendimiento de los colectores, siendo, por consiguiente, mayor su rendimiento de Carnot; también captan mejor la energía durante el día, puesto que pueden hacerse de forma que sigan la trayectoria del Sol.

Debido a su coeficiente de concentración relativamente bajo, las tuberías receptoras producen agua caliente a 135°C, lo cual supone una presión relativamente baja y, por lo tanto, esfuerzos reducidos para las guarniciones, las válvulas y el aislamiento. La superficie total de los colectores viene a ser de 300 m².

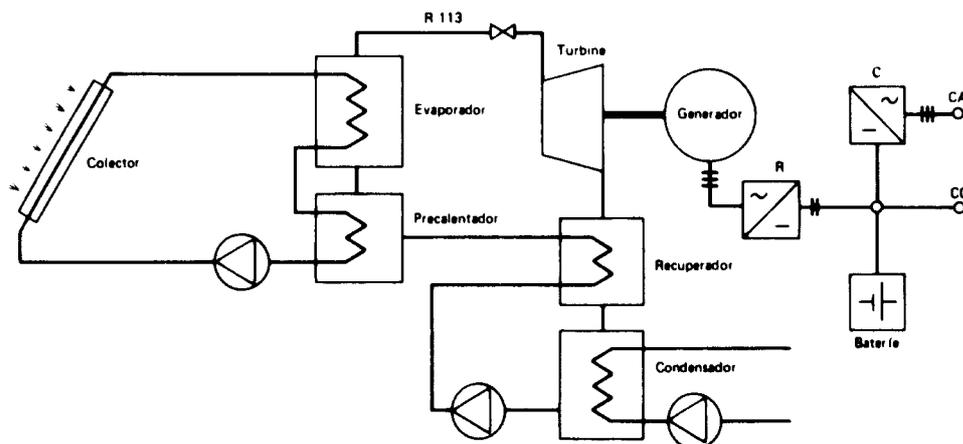


Figura 1. Diagrama esquemático de la planta eléctrica solar austriaca de 10 kW

Circuito de Freón y motor primario

El circuito primario está conectado al circuito secundario de Freón mediante un precalentador y un evaporador. Se utiliza como motor primario una turbina de Freón. A diferencia de lo que ocurre con los motores de expansión de tornillo, la turbina mantiene una velocidad aproximadamente constante, inclusive en condiciones de carga parcial. Por lo tanto, es fácil obtener un voltaje constante a partir de un generador de corriente alterna acoplado directamente.

Las especificaciones de la turbina son:

Fluido activo	R113
Temperatura de entrada	120 °C
Temperatura de salida	73 °C
Presión de entrada	7,0 barías
Presión de salida	0,7 barías
Capacidad generadora nominal	16 kW

Si se coloca un recuperador entre la salida de la turbina y el condensador, se puede aprovechar aproximadamente un 11% más de energía primaria, reduciéndose así tanto la superficie total del colector que se necesita como la cantidad de agua de refrigeración que se requiere en el condensador.

Generador y red eléctrica

Se acopla directamente un alternador a la turbina. Cuando se utiliza una máquina de corriente alterna de tipo homopolar, el rotor es de acero macizo, sin bobinas, anillos colectores ni escobillas.

El voltaje del generador de alta frecuencia se rectifica y, a continuación, se conecta con una batería que actúa a la vez como depósito de electricidad y como amortiguador del rotor, manteniendo su velocidad aproximadamente constante. El tercer objetivo de la batería es alimentar todos los mecanismos auxiliares durante el procedimiento de puesta en marcha.

Rendimiento de la planta

Como los colectores siguen la trayectoria del sol, la energía producida aumenta muy rápidamente hasta alcanzar su valor máximo. En el momento en que la energía producida basta para cubrir la que absorben los mecanismos auxiliares más las pérdidas del equipo en su conjunto, las bombas correspondientes a los tres circuitos empiezan a trabajar. Una vez que se ha puesto en marcha la turbina, se conecta automáticamente el equipo que utiliza la electricidad, según la cantidad de energía eléctrica disponible.

En la figura 2 se indican las curvas características calculadas para las condiciones de explotación en Austria, en el mes de junio. La curva 1 registra las variaciones de la insolación directa, medidas por una estación meteorológica. La energía absorbida se representa gráficamente en la curva 2; dicha energía se reduce debido a las sombras proyectadas por un colector sobre el otro cuando la inclinación de dichos colectores es superior a 45°.

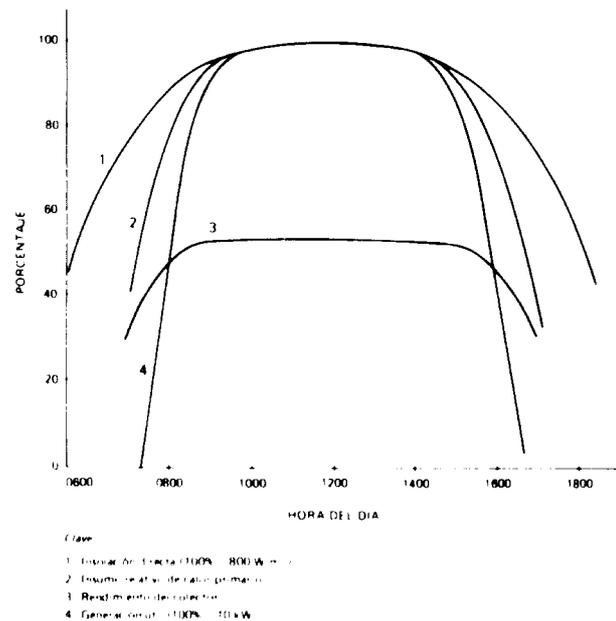


Figura 2. Curvas características calculadas de la planta (junio)

La curva 3 es un gráfico del rendimiento de los colectores, y la curva 4, de la capacidad generadora útil.

Equipo suplementario

La red más sencilla es la red de corriente continua descrita, en la cual la batería actúa como depósito. Las principales ventajas de esta red son:

No se necesita un control de velocidad de gran precisión;

No hay engranaje alguno entre el motor primario y el generador (lo cual sería indispensable si debiera producirse una corriente alterna de 50 a 60 Hz, porque los motores primarios de sólo 10 kW tienen una velocidad superior a 5.000 rpm);

No se necesita ningún equipo adicional para la fase de puesta en marcha;

El sencillo sistema de control es sumamente seguro.

En la mayoría de casos, una central eléctrica con una capacidad generadora útil de sólo 10 kW bastará para alimentar el equipo de alumbrado, radio y televisión. También se pueden alimentar mecanismos eléctricos si se utilizan motores de corriente continua. De todas formas, a veces se pueden utilizar motores de corriente alterna. En este caso, se requiere un convertidor suplementario, de tipo conmutatriz. En la conmutatriz clásica con conmutador y anillos colectores, debe limpiarse el conmutador y cambiarse las escobillas de vez en cuando. De todos modos, presenta algunas ventajas con respecto al convertidor de tiristor: es mucho más barato; tiene muy pocas pérdidas; y es muy poco sensible a la sobrecarga, por ejemplo durante el período de puesta en marcha de los motores de corriente alterna.

Transformación de la energía solar en energía mecánica o eléctrica: Experiencia de la India

V. G. Bhide

Laboratorio Nacional de Física, Nueva Delhi (India)

La superficie total de terreno cultivado en la India es de unas 143×10^6 ha, de las cuales se riega un 30%, es decir, 43×10^6 ha. De esta superficie regada, 23×10^6 ha están servidas por pozos entubados, estanques u otros sistemas de riego secundarios. En el Quinto Plan Quinquenal (1974-1979) se consideraba un aumento de la superficie irrigada de $11,2 \times 10^6$ ha, de las cuales 6×10^6 ha debían estar servidas por sistemas de riego secundarios.

En un principio, se pensó en instalar durante este período 1,5 millones de bombas de 1,5 kW (2 hp). Sin embargo, como consecuencia de la crisis del petróleo, no sólo no se han instalado estas bombas adicionales, sino que inclusive una fracción relativamente importante de los 2,5 millones de bombas existentes no cuentan con suministro de energía (diesel o electricidad). Por consiguiente, el desarrollo y la producción de bombas solares dentro de la gama de 1,5-4 kW (2,5 hp) han recibido la máxima prioridad. De preferencia, estas bombas se harán en forma de módulos, de modo que, cuando no se requiera el bombeo, se pueda utilizar el mismo

sistema para producir energía mecánica o eléctrica equivalente para operaciones industriales secundarias o para el alumbrado.

Otro enfoque adoptado por los planificadores de la India consiste en iniciar la investigación, el desarrollo y la instalación de centrales eléctricas solares dentro de la gama de los 10 a 100 kW, capaz cada una de ellas de satisfacer la totalidad de las necesidades de una aldea o de un grupo de aldeas.

La transformación fotovoltaica o termoelectrónica de la energía solar no resulta práctica, por lo cual los esfuerzos se han concentrado en la utilización directa del calor del sol.

La bomba hidráulica solar de Abhimanyu

En la figura 1 se ve la bomba hidráulica solar de Abhimanyu, desarrollada por el Laboratorio Nacional de Física (LNF). Sus componentes primarios son un dispositivo colector de placa plana y un motor de

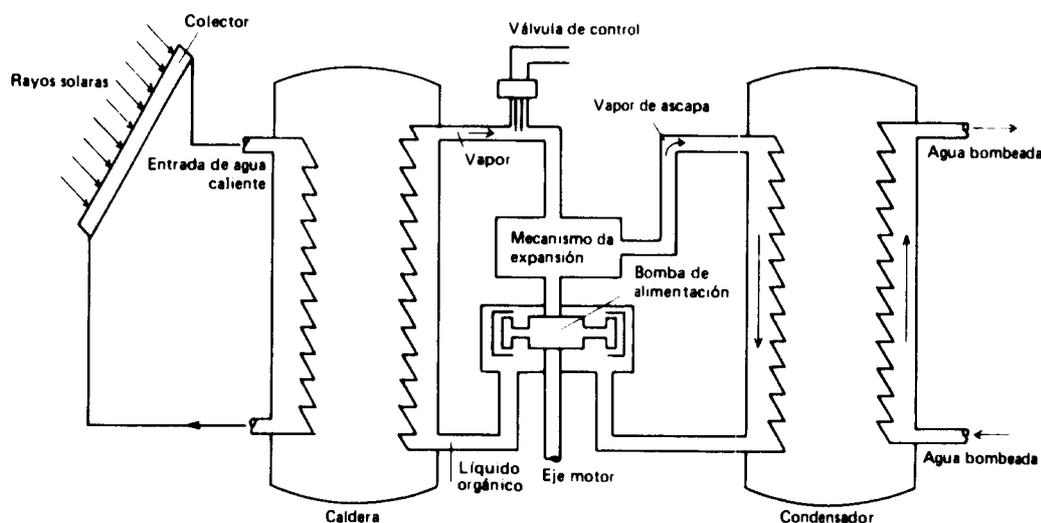


Figura 1. Diagrama de la bomba de agua solar de Abhimanyu

ciclo de Rankine con fluido orgánico en ciclo cerrado. Durante su funcionamiento, un líquido termotransferente (agua) fluye por el dispositivo colector y se calienta a una temperatura de 80° a 95°C , según el rendimiento y la configuración del colector y el flujo solar. Este agua caliente se utiliza para evaporar un líquido orgánico con un punto de ebullición bajo, en un termopermutador de flujo invertido (caldera). A continuación se utiliza el vapor orgánico caliente y a presión elevada para accionar el mecanismo de expansión de la máquina de ciclo de Rankine. Una vez salido del mecanismo de expansión, el vapor se condensa en un condensador donde el agua que se bombea se utiliza como sumidero de calor. El líquido orgánico condensado se somete a presión y a continuación se reexpide por bombeo a la caldera, con ayuda de una bomba alimentadora de reinyección montada sobre el eje del mecanismo de expansión y accionada por el mismo. Para algunos fluidos orgánicos, también puede haber un regenerador que utilice el sobrecalentamiento del vapor de escape para precalentar el fluido que entra en la caldera.

La máquina de ciclo Rankine con fluido orgánico es particularmente adecuada para el bombeo y la generación de energía por calor solar y para la utilización de gases de escape, por diversas razones:

- a) Su elevado rendimiento térmico, incluso cuando funciona con temperaturas bajas o moderadas (80° a 95°C), que pueden conseguirse con colectores de placa plana;
- b) Componentes poco costosos debido al empleo de materiales de construcción fáciles de conseguir y de componentes mecánicos simples;
- c) Gran fiabilidad a causa de su construcción hermética, que la protege de los efectos perjudiciales del medio ambiente tales como arena, polvo y humedad;
- d) Ningún problema de congelación, porque los fluidos activos tienen puntos de congelación muy bajos.

El rendimiento del sistema, que determina en gran parte la superficie del colector requerida y, por consiguiente, el costo, se define aquí como $\eta_s = \eta_c \times \eta_e$, siendo η_e el rendimiento del motor y η_c el del colector.

Mientras el rendimiento del motor aumenta a medida que aumenta la temperatura del colector, el rendimiento del colector disminuye al aumentar la temperatura de éste. Por consiguiente, para cada combinación colector-motor debe determinarse la gama de temperaturas con las cuales se obtiene el máximo rendimiento del sistema. Como veremos más adelante, este rendimiento óptimo del sistema depende de varios factores, como la insolación, la temperatura del condensador y las características del dispositivo colector, del mecanismo de expansión, de la bomba alimentadora de reinyección y del fluido activo. De todas formas, es evidente que cuanto mayor sea el rendimiento del dispositivo colector y más elevada la temperatura que puede producir, mayor será el rendimiento del sistema. Resulta tanto más necesario conseguir un conjunto colector óptimo en una central eléctrica en gran escala, porque los colectores representan una fracción considerable del costo total.

Dispositivos colectores

En la bomba de Abhimanyu (figura 2) se utilizaron colectores de placa plana. La placa absorbente está hecha de una aleación de aluminio, con canales conformados mediante la técnica de unión por presión. Se mejoró al máximo el diseño mecánico completo del colector.

Se probaron revestimientos selectivos de óxidos de cobre, níquel y cromo así como PbS, CdTe y otros materiales. Con el colector óptimo, se pudo conseguir una temperatura de remanso de hasta 180°C para una insolación de 1.000 W/m^2 (figura 3). En la figura 4 se indican las variaciones anuales de la captación diaria

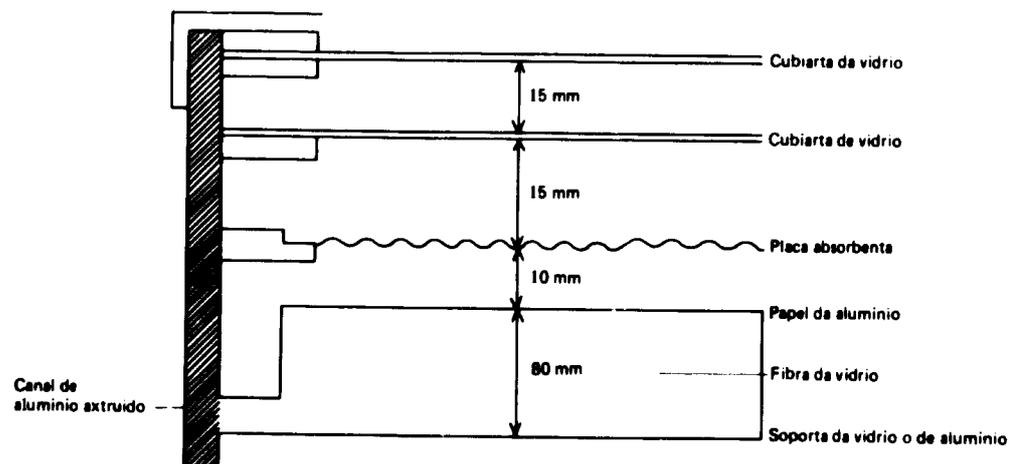


Figura 2. Sección transversal de un conjunto colector

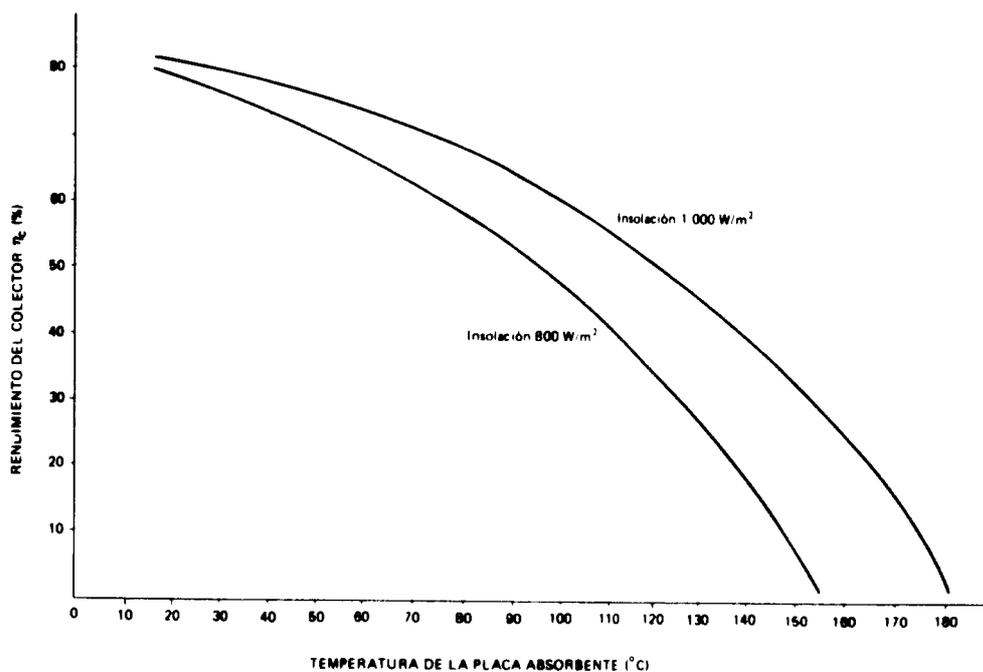


Figura 3. Rendimiento del colector seleccionado para la bomba de Abhimanyu

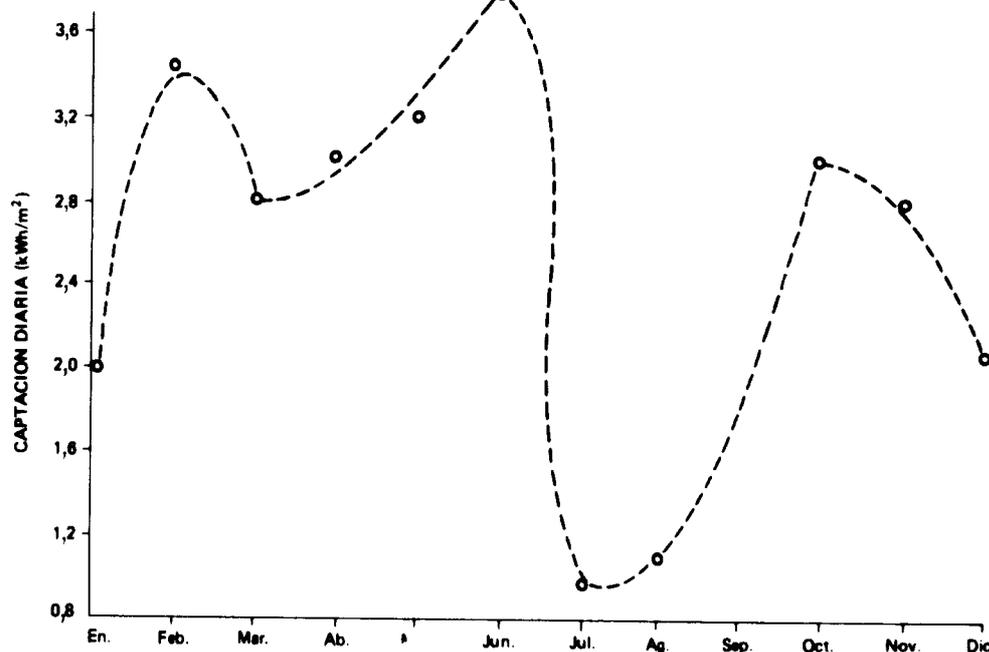


Figura 4. Variaciones anuales de la captación diaria efectiva de energía

efectiva de energía térmica en un colector típico que funciona a 90°C . Si bien se intentó crear ventanas selectivas revistiendo unas cubiertas de vidrio con SnO_2 , In_2O_3 , etc., el mejor rendimiento no justificaba el costo que suponía este proceso.

Como conviene que el mecanismo de expansión funcione a una temperatura de entrada constante, se necesita un depósito para almacenar agua caliente, el cual está conectado al colector por medio de una válvula de seguridad controlada termostáticamente.

En condiciones de funcionamiento, casi la mitad del calor se necesita para precalentar el líquido orgánico, y la otra mitad se utiliza durante el proceso de ebullición. Se pueden efectuar algunos ahorros en la superficie de colector necesaria si se cuenta con un dispositivo colector para las temperaturas bajas y otro para las elevadas. El primero se utiliza para el precalentamiento, mientras el segundo sirve para llevar el líquido orgánico hasta el punto de ebullición y sobrecalentar el vapor orgánico.

Mecanismo de expansión

El corazón de la bomba es el mecanismo de expansión, en el cual el vapor, a una presión elevada, lleva a cabo un trabajo mecánico y genera fuerza motriz al eje durante el proceso de expansión. El mecanismo de expansión determina, en gran medida, la fiabilidad y el rendimiento del sistema. En principio, podría ser una máquina alternativa, una turbina, o una máquina giratoria de desplazamiento positivo.

En una máquina alternativa, el movimiento lineal se convierte en movimiento giratorio mediante un mecanismo de cigüeñal. La máquina alternativa requiere válvulas de entrada y de salida para controlar la circulación del vapor a presión por el motor. Para las bombas de pequeña potencia, el empleo de equipo alternativo hace que el sistema resulte complejo e ineficaz.

Las turbinas pueden utilizarse cuando la potencia es elevada. Para las potencias bajas, el tamaño de la turbina es más pequeño y su velocidad más elevada, lo cual crea diversos problemas. Debe utilizarse un mecanismo de engranajes para reducir la velocidad de la turbina, a fin de equipararla a la de la bomba o del generador. Como las turbinas no son máquinas de desplazamiento positivo, su eficacia disminuye a medida que se reduce el flujo de vapor. Además, una turbina reacciona bastante mal a una carga variable. Por consiguiente, para una potencia baja, es preferible disponer de máquinas de desplazamiento positivo que funcionen a una velocidad moderada de 1.000 a 8.000 rpm.

El mecanismo de expansión utilizado en las bombas de Abhimanyu es una máquina giratoria de desplazamiento positivo. Está constituida por un montaje de dos espirales cortadas en sentido contrario, según se indica en la figura 5. Una de las espirales está fija en la chapa de recubrimiento y la otra gira alrededor del centro del orificio de entrada, con una leve excentricidad. Cuando se encajan esas dos espirales, se forman cierto número de bolsas. A medida que la espiral móvil gira, el volumen de las bolsas cambia (figura 6). Según la dirección del movimiento giratorio, el tamaño de la bolsa aumenta o disminuye durante el ciclo. De esta forma, la máquina puede utilizarse como compresor o como mecanismo de expansión. Cuando trabaja como mecanismo de expansión, el vapor a alta presión penetra en el conjunto de las espirales por el centro, y después de la expansión sale por la periferia.

Cuando se usa como compresor, la entrada está en la periferia y el gas comprimido sale del conjunto por el centro. Ese mecanismo de expansión no tiene válvulas para regular el flujo, y hay en él muy pocas partes móviles. El desplazamiento de volumen del mecanismo de expansión por revolución es función del volumen de las bolsas formadas entre las dos espirales, el cual a su vez está determinado por la separación (distancia entre dos espirales sucesivas) y

la profundidad de la espiral, y el espesor de las paredes de la misma. Las chapas de recubrimiento cierran herméticamente esas bolsas, con lo cual realizan la misma función que las paredes del cilindro en una máquina alternativa. En el cuadro 1 se comparan las características de la máquina giratoria de desplazamiento positivo de Abhimanyu, de una máquina alternativa y de una turbina.

Puesto que el mecanismo de expansión de espiral funciona a bajas velocidades, puede mover directa-

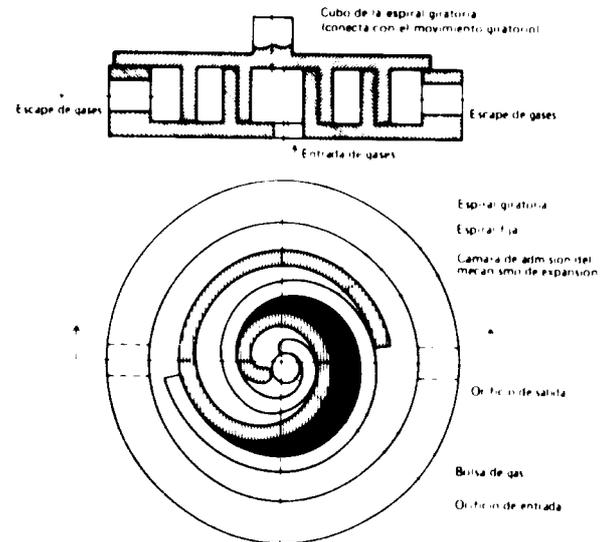


Figura 5. Configuración de un mecanismo de expansión de espiral típico

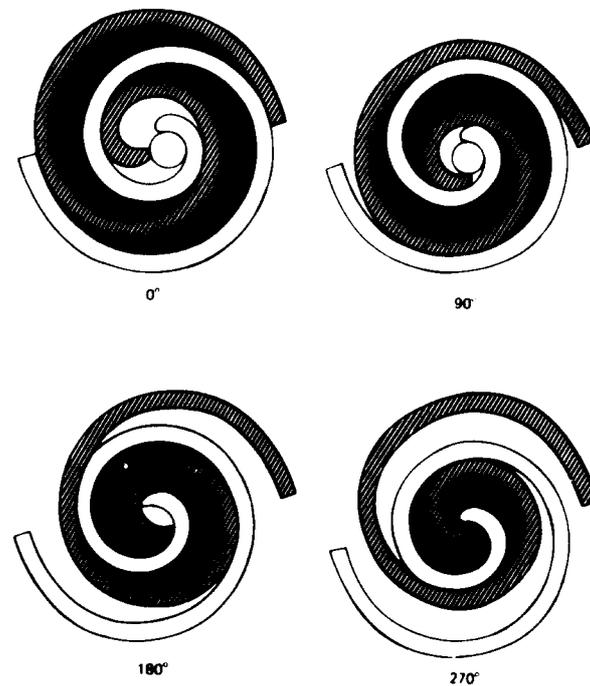


Figura 6. La máquina giratoria de desplazamiento positivo al funcionar como compresor, en distintas fases de la órbita de la espiral en movimiento

CUADRO 1. COMPARACION ENTRE TIPOS DE MAQUINAS

Características	Mecanismo de expansión de la bomba de Abhimanyu		
	Máquina alternativa	Turbina	
Rendimiento (%)	70-80	70-80	60-80
Válvulas	Ninguna	Entrada y escape	Ninguna
Partes móviles	Pocas	Muchas	Pocas
Velocidad de funcionamiento (rpm)	900-1 800	900-3 600	3 000-80 000
Conexión con la bomba de alimentación	Toma directa	Toma directa	Gran reducción por engranajes
Capacidad de funcionar a velocidades variables	Buena	Buena	Mediocre
Funcionamiento a carga parcial	Bueno	Bueno	De mediocre a regular
Nivel de ruido	Bajo	Elevado	Bastante elevado
Fiabilidad	Buena	Regular	Regular

mente una bomba o un generador y utilizar obturadores laberínticos del eje bastante eficaces. Como el mecanismo de expansión tiene pocas partes móviles, las velocidades de frotamiento y las presiones de contacto son bajas: el mecanismo de expansión de espiral se asienta en lugar de desgastarse. El resultado de tales características es un funcionamiento sumamente fiable, con rendimientos medidos próximos al 80%.

La relación de volumen que puede obtenerse es función del diámetro y de la separación de la espiral. Las dimensiones de un mecanismo de expansión de espiral típica utilizado en una bomba de 1 kW de Abhimanyu son las siguientes:

	Milímetros
Separación	15,88
Longitud axial	22,22
Espesor de las paredes	3,18
Diámetro exterior	165
Radio de giro de la espiral móvil	4,76

El desplazamiento de volumen por revolución de un mecanismo de expansión de ese tipo sería $93,4 \text{ cm}^3$, y la relación de volumen sería de 3,0.

Descripción del fluido activo y del ciclo

En las dimensiones del mecanismo de expansión influye mucho la selección del fluido activo. Se consideraron diversos fluidos activos, inclusive los refrigerantes bien conocidos R11, R113, R114. El R11 se eliminó debido a su baja presión (y, por consiguiente, mediocre rendimiento) a las temperaturas que pueden conseguirse con colectores de placa plana. El inconveniente del R113 es que necesita un regenerador. Finalmente, se seleccionó el R114, pues convenía de manera ideal a las temperaturas y a la generación de electricidad previstas.

El ciclo de trabajo del motor se indica en la figura 7. El agua caliente del tanque de almacena-

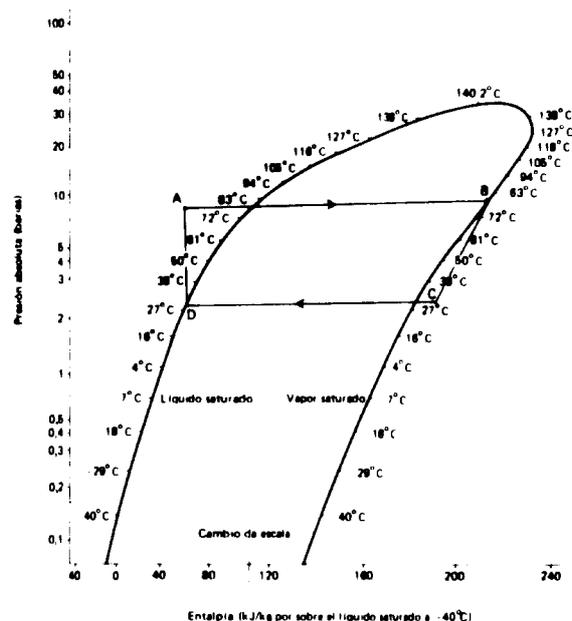


Figura 7. Ciclo de trabajo de la máquina

miento, a unos 90°C , intercambia calor con el fluido activo R114 en un termopermutador de contracorriente. El fluido activo sale de la caldera a una temperatura de 82°C y a una presión de 9,3 barías (AB en la figura 7). El vapor a alta presión penetra en el mecanismo de expansión a 82°C y a 9,3 barías. Después de la expansión, el vapor de escape tiene una temperatura de $37,5^\circ\text{C}$. El vapor que sale del mecanismo de expansión está ligeramente sobrecalentado y su presión es de 2,4 barías; a temperatura del condensador es 30°C . Esta expansión isentrópica está indicada por BC en la figura. El trabajo realizado por el vapor, por unidad de masa de vapor expandido, es $20,9 \text{ kJ/kg}$. El vapor de escape que sale del mecanismo de expansión se condensa en el condensador mediante la acción del agua fría. En la figura, este proceso está indicado por CD. El líquido condensado se comprime y se reinyecta en la caldera

mediante la bomba de alimentación (DA en la figura), con lo cual se completa el ciclo. El rendimiento de Carnot del ciclo es de 14,7%, y su rendimiento termodinámico, de 12,5%, lo cual da una relación de rendimiento del mecanismo de expansión del 85%. A continuación se expresan las especificaciones detalladas de una bomba de Abhimanyu de 1 kW.

Artículo	Especificación
Presión de entrada	9,3 barías
Temperatura de entrada	80°C
Temperatura del condensador	30°C
Fluido activo	R114
Entalpía en la entrada del mecanismo de expansión	223,3 kJ/kg
Presión en la salida	2,4 barías
Entalpía después de la expansión	202,4 kJ/kg
Trabajo realizado durante la expansión isentrópica	20,9 kJ/kg
Volumen específico de fluido activo en la entrada	0,015 m ³ /kg
Velocidad de circulación del fluido activo necesaria para producir una energía de 1 kW (1,3 hp) en el eje	168 kg/h
Velocidad de paso del vapor en el mecanismo de expansión, a la presión de entrada	2,49 m ³ /h
Volumen de vapor a alta presión extraído por el mecanismo de expansión, por revolución	22,9 cm ³
Velocidad del mecanismo de expansión	1 827 rpm
Caldera-generador	Termopermutador de tubos de aletas, de flujo invertido
Temperatura del agua que penetra en la caldera	90°C
Temperatura del agua que sale de la caldera	81°C
Velocidad de paso del agua por la caldera	3,5 l/min
Entalpía del vapor de fluido activo a 37,5°C	202,4 kJ/kg
Entalpía del fluido activo líquido a 30°C	53,5 kJ/kg
Calor total que debe eliminarse en el condensador	24,9 MJ
Superficie de colector necesaria para hacer funcionar la bomba durante 4 horas diarias	10 m ²

Optimización del sistema

El rendimiento del motor, que es el producto del rendimiento del mecanismo de expansión y de la bomba de alimentación, era del orden del 70% del rendimiento de Carnot. En la figura 8 se da el rendimiento del motor como función de la temperatura de entrada en el mecanismo de expansión para diversas temperaturas del condensador. Cuanto más baja sea la temperatura del condensador, mayor será el rendimiento del motor.

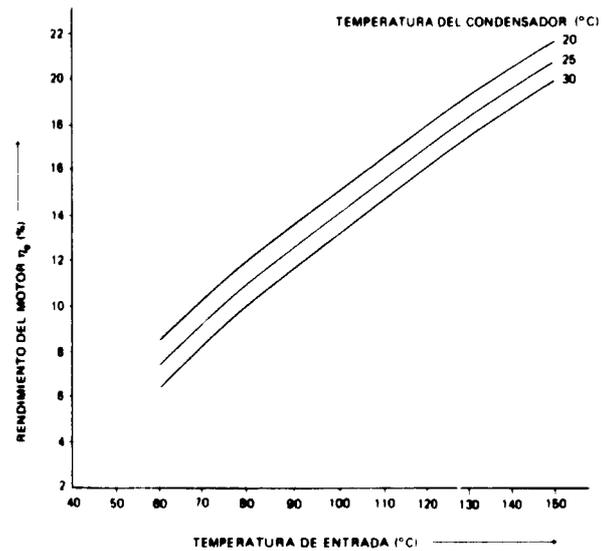


Figura 8. Rendimiento del motor según la temperatura de entrada, a diversas temperaturas del condensador

Combinando los datos de la figura 8 relativos al rendimiento del motor, con los datos de la figura 3 relativos al rendimiento del colector, se obtiene el rendimiento del sistema según se indica en la figura 9. Para una insolación determinada, existe una gama óptima de temperaturas del colector, a las cuales el sistema presenta un rendimiento máximo. Deben tenerse presentes estas consideraciones al diseñar el sistema. Este ofrece posibilidades diversas, puesto que, cuando no se necesita el bombeo, puede utilizarse para generar energía eléctrica o para accionar un sistema mecánico, como una trilladora o un pequeño torno. El conjunto colector tiene una superficie de 10 m²; a continuación se dan las dimensiones de los demás subsistemas.

	Altura (cm)	Diámetro (cm)
Condensador	50	25
Caldera	50	30
Mecanismo de expansión	35	30
Tanque de almacenamiento	200	65
Bomba	25	20

La bomba de 1 kW de Abhimanyu viene funcionando desde hace seis meses. Siguiendo los mismos principios se pueden diseñar bombas de hasta 12 kW.

Generación de 10 a 100 kW de potencia

Dos centrales eléctricas solares de 10 kW se encuentran en diferentes fases de desarrollo en la India. Una es una empresa mixta constituida entre el Gobierno de la India y el Gobierno de la República Federal de Alemania. Los organismos de ejecución

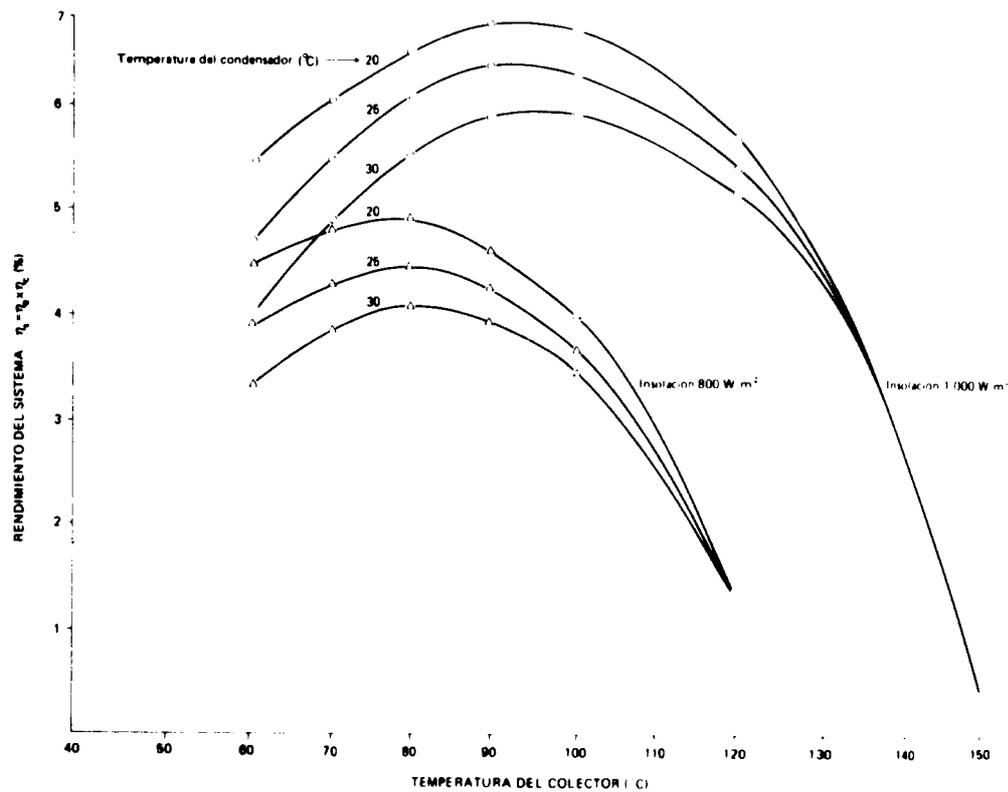


Figura 9. Variación del rendimiento del sistema según la temperatura del colector, a insoluciones de 800 W/m^2 y 1000 W/m^2

son, por parte de la India, Bharat Heavy Electricals Ltd., el Laboratorio Nacional de Física y el Instituto Indio de Tecnología de Madrás y, por parte de la República Federal de Alemania, Messerschmidt, Bölkow y Blohm (MBB), de Munich. El objetivo del proyecto es establecer una planta de demostración de 10 kW que utilice energía solar. La figura 10 es un diagrama de la central eléctrica en la cual deberán utilizarse el mecanismo de expansión de tornillo de Linde, un dispositivo colector de placa plana y un sistema tradicional de generación de energía eléctrica. El fluido activo será el R114.

El segundo proyecto de instalación de una central solar de 10 kW es en su totalidad fruto del

esfuerzo de la India, y en él se considera el empleo de mecanismos de expansión de espiral. En ambos proyectos se utilizan los motores de ciclo de Rankine con fluido orgánico, con un dispositivo colector de placa plana. A continuación se dan algunos parámetros del diseño de este sistema.

	Especificación
Energía en el eje	10 kW
Mecanismo de expansión	Mecanismo de expansión de espiral de desplazamiento positivo
Fluido activo	R114
Temperatura de entrada	80 °C

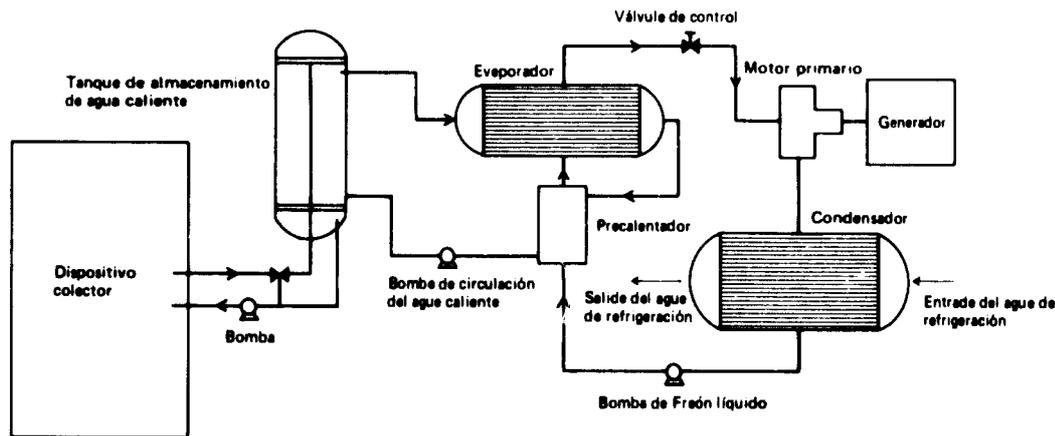


Figura 10. Diagrama de una central eléctrica de 10 kW

	<i>Especificación</i>		<i>Especificación</i>
Presión de entrada	9,3 barías	Velocidad de circulación del fluido activo	49 kg/min
Temperatura de escape	37,5°C	Caldera-generator	Termopermutador de tubos de aletas, de flujo invertido
Presión de escape	2,4 barías		
Separación de la espiral	5,7 cm	Temperatura del agua que penetra en la caldera	90°C
Longitud del eje de la espiral	7,6 cm	Temperatura del agua que sale de la caldera	81°C
Espesor de la pared de la espiral	6,4 mm	Velocidad de paso del agua por la caldera	180 l/min
Radio de giro de la espiral móvil	22,2 mm	Superficie del colector	400 m ²
Diámetro exterior de la espiral	50,8 cm		
Desplazamiento de volumen por revolución	524,5 cm ³		
Relación de volumen	3,5		
Velocidad del mecanismo de expansión	1.500 rpm		

Aprovechamiento de la energía solar para la valorización de zonas áridas: Bombas hidráulicas solares

Jean Paul Durand, Max G. Clemont, J. Pierre Girardier
y Marc Y. Vergnet

SOFRETES et Mengin, Montargis (Francia)

Diseño básico de una bomba solar

El primer objetivo de SOFRETES, trabajando en colaboración con la Universidad de Dakar (Senegal), era desarrollar un equipo de bombeo de agua que no necesitase combustible exterior al sistema para usos domésticos en aldeas pequeñas y para la cría de ganado al principio, y más adelante para el riego de cultivos en regiones áridas. Como este equipo estaba destinado a funcionar en lugares aislados, donde no suele disponerse de especialistas que puedan ocuparse del mantenimiento de un equipo complejo, tenía que ser sencillo, robusto y fiable. Se decidió, como primer paso, utilizar un ciclo termodinámico de baja temperatura entre una fuente de calor suministrada

por la energía solar y una fuente de frío mantenida por el agua bombeada.

Una estación de bombeo solar consta de los siguientes componentes (figura 1):

a) Una batería de colectores de placa plana en los cuales el agua, u otro líquido portador de calor, circula en circuito cerrado;

b) Un termopermutador dentro del cual el calor se transfiere del fluido que circula en los colectores al fluido que circula por el circuito del motor, ocasionando la evaporación de este último;

c) El circuito del motor que, además del termopermutador, comprende el motor de expansión, un condensador y una bomba de reinyección;

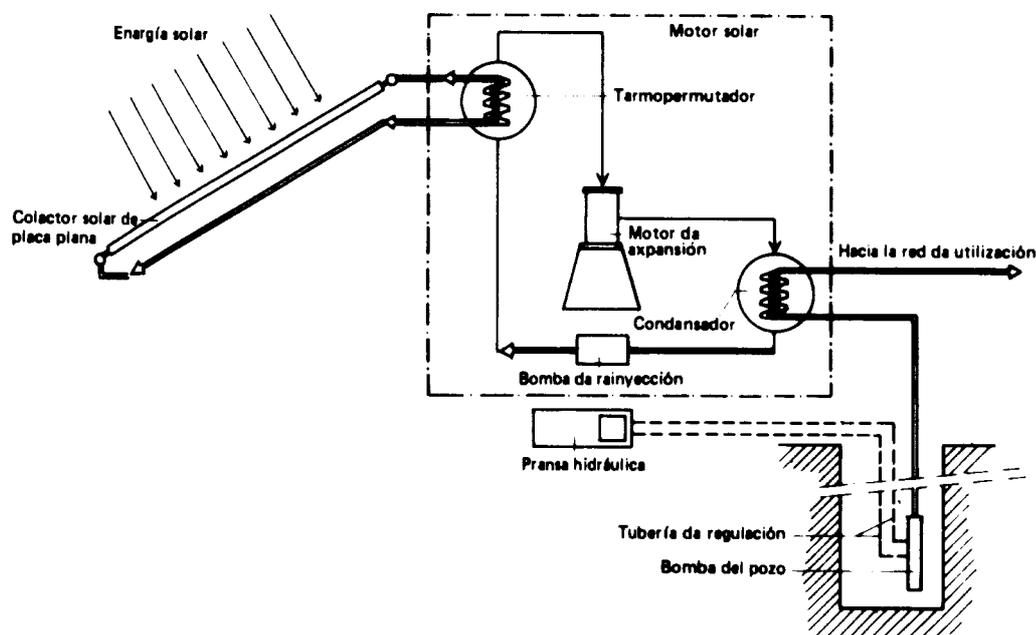


Figura 1. Diagrama esquemático de una estación solar de bombeo

d) El propio circuito de bombeo, que comprende un motor hidráulico que acciona la bomba de un pozo, cuando se trata de instalaciones de pequeña potencia (aproximadamente 1 kW), o un alternador y un motor eléctrico que acciona una o varias bombas, tratándose de potencias más elevadas (25 a 50 kW).

Aplicaciones prácticas de las bombas solares

Agua para usos domésticos en las aldeas

Conseguir un suministro de agua para las aldeas aisladas situadas en regiones áridas es una tarea esencial. El bombeo manual consume el tiempo y la energía de los habitantes de dichas aldeas. El bombeo tradicional con motores de combustión interna está sujeto a todas las incertidumbres del suministro de combustible y, además, el equipo exige un mantenimiento que las condiciones climáticas rigurosas y la falta de mano de obra calificada y de repuestos hacen difícil.

La introducción de una estación de bombeo solar en una aldea constituye un medio práctico de proporcionar un suministro de agua. Además, la instalación de colectores en el techo de un edificio hace que su interior sea más fresco, pues el fluido se lleva una gran proporción del calor captado por los colectores. Así, este edificio puede utilizarse para instalar en él una escuela, un mercado de ganado, un dispensario, etc.

Agua para el ganado

En regiones de pastoreo, la incertidumbre de los pozos significa a menudo que los rebaños deben depender de un único pozo, con resultados a veces desastrosos. Multiplicando los pequeños abrevaderos mediante equipo fiable accionado por energía solar se podría conseguir un suministro razonable de agua para las tribus nómadas y sus rebaños.

Actualmente, se están ensayando unas 40 centrales de 1 kW en 12 países: Alto Volta, Brasil, Camerún, Cabo Verde, Chad, Emiratos Arabes Unidos, India, Malí, Mauritania, México, Níger y Senegal.

En México, con el apoyo del Gobierno, se han instalado bombas hidráulicas solares en aldeas esparcidas en todo el país, así como una estación de 30 kW para el suministro de agua potable y para el riego. Esas bombas se explotan en condiciones climáticas, económicas y sociales variadas.

Características de una bomba solar de 1 kW

El equipo corriente utilizado actualmente en las instalaciones de 1 kW tiene las siguientes características:

Colector	
Superficie activa	70 m ²
Superficie disponible debajo del colector	100-120 m ²
Circulación del fluido	Termosifón o bomba de circulación
Circuito del motor	
Termopermutador/condensador	Elementos tubulares o planos
Fluido	Butano o Freón
Motor de expansión	Dos cilindros: desplazamiento 12
Velocidad de rotación	200 rpm
Circuito de bombeo	
Bomba del pozo	Accionada por energía hidráulica
Condiciones de explotación	
Insolación media	800 W/m ²
Temperatura del aire	20° C
Temperatura del agua bombeada	20°-30° C
Tiempo de funcionamiento diario	5-7 h
Producción diaria para una altura de impulsión de 20 m	30 m ³
Número de habitantes a cada uno de los cuales se puede suministrar 20 l de agua	1 500
Cantidad de ganado que puede recibir 40 l de agua por cabeza	750

Bomba solar dedicada al riego en México

La primera gran instalación solar dedicada al riego se ha establecido en San Luis de la Paz (Estado de Guanajuato, México). Forma parte de un programa gubernamental a largo plazo, dirigido por el organismo responsable de la mejora del medio ambiente en la Secretaría de Salubridad y Asistencia Pública. Esta instalación de 30 kW, que produce electricidad para accionar bombas, viene funcionando desde septiembre de 1975. San Luis de la Paz pertenece a la zona árida de México. Tiene una temperatura media aproximada de 17° C, con una máxima de 41° C y una mínima de -5° C. En un año corriente, llueve 39 días y la ciudad goza de tiempo soleado durante 250 días.

La instalación funciona conforme al mismo principio que las estaciones de 1 kW, salvo que se sustituye el motor de expansión por una turbina que acciona un alternador.

Las características generales de la instalación son las siguientes:

Superficie de los colectores	1 500 m ²
Fluido activo	R 11
Velocidad de rotación de la turbina	7 400 rpm
Bomba	Centrifuga, accionada eléctricamente
Caudal de bombeo para una elevación de 40 m	150 m ³ /h como promedio

Esta central solar produce unos 900 m³ de agua diarios. Es probablemente la instalación solar más potente del mundo. El agua, bombeada desde una profundidad de 40 m, se distribuye a 15.000 aldeanos y con el tiempo se utilizará también para regar 20 a 30 ha de cultivos experimentales. El espacio disponible debajo de la superficie de 1.500 m² de los colectores solares se utilizará para las instalaciones de una granja experimental.

Evolución futura

En la presente etapa de la tecnología solar, es perfectamente viable utilizar bombas solares en zonas áridas remotas. Sin embargo, los sistemas y técnicas deben adaptarse a las condiciones locales de cada caso. La experiencia de SOFRETES es que las bombas solares que utilizan el ciclo termodinámico de baja temperatura con colectores de placa plana se prestan muy bien a tal adaptación.

La labor futura que se prevé en esta esfera comprende:

Mejora del equipo existente en las gamas de 1 kW y de 25 a 100 kW;

Investigación sobre colectores, termopermutadores, motores y turbinas, fluidos, etc.;

Aplicación del ciclo termodinámico de baja temperatura al empleo de la energía geotérmica;

Refrigeración solar para conservación de alimentos y medicinas;

Acondicionamiento de aire y calentamiento de locales mediante energía solar.

Aspectos económicos

Al elegir una fuente de energía, debe analizarse qué ventajas e inconvenientes presenta su utilización, y calcularse cada componente del costo total. De esta forma, se puede hacer una comparación entre una fuente de energía tradicional (p. ej. un motor diesel) y la energía solar sobre la base del volumen de agua

que debe bombearse. Para efectuar dicho análisis es posible utilizar la comparación que figura a continuación. Sin embargo, hay que tener presente que el rendimiento de la energía solar utilizada y su competitividad, en comparación con la energía procedente de fuentes tradicionales, depende de las condiciones locales y que, por consiguiente, debe incluirse en el análisis un estudio especial de esas condiciones.

Fuente de energía	Ventajas	Inconvenientes o limitaciones
Motor diesel	Baja inversión Gran flexibilidad en su instalación y empleo	Gastos de explotación elevados Necesidad de importar, transportar y almacenar combustible, lubricantes y repuestos Consumo de recursos no renovables Contaminación localizada (gases de escape) Mano de obra calificada Precios del combustible y de la mano de obra inciertos (50% del costo)
Radiación solar	Gastos de explotación bajos Disponibilidad local de energía Gran duración del equipo (10-20 años) Fiabilidad Posibilidad de transferencia de tecnología Ninguna degradación de recursos naturales Ninguna contaminación Posibilidad de refrigeración debajo de los colectores No se necesita mano de obra calificada El mantenimiento queda reducido al cuidado del equipo Gastos de explotación conocidos	Inversiones elevadas Suministro discontinuo (necesario un tanque de almacenamiento) Obras de ingeniería civil de más envergadura

En la figura 2 se ilustra la comparación del costo del bombeo de agua utilizando un motor diesel, electricidad y energía solar. Se observará que la distancia hasta la fuente de energía tradicional es el factor determinante. Se calcula que, en el Sahel, una estación de energía solar de 50 kW utilizada para el

riego entrará en competencia con la electricidad cuando se llegue a una distancia de la central eléctrica de 100 km.

Se ha calculado que, para las bombas solares ya instaladas en Africa, el costo por unidad de volumen de agua bombeada viene a ser de 0,60 dólares/m³ en las centrales de 1 kW (suponiendo un tiempo de funcionamiento de 1.800 h anuales y una profundidad del agua de 30 m) y aproximadamente de 0,05 dólares/m³ en las centrales de 25 kW (mismo tiempo de funcionamiento, profundidad del agua 10 m). Un cálculo semejante para un sistema de bombeo que utilice un motor diesel y efectúe el mismo trabajo que una estación solar de 1 kW arroja un costo de unos 0,47 dólares/m³.

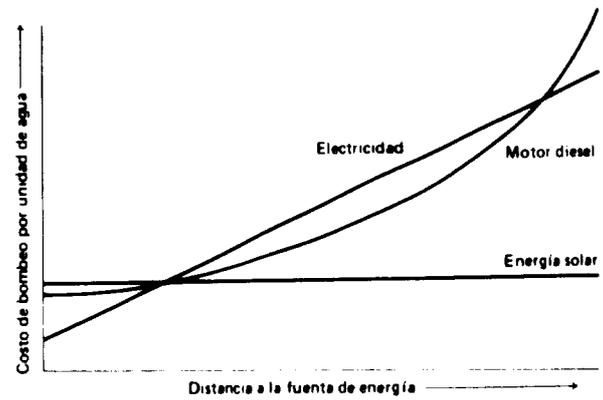


Figura 2. Costo de bombear agua utilizando diversas formas de energía en función de la distancia a la fuente de energía

Condiciones teóricas para el máximo aprovechamiento de la energía solar

Kamal-Edin Hassan

Instituto Arabe de Desarrollo, Tripoli, Jamahiriya Arabe Libia

Como todo motor térmico, el motor basado en la energía solar presenta limitaciones impuestas por el segundo principio de la termodinámica. Su máximo rendimiento es, por consiguiente, el del ciclo de Carnot (η_C):

$$\eta_C = 1 - (T_L/T_C)$$

donde T_L y T_C son respectivamente las temperaturas termodinámicas ambiente y del colector.

La máxima energía eléctrica (\dot{W}'') que puede generarse por unidad de área del colector solar está dada por

$$\dot{W}'' = \eta_C \dot{Q}''$$

donde la energía \dot{Q}'' suministrada al motor por unidad de área del colector es la diferencia entre la irradiancia I del colector y las pérdidas de energía. A temperaturas del colector relativamente bajas, las pérdidas por radiación y por convección pueden combinarse en un coeficiente único total de transferencia de calor U ; las pérdidas por unidad de área del colector son entonces $U(T_C - T_L)$. Por consiguiente, tenemos

$$\dot{Q}'' = I - U(T_C - T_L) \quad (1)$$

y

$$\dot{W}'' = [1 - (T_L/T_C)] [I - U(T_C - T_L)] \quad (2)$$

Para un valor de T_L dado, un elevado valor de T_C mejorará el rendimiento del ciclo de Carnot, pero aumentará al mismo tiempo las pérdidas. Por consiguiente, el trabajo máximo se obtendrá a determinada temperatura óptima del colector $T_{C,opt}$, a la que la ganancia de rendimiento equilibra la pérdida térmica. Esta condición óptima se obtiene cuando $d\dot{W}''/dT_C = 0$, que se produce cuando

$$T_{C,opt} = \sqrt{T_L(I + U T_L)/U}$$

ó

$$T_{C,opt}/T_L = \sqrt{(I/U T_L) + 1}$$

Definiendo la variable adimensional M como

$$M = U T_L/I \quad (3)$$

tenemos

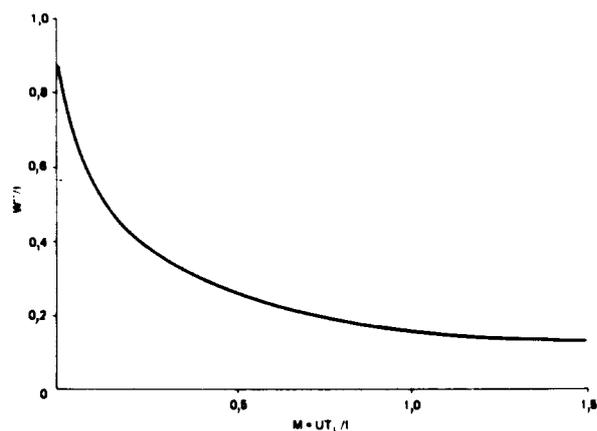
$$T_{C,opt}/T_L = \sqrt{(M + 1)/M} \quad (4)$$

La ecuación 4 da la temperatura de fuente para la que debe diseñarse un motor térmico de Carnot con el máximo rendimiento posible en las condiciones iniciales dadas por I , T_L y U .

La máxima fracción de la energía solar que puede convertirse en energía mecánica se obtiene a partir de las ecuaciones (2) y (4):

$$\begin{aligned} \dot{W}''_{max}/I &= 1 - (T_L/T_{C,opt}) [1 - (U/I)(T_{C,opt} - T_C)] \\ &= (1 - \sqrt{M/(M+1)})(1 + M - \sqrt{M(M+1)}) \end{aligned} \quad (5)$$

La figura representa gráficamente la ecuación (5). Con $M=0$, vemos que $\dot{W}''_{max}/I=1$, condición inalcanzable dado que $M=0$ significa que $U=0$, esto es: que no hay pérdida térmica en el colector y que su temperatura se aproximaría a un volar infinito, siendo así que no puede alcanzar una temperatura superior a la del Sol mismo (5.750 K). En efecto, el presente análisis falla a muy elevadas temperaturas del colector, cuando las pérdidas se deberían principal-



Razón entre la máxima energía utilizable y la energía solar incidente en función del parámetro de diseño M (curva de la ecuación 5)

mente a la radiación y no podrían expresarse en la forma lineal utilizada en la ecuación (1). Sin embargo, excepto a valores próximos a $M = 0$, la curva muestra correctamente la tendencia: un aumento de M (debido ya sea a un aumento de U o a una disminución de I) disminuye la fracción útil de I ; una disminución de M (ya sea mediante la aplicación de un sistema eficaz de aislamiento para disminuir U o concentrando la energía solar para aumentar I) resulta

en un aumento de la máxima fracción utilizable de la energía incidente.

En el caso de los colectores de placas planas, es difícil imaginar condiciones en las que M alcance valores inferiores a la unidad. A $M = 1$, la máxima energía que podría obtenerse sólo representa el 10.7% de la energía solar incidente. Dicho límite parece hacer imposible el uso de colectores de placas planas para la generación de corriente eléctrica.

Colectores solares de placa plana

A. A. M. Sayigh

College of Engineering, Riyadh, Arabia Saudita

De todas las aplicaciones de la energía solar, la más práctica entraña la utilización de colectores de placa plana para sistemas de calefacción. El calentador solar a base de un líquido fue invención de H. B. Saussure durante la segunda mitad del siglo XVII; Herschel (1837) y Tellier (1885) también ensayaron calentadores solares a base de agua. En épocas aún anteriores las poblaciones indígenas de África, de los países árabes, de Australia, China, India y Pakistán mostraron su ingenio calentando el agua contenida en vasijas de cobre de forma especial colocadas al sol durante los meses de invierno. Los calentadores de aire, por otra parte, son una invención reciente. K. W. Miller introdujo el calentador de aire de placas de vidrio superpuestas en 1943. En la actualidad resulta más económico utilizar

calentadores solares de agua para usos domésticos, aplicación de uso general hoy en todo el mundo.

Desde 1960, los colectores de placa plana han sido objeto de muy intensas actividades de investigación y desarrollo. En la presente memoria se describen las posibilidades y limitaciones de tales dispositivos, con el propósito de promover el uso adecuado de los colectores de placa plana, especialmente en los países en desarrollo.

Características de los componentes de los colectores de placas planas

Un colector de placa plana consiste normalmente en un absorbente, construido de un metal ennegrecido por lo común de cobre y una red de

CUADRO I. PROPIEDADES DE ALGUNOS RECUBRIMIENTOS UTILIZADOS EN LOS COLECTORES DE PLACA PLANA

Recubrimiento	Absorbencia de energía solar α	Admisión de radiación de onda larga ^a ϵ	Referencia
Pintura de esmalte negro	0,83	0,83	Sabbagh, J. A. y colaboradores
Alquitrán	0,86	0,86	Sabbagh, J. A. y colaboradores
Negro de humo	0,95	0,95	Sabbagh, J. A. y colaboradores
Negro de níquel (óxidos y sulfuros de Ni y Zn) sobre Ni pulimentado	0,91-0,94	0,11	Tabor, H. y colaboradores
Negro de níquel sobre hierro galvanizado (experimental)	0,85	0,12	Tabor, H. y colaboradores
Negro de níquel sobre hierro galvanizado (comercial)		0,16-0,18	Tabor, H. y colaboradores
Negro de níquel, dos capas sobre Ni electrodepositado sobre acero dulce (después de 6 horas de inmersión en agua hirviendo)	0,94	0,07	Schmidt, R. N. y colaboradores
CuO sobre Ni (mediante electrodeposición de Cu y subsiguiente oxidación)	0,81	0,17	Kokoropoulos, P. y colaboradores
Co ₃ O ₄ sobre Ag (deposición y oxidación)	0,90	0,27	Kokoropoulos, P. y colaboradores
CuO sobre Al (mediante pulverización de una solución diluida de Cu(NO ₃) ₂ sobre placas de Al y subsiguiente estufado)	0,93	0,11	Hottel, H. C. y Unger, T. A.
Negro de cobre sobre Cu (tratamiento comercial del Cu con solución de NaOH y NaClO ₂)	0,89	0,17	Close, D. J.
Ebanol C sobre Cu (tratamiento comercial de ennegrecimiento del Cu que produce recubrimientos consistentes principalmente en CuO)	0,90	0,16	Edwards, D. K. y colaboradores
CuO sobre Al anodizado (Al tratado con una solución de Cu(NO ₃) ₂ - KMnO ₄ y estufado)	0,85	0,11	Tabor, H.
Capas de interferencia de Al, O ₃ - Mo-Al ₂ O ₃ - Mo-Al ₂ O ₃ - Mo-Al ₂ O ₃ sobre Mo	0,91	0,085 ^b	Schmidt, R. W. y colaboradores
Cristales de PbS sobre Al	0,89	0,20	Williams, D. A. y colaboradores

^aA temperaturas características de los colectores solares de placa plana.

^bMedidas a 260°C.

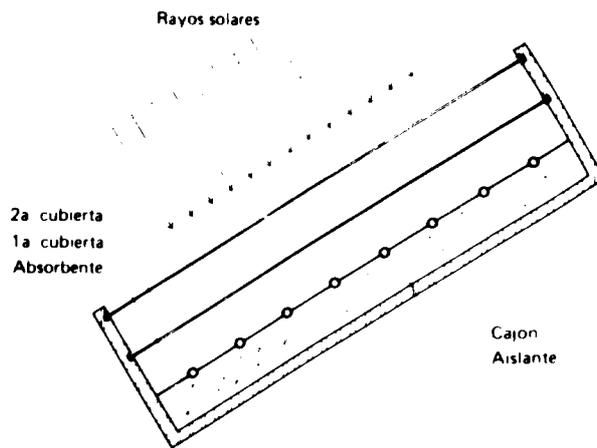


Figura 1. Sección de un colector de placa plana

conductos o tuberías soldadas al mismo. Este conjunto se coloca en un cajón que contiene un material aislante en su fondo, detrás del absorbente, y encima de éste, una o dos cubiertas transparentes que permiten el paso de los rayos de Sol (véase la figura 1).

Los absorbentes solares se construyen, por lo general, con los siguientes metales:

Metal	Conductividad térmica a 100°C ($W m^{-1} C^{-1}$)
Cobre	393,56
Aluminio	217,71
Latón (60/40)	121,42
Acero	66,99

En la obra de McDonald mencionada en la bibliografía se incluyen datos sobre los diversos tipos de recubrimiento y dónde pueden obtenerse. El cuadro 1 describe las propiedades de algunos recubrimientos superficiales utilizados en los colectores de placa plana.

En el cuadro 2 se señalan las propiedades de los materiales aislantes más comúnmente utilizados. La figura 2 muestra las curvas relativas a tres tipos de

CUADRO 2. PROPIEDADES DE MATERIALES AISLANTES DE USO COMÚN EN COLECTORES DE PLACA PLANA

Material	Densidad aproximada (kg/m^3)	Conductividad térmica ($Wm^{-1} C^{-1}$)
Lana mineral (lana de arcilla, fibra de vidrio, lana de roca)	12-14	0,0332-0,0404
Filtro de pelo	80	0,0389
Corcho granulado	120	0,0476
Corcho regranulado (partículas de 0,474 cm)	30	0,04471
Corcho comprimido	136-176	0,0418-0,0462
Paja	10-13	0,0576
Serrín	13-240	0,0649
Vermiculita (granulada)	128	0,0721
Espuma de poliuretano, rígida	24	0,0245
Poliestireno, expandido	16	0,0303

vidrio utilizados para las cubiertas transparentes de los colectores. Es evidente que el tipo A es el mejor. La figura 3 muestra las propiedades a diversas longitudes de onda de una lámina de vidrio transparente estirado típico. Los materiales plásticos, tales como el PVF y las láminas de fibra de vidrio se han utilizado asimismo en los calentadores solares, pero son, en general, inferiores al vidrio debido al deterioro que sufren con el paso del tiempo y a elevadas temperaturas. Además, la radiación ultravioleta los descolora. Por otra parte, las cubiertas de plástico son más fáciles de instalar y cuidar que las de vidrio.

El análisis teórico de un colector de placas planas está hoy bien establecido y puede resumirse en la ecuación $\dot{Q}_0 = \dot{Q}_a - \dot{Q}_l$, donde \dot{Q}_0 es la energía

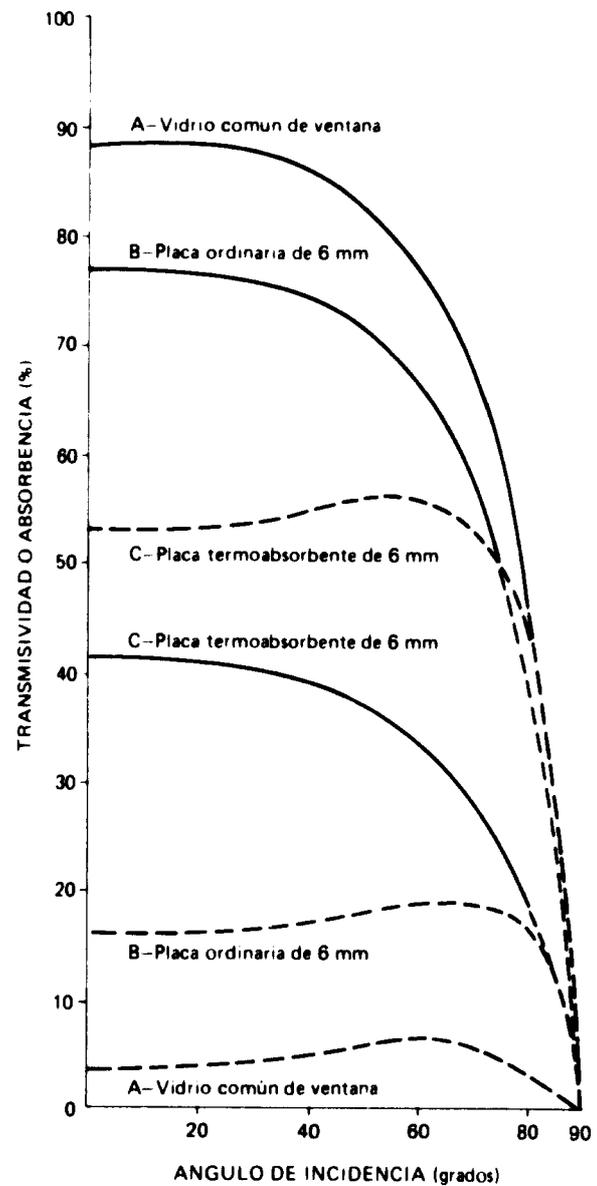


Figura 2. Transmisividad y absorbencia de materiales de vidrio común. Las curvas de trazo continuo representan la transmisividad; las curvas segmentadas la absorbencia

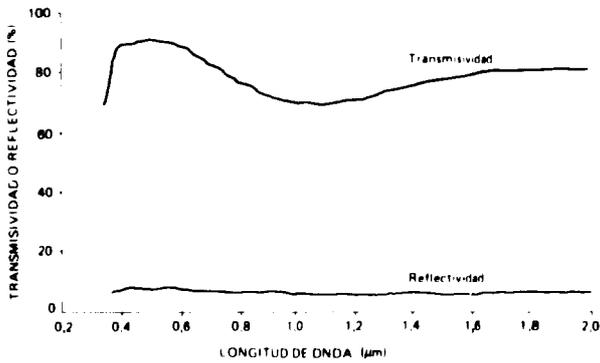


Figura 3. Transmisividad y reflectividad de una lámina típica transparente de vidrio estirado con respecto a distintas longitudes de onda. El vidrio es del tipo DME INT 528; 3,96 mm de espesor

incidente, Q_a es la energía absorbida por el colector y Q_L es la energía que se pierde en el entorno. El valor de Q_a dependerá en gran medida de los materiales con que está construido el colector, de su recubrimiento y del ángulo de incidencia de los rayos solares. La figura 4 muestra el efecto del ángulo de incidencia sobre la absorbencia de la superficie.

Hattel y Woerts (1942) desarrollan plenamente el tratamiento teórico matemático de las pérdidas de calor de las partes superior, inferior y laterales de los colectores. Klein (1973) también estudia las pérdidas térmicas de la parte superior de los colectores e incluye correcciones relativas al ángulo que el colector forma con la horizontal.

Si se considera la distribución de temperatura a través del absorbente y la eficiencia de la disposición de los tubos con aletas puede determinarse Q_o así como el rendimiento del colector. La figura 5 muestra las variaciones de la eficiencia del colector en función

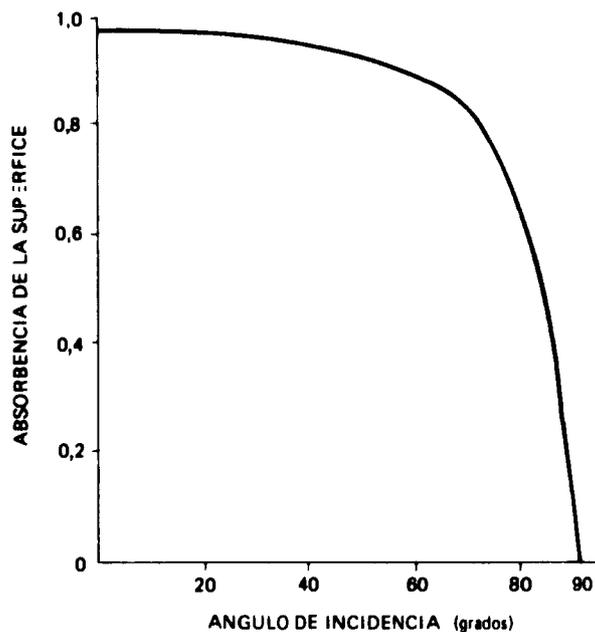


Figura 4. Efecto del ángulo de incidencia sobre la absorbencia de la superficie

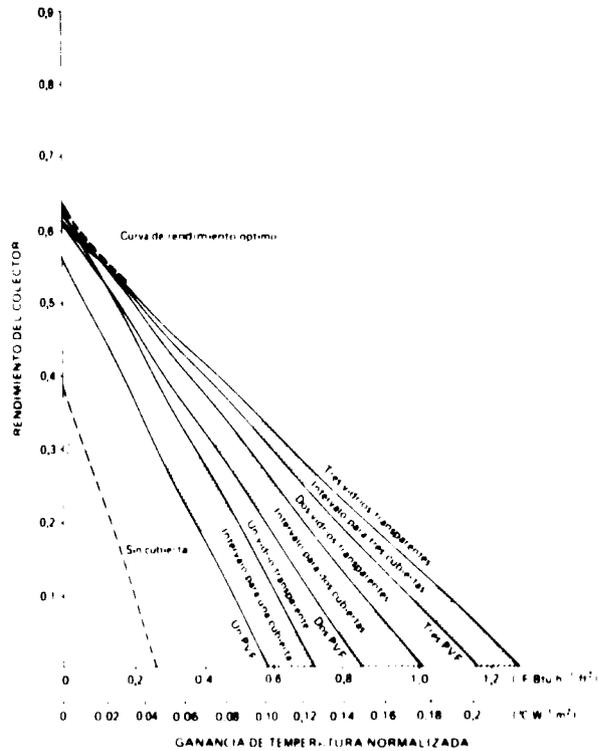


Figura 5. Rendimiento de un colector en función del tipo y número de cubiertas

de la ganancia de temperatura normalizada, esto es: la ganancia de temperatura por el colector por unidad de insolación para diferentes tipos de cubierta.

Al elevarse la temperatura del colector disminuye su eficiencia debido al aumento de las pérdidas térmicas en el entorno. El uso de más de una cubierta de vidrio aumenta la eficiencia a altas temperaturas del colector, pero reduce la cantidad de calor absorbido. En teoría, la curva óptima de funcionamiento es la que indica la línea de trazos de la figura 6; pero en la práctica es evidentemente

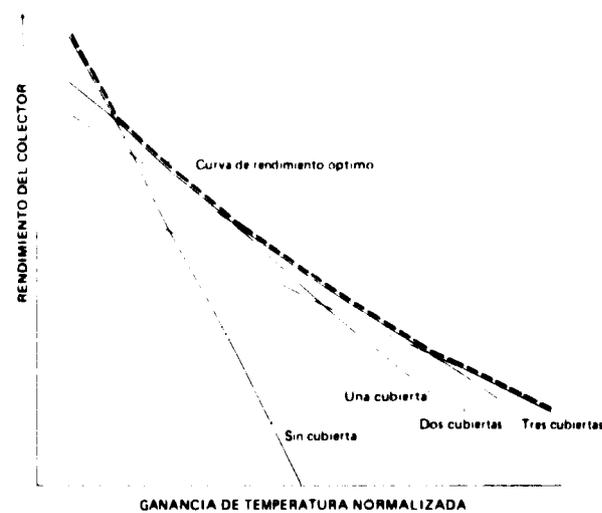


Figura 6. Rendimiento del colector según el número de cubiertas

imposible obtener tal curva ya que exige un diferente número de cubiertas a diferentes temperaturas.

Optimización y observaciones

Para obtener el mejor diseño posible se procurará establecer la dimensión óptima del vano de aire entre el absorbente y las cubiertas de vidrio. En nuestros estudios sobre este problema hemos hallado que la distancia óptima se encuentra entre 4 cm y (debido al efecto de sombra lateral causado por el cajón del colector) 8 cm. En la figura 7 se ha trazado el coeficiente conductivo-convectivo (C_L) contra el valor de dicha distancia (L). Este coeficiente se halla relacionado con el número Nu de Nusselt (que tiene el valor de la unidad en el caso de la pura conducción y valores más elevados cuando la convección es importante) mediante la ecuación $C_L = NuK/L$, donde K es la conductividad del fluido en el vano. La figura 8 muestra el rendimiento de una placa absorbente de un colector. En la parte superior de dicha figura puede verse cómo varía la temperatura en distintos puntos de la placa; en la parte inferior de la figura puede verse que la temperatura del agua es más baja que la de la placa absorbente en el centro de la aleta en casi 10°C . Esta diferencia de temperatura es del mismo orden en toda la gama de temperaturas en la dirección de flujo.

La mayor parte de los colectores de placa plana de fabricación industrial tienen un rendimiento que varía entre el 50% y el 67%. La distribución de las pérdidas térmicas es la siguiente:

Tipo de pérdida	Porcentajes
Borde	1-3
Fondo	5-10
Radiación	5-7
Convección	22-30

Puede verse que, para mejorar el rendimiento de un colector, deben reducirse a un mínimo las pérdidas debidas a la convección. Para que no se produzca convección Nu debe valer la unidad, y el número Ra

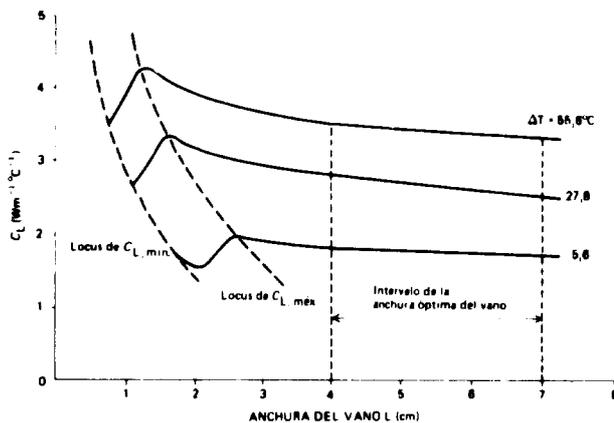


Figura 7. Coeficiente conductivo-convectivo del vano (C_L) en función de la anchura del vano a $T = 70^\circ\text{C}$, ángulo de inclinación 40°

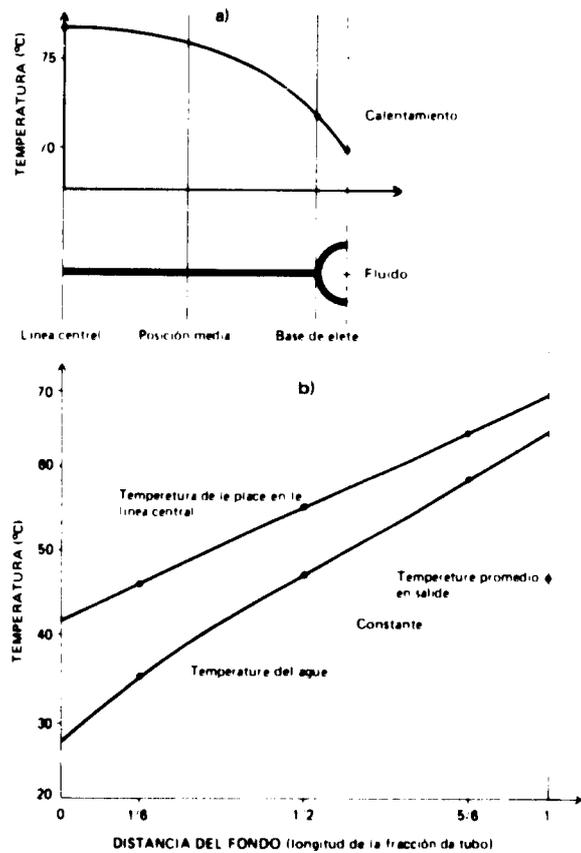


Figura 8. Distribución de temperatura en la placa termoabsorbente de un colector

- a) variación transversal de la temperatura de la placa;
- b) variación de la temperatura de la placa y del agua en la dirección de flujo

de Rayleigh deberá ser menor de 1.708 (figura 9). Hay dos métodos para reducir la convección. El primero consiste en producir un vacío (parcial o total) en el interior del colector. Un vacío parcial es

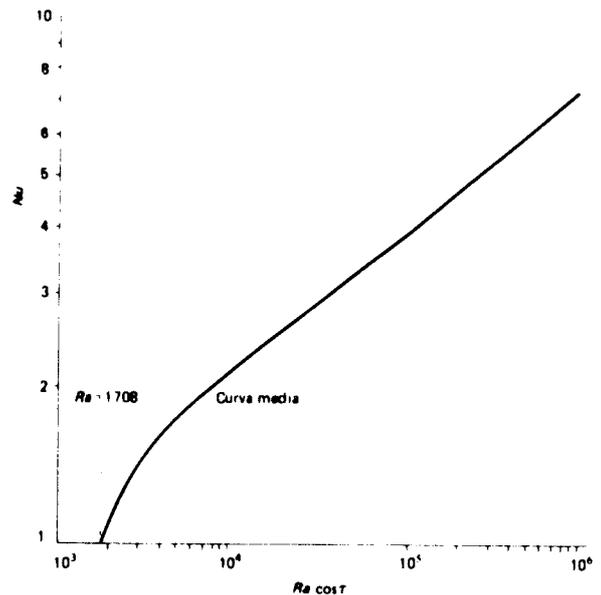


Figura 9. Número de Nusselt en función del número de Rayleigh multiplicado por el coseno del ángulo de inclinación

sólo efectivo con superficies selectivas; no es efectivo en colectores con superficies pintadas.

El segundo método para reducir pérdidas debidas a la convección consiste en colocar paneles transparentes en el vano de aire. La figura 10 ilustra el efecto de este tipo de estructura sobre el valor Ra . El parámetro a mencionado en la figura se define como $\pi \sqrt{5}(d/w)$, donde d es la profundidad y w la anchura de la célula del panel. Para suprimir la convección deberá elegirse un panel que haga que el colector funcione en la región estable de la figura 10.

En la figura 11 se muestra un ejemplo del efecto de la ganancia de temperatura sobre la eficiencia del colector, en tanto que en la figura 12 se indica cómo varió la temperatura del vidrio de un colector de placa plana real durante un breve periodo en un día determinado.

Cuestiones prácticas

Las siguientes cuestiones deben tomarse en consideración al construir colectores de placa plana:

a) A menudo se utilizan productos adhesivos inferiores para pegar las cubiertas de vidrio al cajón del colector. Ello se debe a que es preferible que la presión del vano del colector se iguale con la atmosférica para reducir así pérdidas por convección y por conducción en el aire, lo cual sólo puede conseguirse con cubiertas que no sean herméticas. Sin embargo, el resultado es que el polvo y la humedad penetran en el colector y erosionan la superficie de la placa del absorbente;

b) Los materiales aislantes pueden contener humedad antes de ser introducidos en el colector. Al calentarse éste, la humedad se evapora y condensa en la superficie interior del vidrio y dificulta el paso de la radiación incidente. Dicha condensación produce asimismo corrosión en la placa del absorbente;

c) Debe tenerse en cuenta la expansión del vidrio, y biselarse, además, los bordes del colector para impedir que la lluvia penetre en éste;

d) El colector no debe ponerse en funcionamiento sin líquido en su interior. De otro modo, las elevadas temperaturas internas causarán una expansión anormal de las cubiertas que pueden distorsionarse o quebrarse;

e) Con objeto de evitar las consecuencias de la congelación del agua en los tubos puede utilizarse una mezcla de agua y etileno-glicol;

f) El área de un colector no debe exceder de 2 m^2 ;

g) Para reducir la cantidad de radiación infrarroja que escapa del colector pueden utilizarse cubiertas de vidrio con un recubrimiento especial, el cual debe aplicarse en el interior de dichas cubiertas.

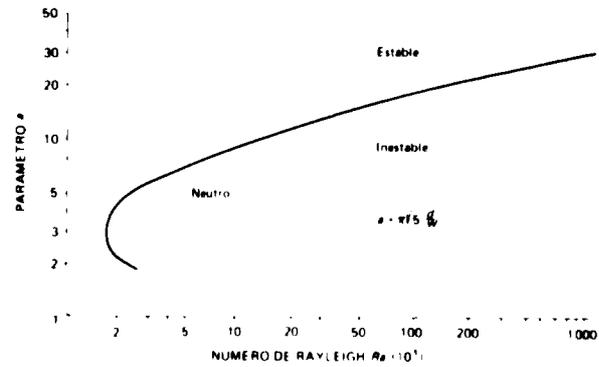


Figura 10. Estabilidad de $a \cdot Ra$ de paneles en el vano de aire de un colector

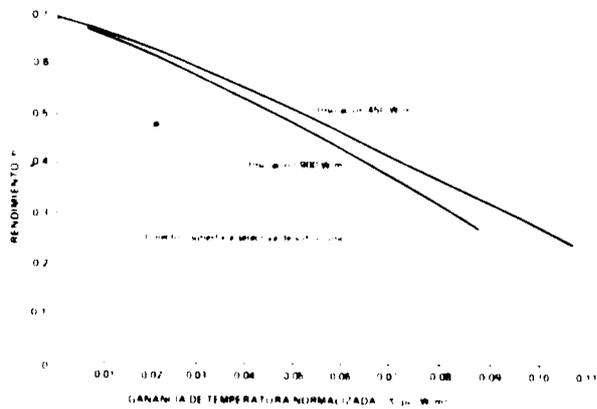


Figura 11. Rendimiento de un colector como función de la ganancia de temperatura y de la insolación. La ganancia de temperatura se normaliza dividiendo la diferencia entre la temperatura media del fluido y la temperatura de entrada por la insolación media

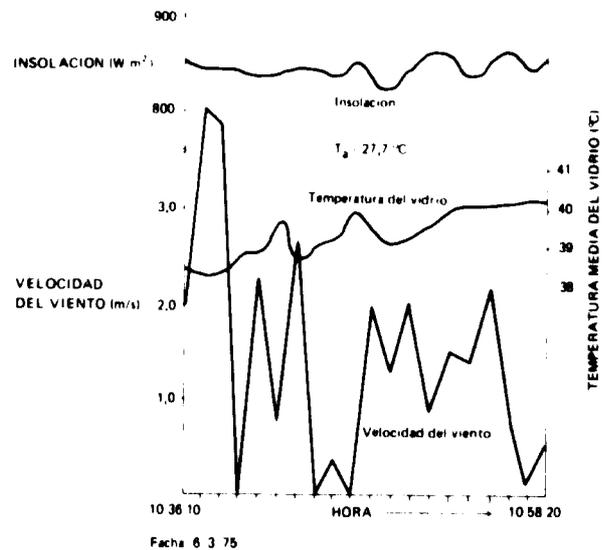


Figura 12. Variación de la temperatura del vidrio de un colector real de placa plana durante un breve periodo en un día determinado. Se muestran también las variaciones de insolación y de velocidad del viento durante el mismo periodo

BIBLIOGRAFIA

- Ackerman. *The utilization of solar energy. Annual report.* Washington, D.C., Smithsonian Institution, 1915. págs. 141-146.
- Chinnery, D. N. W. *Solar water heating in South Africa.* NBRI information sheet (Pretoria) 44.
- Close, D. J. *Flat plate solar absorbers: the production and testing of a selective surface for copper absorber plates.* Melbourne, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1962 (Report E.D.7).
- Duffie, J. A. y Beckmann, W. A. *Solar energy thermal processes.* Nueva York, Wiley Interscience, 1974.
- Edwards, D. K. y colaboradores. *Basic studies on the use and control of solar energy.* University of California, Department of Engineering, octubre de 1960 (Report 60-93).
- Hottel, H. C. y Woertz, B. B. *The performance of flat plate solar heat collectors.* American Society of Mechanical Engineers. Quarterly transactions (Nueva York), 64:91-104, 1942.
- Hottel, H. C. y Unger, T. A. The properties of a copper oxide-aluminium selective black surface absorber of solar energy. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 3: 10:3, 1959.
- Klein, S. A. The effects of thermal capacitance upon the performance of flat-plate solar collectors. M.S. thesis. University of Wisconsin, 1973.
- Kokoropoulos, P., Salam, E. y Daniels, F. Selective radiation coatings-preparation and high temperature stability. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 3:19:4, 1959.
- Kondratyev, K. Ya. y Fedorova, M. P. Radiation regime of inclined surfaces. Paper prepared for the Solar Energy Symposium, Ginebra, 30 de agosto-3 de septiembre de 1976.
- McDonald, Glen. Research highlights choice of coatings. *Solar engineering* (Dallas), 23 octubre de 1976.
- Meinel, A. B. y Meinel, M. P. *Applied solar energy: introduction.* Londres, Addison-Wesley, 1976.
- Sabbagh, J. A., Sayigh, A. A. M. y El-Salam, E. M. Solar water heaters in Saudi Arabia. Trabajo preparado para la Seventh Arab Scientific Conference, Cairo, 1973.
- Sayigh, A. A. M. Investigation into solar heating with some methods for convection suppression. Trabajo para Solar Cooling and Heating, A National Forum, Miami Beach, Florida, 13-15 de diciembre de 1976.
- . The uses of solar energy. Trabajo preparado para el Cultural Activity Programme, College of Engineering, University of Riyadh, Arabia Saudita, 4 de abril de 1974.
- . *Solar energy engineering.* Londres, Academic Press, 1977.
- Schmidt, R. N., Park, K. C. y Janssen, E. High temperature solar absorber coatings. Honeywell Research Centre, septiembre de 1964 (Part two, technical report ML-TDR-64-250).
- Tabor, H. *Selective surfaces for solar collectors.* Low temperature engineering applications of solar energy. Nueva York, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 1967.
- . *Solar energy collector design with special reference to selective radiation.* Research Council of Israel, 1955 (Bulletin 5C).
- . Stationary mirror systems for solar collectors. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.) 2:3-4:27-33, 1958.
- . y colaboradores. Further studies on selective black coatings. Documentos de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre nuevas fuentes de energía, Roma, 21-31 de agosto de 1961 (*Solar Energy*: 1, vol. 4, pág. 618 (S/46). Número de venta: 63.1.38).
- Williams, D. A., Lappin, T. A. y Duffie, J. A. *Selective radiation properties of particulate coatings.* American Society of Mechanical Engineers. Quarterly transactions (Nueva York), 85A:213, 1963.
- Zarem, A. M. y Erway, D. D. *Introduction to the utilization of solar energy.* Nueva York, McGraw-Hill, 1963.

Consideraciones sobre las piscinas calentadas con energía solar

Gangolf Bräunlich

Institut für Umweltschutz, Graz, Austria

Conceptos básicos

Todo proyecto destinado a popularizar el uso de la energía solar debe cumplir algunas de las condiciones siguientes:

- a) Presentar ventajas económicas;
- b) Beneficiar a la mayor cantidad posible de personas;
- c) Ser visitado por muchas personas.

Los proyectos relativos al calentamiento de las piscinas por medio de la energía solar significan, por consiguiente, un excelente medio para dar a conocer al público la tecnología de dicho tipo de energía. En comparación con algunos de los numerosos usos posibles de la energía solar, tales proyectos presentan importantes ventajas, entre las que se encuentran:

- a) Las temperaturas de trabajo son relativamente bajas;
- b) No es necesario un calentamiento auxiliar;
- c) No se plantean problemas de almacenamiento térmico.

Colectores

Recubrimiento

El problema del recubrimiento de los colectores puede concretarse en dos preguntas: ¿Deberá consistir el recubrimiento en vidrio o en un material sintético? ¿Deberá comprender una o varias capas?

Los recubrimientos sintéticos son más fáciles de aplicar que el vidrio; tienen poco peso y son elásticos y resistentes a los choques térmicos. Sin embargo, son sensibles al sobrecalentamiento y a las propiedades ópticas de la superficie; son asimismo inflamables, y aún no está probada su estabilidad química tras largos períodos de uso. El tipo de recubrimiento dependerá de la preferencia del propietario de la piscina y de la especial ubicación de ésta.

Como la temperatura de funcionamiento de los colectores de tales piscinas debe ser baja, se utilizarán únicamente colectores de un solo recubrimiento. En regiones en las que la temperatura del aire tiende a mantenerse aproximadamente igual a la del agua de la piscina podrá omitirse el recubrimiento. Nunca deberán utilizarse dos recubrimientos ya que las pérdidas por reflexión en el segundo recubrimiento serán superiores a la reducción de las pérdidas térmicas que éste produzca, siempre que la temperatura de funcionamiento sea inferior a 50°C.

Capacidad térmica específica

La masa del colector impide la ganancia de energía debido a las pérdidas de energía restante del sistema colector tras su funcionamiento. Dicha masa influye también sobre la rapidez del aumento de temperatura.

Existen tres métodos para evitar las pérdidas de energía restante:

- a) La masa térmica del sistema colector puede hacerse aproximadamente cero;
- b) Toda la energía del sistema colector puede transferirse al sistema de utilización;
- c) El sistema colector puede diseñarse de modo que se eviten casi totalmente las pérdidas térmicas durante los períodos de no funcionamiento.

La mayoría de los diseñadores de equipo de energía de origen solar utilizan únicamente el primer método. Sin embargo, en todos los casos en los que los colectores solares transfieren su energía a un sistema de muy baja temperatura (temperaturas próximas a la ambiente) la energía térmica del sistema colector se transmite totalmente al sistema de utilización. Esta condición se cumple en el caso de los colectores para el calentamiento de piscinas. En este caso no se producen pérdidas de energía restante al cesar el funcionamiento. El tercer método para evitar dichas pérdidas consiste en impedir que el sistema colector se enfrie cuando cesa el funcionamiento.

Para esto se necesita un buen aislamiento térmico durante los periodos de no funcionamiento, lo que, aunque es posible, resulta excesivamente costoso.

En algunas aplicaciones pueden resultar necesarios rápidos aumentos de temperatura del sistema colector, pero un colector "rápido" pierde más energía que uno "lento" si el transporte de calor y el sistema de transferencia térmica no permiten alcanzar el máximo valor de energía térmica sin experimentar una innecesaria elevación de la temperatura. Un colector plano típico pierde del 1 al 2% de su eficacia por cada grado de elevación de temperatura. Un colector "lento" evita esas pérdidas en los sistemas con un bajo factor de transporte térmico (esto es, la energía térmica transportada por unidad de diferencia de temperatura). Los colectores "rápidos" suministran innecesarios máximos de temperatura cuando se los utiliza para calentar piscinas, y necesitan bombas de muy alta calidad que resistan las continuas puestas en marcha e interrupciones de su funcionamiento.

Características hidráulicas

La propiedad más importante que debe perseguirse en el diseño es el bajo consumo de energía de las bombas de circulación de agua. Un buen sistema colector sólo necesita 5 W/m^2 para impulsar el agua con velocidad suficiente para impedir un aumento de la temperatura del colector superior a 8°C . El consumo de electricidad de tal sistema durante el verano es aproximadamente el 1% de la ganancia neta de energía. Sin embargo, existen sistemas colectores que usan más del 10% de la ganancia de energía para alimentar las bombas de circulación; esto reduce la cantidad de electricidad que puede producir la superficie del colector.

Control de las bombas

La bomba de circulación del sistema colector debe estar controlada por un dispositivo electrónico que la detenga cuando la temperatura del agua de la piscina exceda la temperatura del colector. Más importante aún que la diferencia de temperatura a la que el sistema inicia su funcionamiento es la diferencia de temperatura a la que se detiene la bomba. La temperatura del colector aumenta con la creciente tasa de transferencia térmica a través de los intercambiadores de calor. Por consiguiente, hay una diferencia mínima de temperatura entre el agua del colector y el agua de la piscina a la que la bomba del colector debe hallarse aún en funcionamiento a fin de que el calor transferido a la piscina corresponda a la ganancia de energía a baja insolación. En el caso de

una piscina bien concebida, esta diferencia de temperatura se encontrará en la gama de $0,5^\circ$ a $1,5^\circ\text{C}$. Dependiendo de la masa térmica del colector, el punto de entrada en funcionamiento del sistema deberá corresponder a una diferencia de temperatura de 2° a 6°C pues de otro modo se producirán continuas detenciones y puestas en marcha de la bomba.

El intercambiador térmico

Para los colectores que funcionan a altas temperaturas pueden resultar suficientes los pequeños intercambiadores de calor. Sin embargo, una elevada temperatura del colector reduce su eficacia, lo que obliga a aumentar el número de colectores. Para determinar el tamaño óptimo del intercambiador térmico se deberán tener en cuenta los costos relativos del colector y del intercambiador. Sobre la base de los actuales precios en Austria, un intercambiador de calor económicamente viable producirá una transferencia térmica a razón de 50 W por grado Celsius y por metro cuadrado de superficie del colector.

Control de la temperatura de la piscina

La mejor manera de impedir el sobrecalentamiento de la piscina es enfriarla añadiendo agua fría. Si esto no es posible cabe aplicar otro método: si se reduce el transporte de calor bien sea en el bucle del colector o en la circulación del agua de la piscina se elevará la temperatura del colector y disminuirá la eficacia del sistema colector. Como en el caso de una piscina al aire libre los conductos de dicho sistema no necesitan aislamiento térmico, la ganancia de energía por los colectores puede reducirse a cero por medio de tales conductos sin correr riesgo de ebullición.

Conclusiones

Para poder utilizar con razonable eficacia la energía solar para la calefacción de locales en Austria en un futuro próximo será necesario combinar los colectores con bombas térmicas. Las condiciones de funcionamiento para alimentar la bomba térmica a partir de colectores solares son las mismas que las existentes en el caso del calentamiento de piscinas.

Únicamente cuando el diseño del sistema no alcanza el valor óptimo resulta el rendimiento menos satisfactorio que el que se obtiene en el calentamiento

de las piscinas. La relación entre los costos y el grado de insolación de que se dispone es muy desfavorable en el caso de la calefacción de locales, por lo que para el desarrollo del uso de la energía solar es muy importante el progreso de este tipo de tecnología.

Experiencia práctica

El Institut für Umweltschutz ha proyectado y construido diversas piscinas calentadas con energía solar y suministrado consultores para otros proyectos similares. Sus principales actividades se han concentrado en la proyección y construcción del sistema colector más grande de Austria instalado en la piscina al aire libre de Eggersdorf.

Se necesitó aproximadamente un año para preparar el proyecto de esta piscina, precisándose calcular la conversión de energía y otros factores diversos. La experiencia práctica así conseguida resultó de gran utilidad. La construcción se inició en la primera semana de mayo de 1976 y consistió en la edificación de un nuevo recinto y la modificación del tejado. El tejado original de dos aguas se convirtió en uno de una sola vertiente cubierto de cemento de asbesto ondulado. Durante la construcción no se interrumpió el funcionamiento normal de la piscina. La inauguración oficial del sistema de calentamiento solar tuvo lugar el 10 de

julio de 1976. El empleo de mano de obra local contribuyó a acortar el tiempo de construcción.

Los datos principales de la piscina de Eggersdorf son:

Area de la superficie de la piscina	300 m ²
Volumen de agua en la piscina	1 300 m ³
Espacio circundante abierto	15 000 m ³
Aforo	1 500 personas

La piscina está calentada por medio de tres sistemas distintos con un total de 360 colectores, cada uno de los cuales tiene una superficie absorbente de 1,55 m², o sea una superficie total neta de 558 m². Esto permite una producción de energía térmica de unos 450 kW.

En cada sistema se han introducido los siguientes elementos: bomba de circulación (1.1 kW), una válvula de dirección única, un tanque de expansión, una válvula de presión, un intercambiador térmico, y un termostato diferencial.

Inmediatamente después de la inauguración de la piscina hubo varios días soleados. La temperatura del agua alcanzó un valor récord de 27°C. Durante el periodo de mal tiempo inmediatamente siguiente, la temperatura osciló entre 22° y 24°. La piscina funcionó con la misma frecuencia que otras piscinas, y el volumen de público sólo disminuyó cuando descendió la temperatura ambiente. La temperatura del agua pudo mantenerse continuamente por encima de la temperatura del aire después de la instalación del sistema de calentamiento con energía solar.

Sistema para la utilización de la energía solar en invernaderos

M. Posnansky

Polisolar Ltd., Berna, Suiza

La función de un invernadero es suministrar a las plantas en todas las estaciones del año la luz y el calor que necesitan para su crecimiento óptimo. Los invernaderos consumen considerable cantidad de energía térmica, gran parte de la cual reciben directamente del sol. El proceso mediante el cual se mantiene el balance térmico de un invernadero es bien conocido y se denomina efecto de invernadero o de invernáculo (figura 1).

los periodos frios y se aísla el ambiente durante la noche.

El elemento principal del sistema consiste en colectores concentradores de la radiación solar instalados en series paralelas a la altura de los tirantes del techado, a unos 2.20 a 2.80 metros sobre el suelo. Los colectores solares son dispositivos cilindricos parabólicos concebidos, a diferencia de los colectores concentradores ordinarios, para reflejar la luz por sus

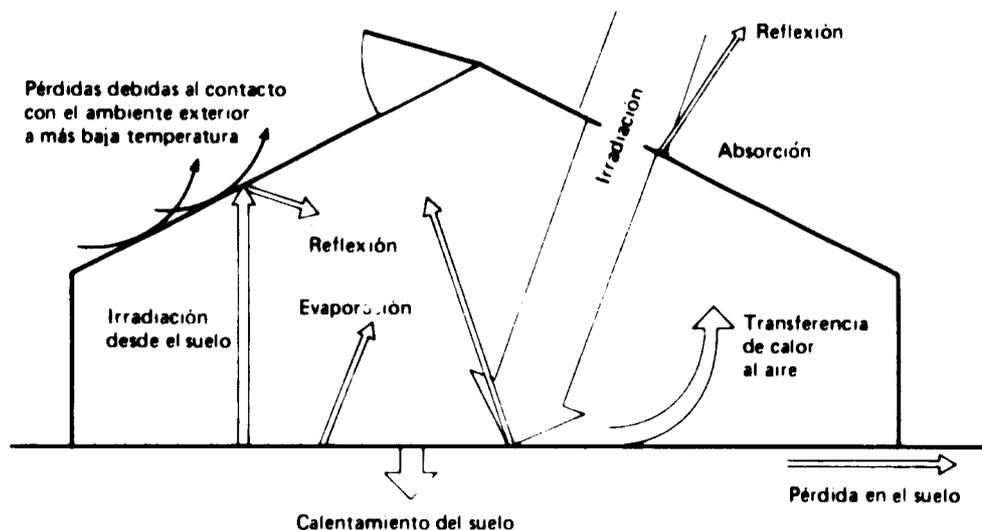


Figura 1. El efecto de invernadero

La mayoría de las especies vegetales necesitan sombra durante los meses de verano. Así, antiguamente, casi todos los invernaderos se cubrían permanentemente con persianas durante el estío. Así sigue haciéndose, hasta cierto punto, hoy en día, si bien ha ido ganando terreno la noción de emplear persianas o sombreros móviles o variables. La dosificación de la sombra es hoy un medio práctico para controlar el ambiente en el interior del invernadero, y más especialmente su temperatura.

El sistema que aquí describimos sirve para absorber o eliminar calor de modo que el sector del invernadero donde crecen las plantas se mantenga a la temperatura adecuada. Mediante el mismo se procura sombra para las plantas, se calienta el recinto durante

dos caras. Un sistema especial de control coloca automáticamente a los colectores en la posición debida respecto del sol por medio de un sistema eléctrico de transmisión (figura 2).

La eliminación de energía térmica por medio de los conductos que componen el sistema absorbente mantiene la temperatura a valores más bajos que los de los invernaderos con persianas corrientes. Como ambas superficies del colector son reflectoras, la mayor parte de la luz indirecta puede dirigirse hacia el interior del invernadero casi durante todo el día.

La figura 3 muestra las láminas del colector en la posición adecuada para recoger la radiación difusa durante periodos de mal tiempo. Además, cuando el ángulo de incidencia de las radiaciones alcanza

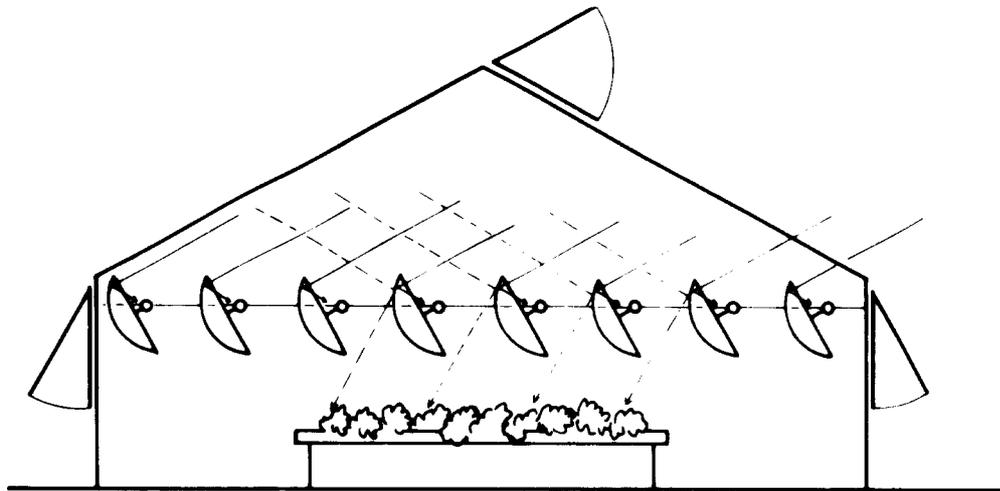


Figure 2. Invernadero con colectores solares concentradores

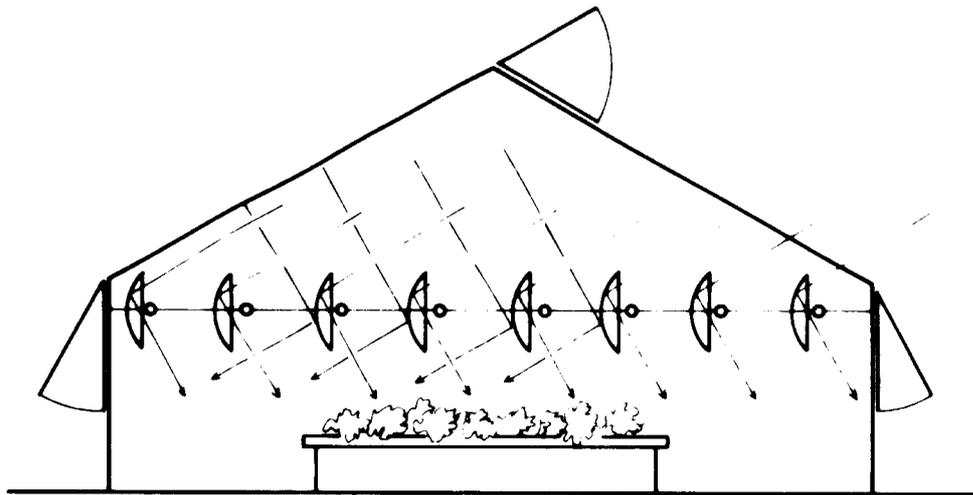


Figura 3. Posición de los colectores para recoger la radiación difusa

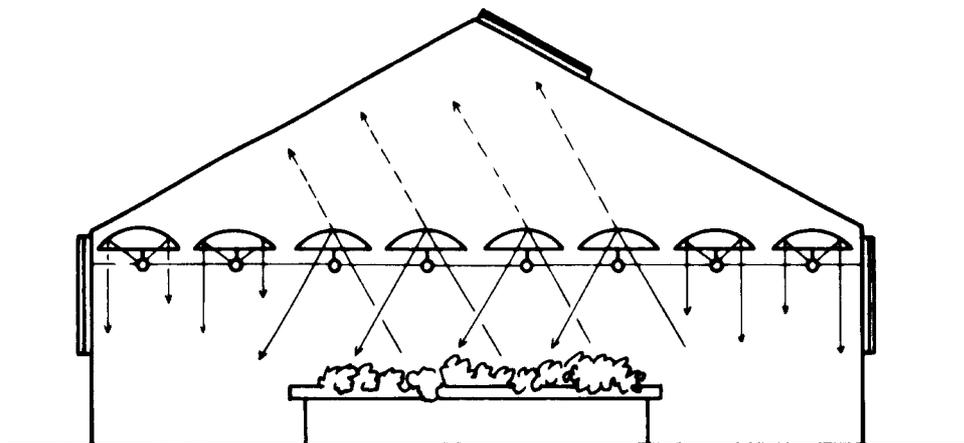


Figura 4. Posición de los colectores durante la noche

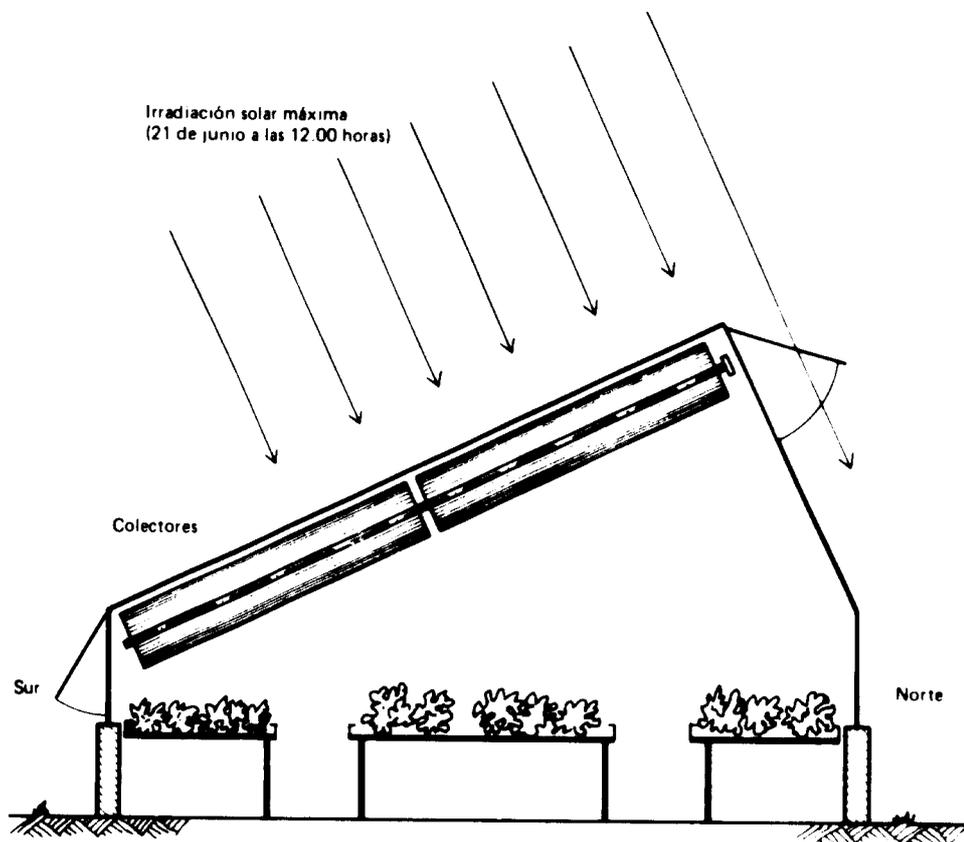


Figura 5. Invernadero para la utilización de la energía solar

determinado valor, el sistema eléctrico de transmisión coloca las láminas del colector en la posición vertical indicada. En tal posición la luz no encuentra obstáculo alguno para entrar en el invernadero.

La figura 4 muestra la instalación durante la noche. Al atardecer, las láminas adoptan automáticamente una posición horizontal encima de los conductos del absorbente, lo cual se consigue por medio de un sensor que, cuando aumenta la oscuridad, hace que el sistema electrónico de control ponga en movimiento el motor que coloca las láminas en posición horizontal. En esta posición nocturna, los colectores impiden el paso de la radiación hacia el exterior. El calor procedente de las plantas se refleja en los colectores y permanece en el interior del invernadero.

Como depósito de la energía térmica excedente puede utilizarse un acumulador convencional (tanque o pozo). Cuando el invernadero necesita calor adicional, la bomba de recirculación envía el agua templada desde el acumulador hacia los conductos del absorbente, que suministran entonces a las plantas la energía adicional, tras reflexión en las láminas.

Son necesarias algunas observaciones respecto de la selección del sistema colector. Cuando un tal sistema con elementos absorbentes de radiación se instala temporal o permanentemente en la superficie del techo, la pérdida de luminosidad es tan considerable cuando el colector se halla en la posición de luz difusa (posición vertical) que habrá en el

interior del invernadero insuficiente radiación luminosa para un desarrollo vegetal óptimo. Debido a esto, la superficie de las láminas del reverso del colector se han hecho también reflectoras.

En numerosos hogares, escuelas, hospitales y otras instituciones públicas existen huertos ya sea para el propio suministro de vegetales o con fines de enseñanza. Estos establecimientos requieren también grandes cantidades de energía térmica para calentar agua, aun durante los meses de verano. La mejor solución será instalar un invernadero con un sistema de calefacción que haga uso de la energía solar.

Con tal finalidad se ha concebido un tipo especial de invernadero (figura 5). En comparación con los invernaderos ordinarios, la vertiente meridional del techo es más grande, con el resultado de que la septentrional tiene una inclinación de 65° de modo que por ella no entra la luz directa del sol ni siquiera a mediodía. Los colectores están colocados paralelamente a la superficie meridional del techo. La absorción de energía alcanza un valor aproximado del 30% a lo largo del año. Esto representa una ventaja muy interesante en los casos en que la energía absorbida puede utilizarse plenamente durante el verano. Este tipo de invernáculo sirve para cultivar plantas con la misma efectividad que los invernaderos corrientes. La superficie de enfriamiento no es mayor, y el sistema de producción de sombra resulta ideal. No existen obstáculos para la ventilación, y los colectores pueden utilizarse también para fines de calefacción.

Estufas solares para el secado de madera: Su utilidad para los países en desarrollo

R. A. Plumtre

Commonwealth Forestry Institute, Oxford, Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte

Sólo en el caso de que las estufas solares para el secado de madera lleguen a ser competitivas frente a los métodos tradicionales o sirvan como procedimiento auxiliar de éstos podrá el método del secado solar utilizarse a escala comercial y superar su fase actual de interesante investigación. Todo estudio del secado en estufas solares debe, por consiguiente, iniciarse con la descripción de los principales métodos tradicionales.

Métodos tradicionales

Los métodos descritos a continuación continuarán con toda probabilidad compitiendo con el de las estufas solares, a excepción del último que es muy costoso.

Secado al aire en pilas

La madera se coloca en pilas sobre soportes apropiados en un patio al aire libre, cubiertas o no con lonas impermeables y resistentes a la luz solar. El secado se produce mediante la circulación del aire en el interior de las pilas, eliminándose así la humedad de la superficie de los tablones. La única manera de controlar la temperatura, la humedad y la tasa de circulación del aire es mediante la adecuada orientación y espaciación de las pilas y la apropiada construcción de éstas. El secado al aire, método ampliamente usado, es en apariencia económico y simple, pero los costos de mantener considerables existencias de madera durante largos períodos de conservación de los patios de secado pueden resultar considerables.

Secado al aire en cobertizos

Las pilas de madera se protegen en cobertizos sin muros. Esta protección contra la lluvia y el sol es por

lo general mejor que la obtenida en las pilas al aire libre, pero es más difícil montar cobertizos en los que la circulación del aire sea tan eficaz como la conseguida en una pila bien construida. El costo es más elevado que el del método anterior ya que la construcción de los cobertizos es más costosa.

Secado mediante corrientes de aire

En este método se hace pasar a través de la pila, generalmente bajo un cobertizo, una corriente de aire provocada por uno o más ventiladores aplicados a uno de los lados de la pila. No es necesario aplicar también calor. Este método supone el costo adicional de los ventiladores y de la corriente que los alimenta. Normalmente los ventiladores deben ser de tamaño suficiente para producir una corriente uniforme de aire a través de la pila.

Instalaciones de presecado

Los presecadores son similares a las estufas tradicionales, pero sus sistemas de calentamiento, ventilación y mandos son menos complicados. Son de mayores dimensiones que las estufas normales y se han usado extensamente en climas fríos para secar grandes cantidades de madera hasta un contenido de humedad del 20%, alcanzado el cual el secado se completa en estufas tradicionales.

Estufas tradicionales

Existen numerosos diseños de estufas tradicionales de mayor o menor complicación, pero en todos ellos la temperatura, la humedad y la ventilación están controladas para conseguir las óptimas condiciones de secado para las diferentes especies de madera. Para la eficaz utilización de una estufa es

necesario clasificar las maderas antes de la operación de secado según sus especies ya que cada una de éstas debe tratarse según un procedimiento distinto.

Deshumedecedores

Los deshumedecedores son estufas en las que no se aplica calor de origen externo; en vez de ello se refrigera el aire húmedo procedente de la estufa, lo que causa la condensación del vapor del agua. El aire así seco se deja recalentar y se realimenta a la estufa o se elimina al exterior. Este método de secado ha resultado eficaz para pequeñas cantidades de madera en climas cálidos, pero tiene la desventaja de que, como normalmente no se aplica calor a la madera, el secado de ésta es lento.

Calentamiento con ondas hertzianas

La madera puede secarse calentándola internamente con ondas hertzianas. Sin embargo este método es costoso e impracticable en el caso de grandes cantidades de madera.

Investigaciones sobre las estufas solares

La tabla siguiente contiene información sobre las estufas solares experimentales. Las investigaciones sobre la utilización de la energía solar para el secado de la madera parecen haberse iniciado más o menos simultáneamente en la India y en los Estados Unidos.

Dehra Dun, India

Rahman y Chawla¹ trabajaron a escala de laboratorio y ensayaron nueve modelos miniaturizados de estufas. En el primer modelo se utilizaba una pequeña bomba para provocar una corriente de aire a través de las tablas apiladas en el interior de una cámara. En otra cámara se calentaba el aire que pasaba luego por un conducto a la que contenía la madera. En los otros modelos se hacía circular el aire por convección a través de la pila de madera; en algunos de ellos, la cámara de calentamiento se hallaba debajo de la cámara de secado, y en algunos casos se usaba una chimenea. Se observaron limitadas ventajas respecto del secado normal con aire, pero un inconveniente común a todos los modelos era la inexistencia de un sistema para recircular el aire caliente, que así se perdía tras un solo paso a través de la madera. Desgraciadamente las investigaciones

¹M. A. Rahman y O. P. Chawla, "Seasoning of timber using solar energy", *Indian Forest Bulletin*, núm. 229 (1961).

parecen haberse detenido en ese punto; según los datos que han podido obtenerse no se han publicado posteriormente otros resultados.

Wisconsin, Estados Unidos

Peck², en sus trabajos en el Laboratorio de Investigación de Productos Forestales de Madison, Wisconsin, diseñó una pequeña estufa similar a una de secado ordinaria, pero con un tejado de vertiente meridional y una doble capa de poliéster resistente a la intemperie que recogiese la radiación y la conservara en el interior de la estufa. A una distancia de 15 cm por debajo de la capa inferior de poliéster había una lámina ondulada de aluminio pintada de negro para absorber el calor. Por medio de un ventilador se forzaba el paso del aire en contacto con ambas superficies del aluminio: el aire entraba y salía en cantidades limitadas por respiraderos. Se observó que el secado era mucho más rápido que al aire libre, calculándose que para secar la madera verde al grado de secado al aire se necesitaba sólo un 60% de tiempo. Los defectos comunes de secado también resultaron menos frecuentes que en el caso del secado al aire. El costo era aproximadamente el mismo que el del secado al aire y la mitad del del secado en estufa. Sin embargo, la estufa descrita era de reducidas dimensiones y sólo tenía capacidad para 1 m³ de madera.

Colorado, Estados Unidos

Johnson³ construyó una pequeña estufa solar en Colorado para secar madera para su propio uso. La estufa consistía en una cámara en la que las tablas se apilaban en bastidores y el calor solar se absorbía por medio de absorbentes tipo ventana en la pared meridional. El aire se circulaba por medio de ventiladores movidos por el viento. La estufa secaba tablas de 25 cm de espesor en períodos de 2 a 6 semanas según las condiciones meteorológicas.

Río Piedras, Puerto Rico

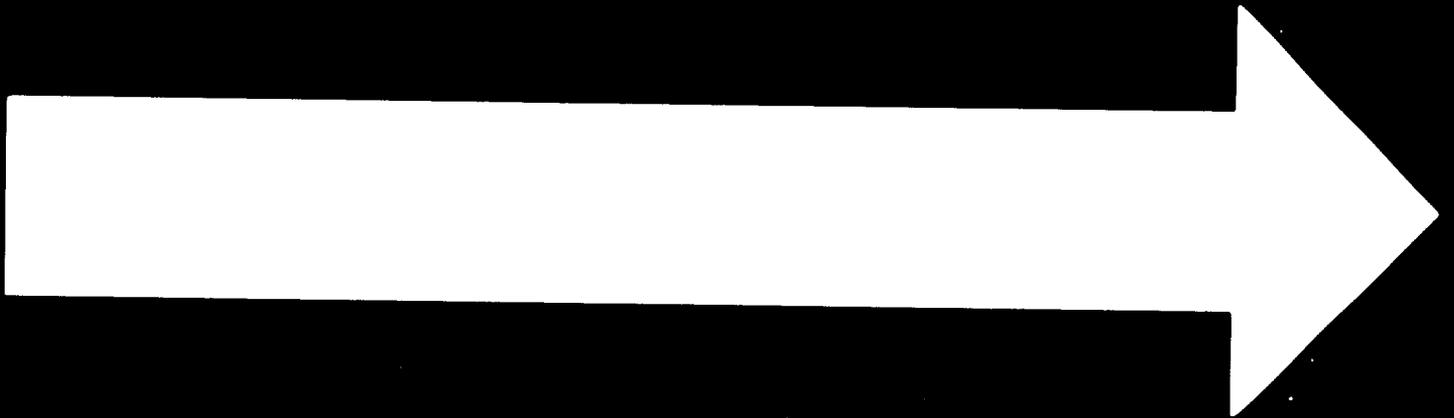
En 1962, Peck y Maldonado publicaron un trabajo⁴ en el que se describía una estufa construida en Río Piedras, Puerto Rico, con una capacidad de 4 a 5 m³ de madera. El aire se hacía circular por medio de cuatro ventiladores de 40 cm movidos por un

²E. C. Peck, "Drying 4/4 red oak by solar heat", *Forest Products Research Journal*, vol. 12, núm. 3 (1962), págs. 103-107.

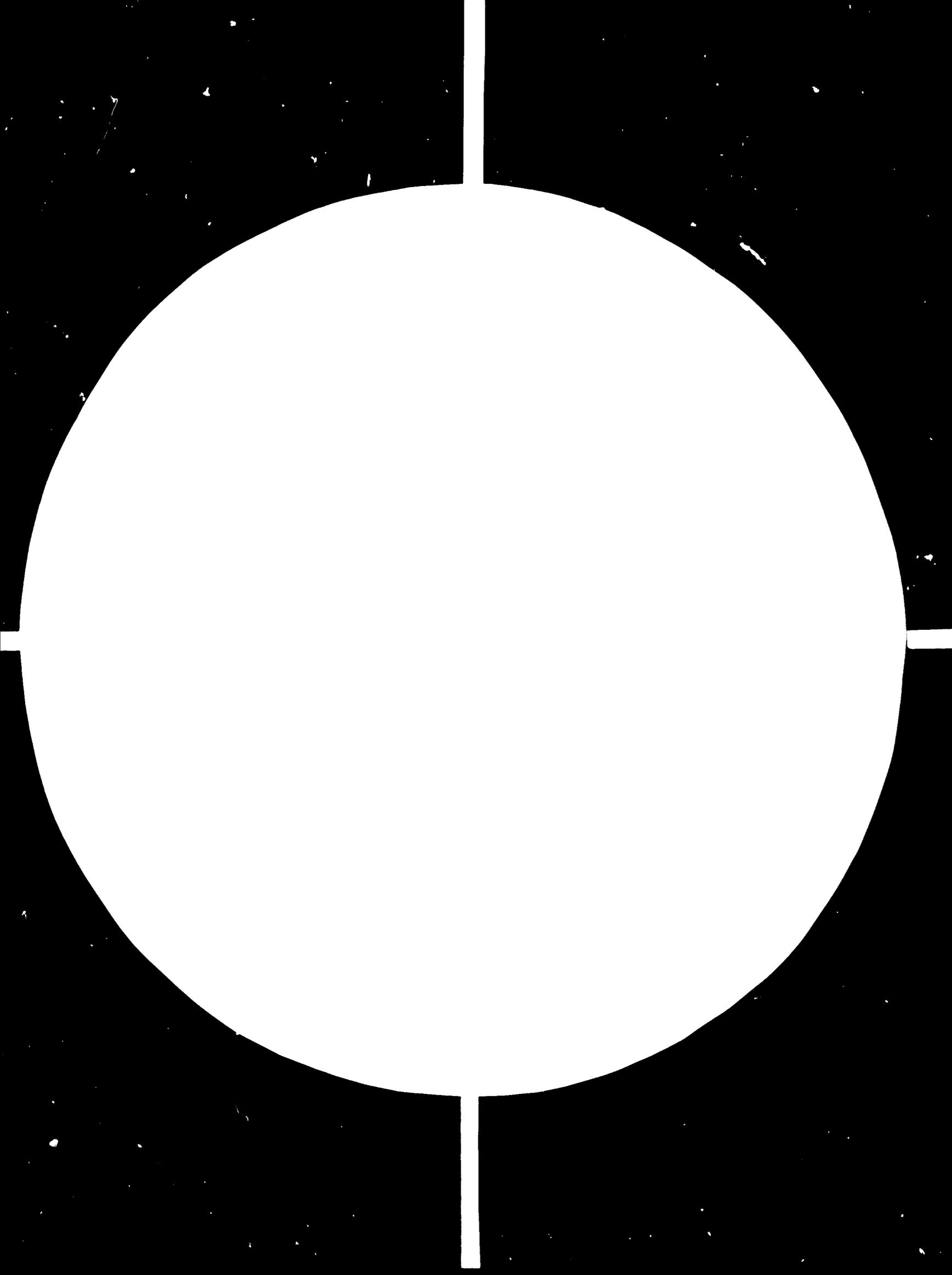
³C. L. Johnson, "Wind powered solar heated lumber dryer", *Southern Lumberman*, vol. 203, núm. 2532 (1961).

⁴E. C. Peck y E. C. Maldonado, "Drying by solar radiation", *Forest Products Research Journal*, vol. 12, núm. 10 (1962), págs. 487 y 488.

B-107



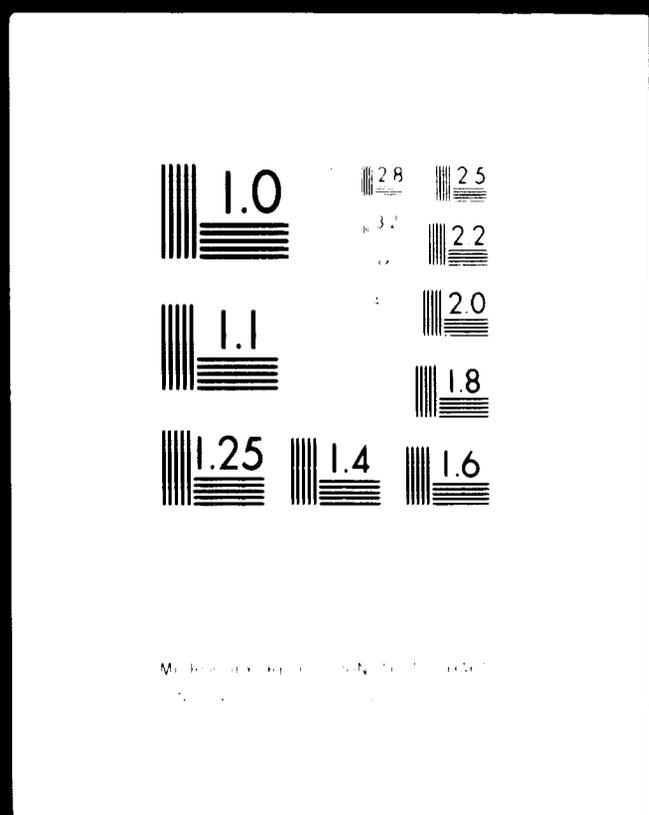
80.02.21



2 OF 2

08054

S



24x C

INFORMACIÓN SOBRE ESTUFAS SOLARES EXPERIMENTALES

Localidad	Capacidad de la estufa	Diseño
Dehra Dun, India	Nueve pequeñas estufas experimentales a escala de laboratorio	Varios diseños a base de cámaras separadas para el calentamiento del aire y de la madera; circulación del aire por convección.
Colorado, Estados Unidos	...	Tejado de vertiente meridional, capa doble de plástico, ventiladores movidos por el viento.
Wisconsin, Estados Unidos	1 m ³	Tejado de vertiente meridional, capa doble de plástico, ventilador único.
Río Piedras, Puerto Rico	4,7 m ³	Tejado de vertiente meridional, doble capa de plástico, cuatro ventiladores de 40 cm.
Río Piedras, Puerto Rico	7,1 m ³	Tejado de vidrio de vertiente meridional, capa doble de plástico, cuatro ventiladores de 40 cm.
Filipinas	1,1 m ³	Orientación norte-sur, capa única de plástico, un ventilador de 61 cm.
Uganda	3,3 m ³	Orientación norte-sur, doble capa de plástico, dos ventiladores de 46 cm, reflectores.
Fort Collins, Colorado, Estados Unidos	2,8 m ³	Tejado de vertiente meridional, recubrimiento de poliéster reforzado con fibra de vidrio, dos ventiladores de 61 cm.
Filipinas	1,1 m ³	Tejado de vertiente meridional, con recubrimiento de poliéster reforzado con fibra de vidrio, ventiladores de 61 cm.
Kumasi, Ghana	4 m ³	Invernadero modificado, ventilador único.
Tananarive Madagascar	4 m ³	Orientado norte-sur, recubrimiento de fibra de vidrio translúcido, dos ventiladores.
Moshi, República Unida de Tanzania	6 m ³	Orientado norte-sur, tejado plano de vidrio, paredes de politeno, 3 ventiladores.
Uganda	9,4 m ³	Orientación norte-sur, tejado de dos vertientes, recubrimiento de poliéster impermeable (dos capas), cuatro ventiladores de 51 cm, reflectores.
Uganda	18,9 m ³	Orientación norte-sur, tejado de dos vertientes, 6 ventiladores de 51 cm, recubrimiento de FPV impermeable (dos capas).

motor de 1,5 HP (1,1 kW). Por lo demás, el diseño de esta estufa era casi idéntico al de Wisconsin.

En 1966, Chudnoff, Maldonado y Goytia publicaron un detallado informe sobre el funcionamiento de un modelo ampliado de la estufa de Peck y Maldonado en Río Piedras⁵, informe que representa una de las aportaciones más importantes a la literatura sobre estufas solares. Aumentando las dimensiones del modelo anterior se había obtenido ahora una capacidad de 7,1 m³, y la película de fluoruro de polivinilo (FPV) de 0,025 mm que se había usado para recubrir el interior de la estufa tuvo que ser sustituida por una de 0,05 mm después de un año de funcionamiento. La película de recubrimiento del techo (FPV de 0,05 mm) tuvo asimismo que ser reemplazada por láminas de vidrio al cabo de dos años. El deterioro del plástico parecía deberse

principalmente a la flexión, aunque también se observó en la película del techo cierta tendencia al resquebrajamiento debida a la degradación del material causada por la radiación ultravioleta. Posteriormente se realizaron ensayos con película de FPV de 0,1 y 0,125 mm resistente a los agentes atmosféricos.

Se comparó la velocidad del secado al aire y del secado en estufa solar en diversas condiciones atmosféricas, incluida la de abundancia de radiación solar. En el interior de la estufa la temperatura era de 15,5°C sobre la exterior y la humedad un 25% más baja. El valor de equilibrio higrométrico de la madera secada al aire variaba del 13% al 15% según la época del año, mientras que el del interior de la estufa se mantenía entre 8 y 10%. Se llevaron a cabo ensayos con diversas especies de madera clasificadas en caoba (*Swietenia macrophylla*) y maderas duras diversas con diferentes pesos específicos desde 0,48 a 0,82 a un contenido higrométrico del 12%. El contenido de humedad de la caoba de 25 mm de espesor descendió

⁵M. Chudnoff, E. C. Maldonado y E. Goytia, United States Forest Service Research and Paper No. ITF-2 (Río Piedras, Puerto Rico, Institute of Tropical Forestry, 1966).

del 50% al 12% en 18 días, en tanto que la de 28 mm tardó 25 días y la de 50 mm 41 días. Las maderas duras de 28 mm tardaron 43 días en descender del 60% al 12%. La calidad de la madera así producida era tan buena o mejor que la secada al aire. Se produjeron algunos casos de endurecimiento superficial, por lo que fue necesario instalar nebulizadores para humidificar la atmósfera en el interior de la estufa durante las primeras fases del secado y para corregir las maderas que habían sufrido endurecimiento superficial. El agua de los nebulizadores se calentó asimismo utilizando la energía solar. En esta estufa la operación de secado era de 2 a 4 veces más rápida que en el secado al aire.

Filipinas

En 1967 Casin⁶ y en 1968 Casin, Ordinario y Tamayo⁷ describieron una pequeña estufa portátil de una capacidad de 1 m³ construida en las Filipinas. Su orientación era norte-sur, a diferencia de la mayoría de las estufas anteriores. Tenía paredes terminales de madera contrachapada y una puerta en la pared norte. Un ventilador de 61 mm movido por un motor de 3/4 hp (560 W) hacía circular el aire en su interior. En uno de los costados de la estufa había tres respiraderos de 10 cm x 10 cm. Se realizaron ensayos con cuatro especies: *Shorea polysperma*, *Pterocarpus indicus*, *Shorea negrosensis* y *Dipterocarpus grandiflorus*. La velocidad de secado fue considerablemente mayor en la estufa solar, lo que indica que en ésta no sólo se secaba la madera en casi la mitad del tiempo sino que el contenido de humedad obtenido era inferior al resultante con el secado al aire. La gama de temperaturas en el interior de la estufa alcanzó valores entre 7,2° y 11,7°C más elevados que las temperaturas comparables en el exterior. En algunas especies de madera se produjeron considerables endurecimientos superficiales por lo que se consideró necesario introducir en la estufa solar un sistema humectante en futuros ensayos.

Uganda

Estufa solar núm. 1

En 1954 se iniciaron los ensayos con una pequeña estufa solar de 3,3 m³ de capacidad, cuyos resultados se publicaron en 1967⁸. Las principales

⁶R. F. Casin, *Solar Drying for Lumber*, Technical Note No. 76 (Los Baños, Philippines, Forest Products Research Institute, 1967).

⁷R. F. Casin, L. B. Ordinario y G. Y. Tamayo, "Solar drying of Apitong, Narra, Red Luan and Tanguile", *Philippine Lumberman*, vol. 15, núm. 4 (1969), págs. 23-30.

⁸R. A. Plumtre, "The design and operation of a small solar seasoning kiln on the equator in Uganda", *Commonwealth Forestry Review*, vol. 46, núm. 130 (1967).

características de la estufa son una doble capa de 0,125 mm de película de poliéster resistente a la intemperie que en la fecha de preparación del informe sólo mostraba deterioro en la capa exterior del recubrimiento del techo. La capa interior y la doble capa de las paredes estaban todavía intactas. La estufa tiene una orientación norte-sur y dos respiraderos en las paredes norte y sur. Un motor de 3/4 hp (560 W) instalado en el exterior mueve dos ventiladores de 61 mm de diámetro en el eje cruzado. En el exterior de la estufa hay dos reflectores curvos de aluminio para desviar los rayos solares hacia los costados de la construcción. El falso techo, el tabique central en línea con los ventiladores y otras partes internas, incluido el piso, están pintados de negro mate. Se ensayaron nueve especies de madera en tablas de diferentes espesores, comparándose los resultados obtenidos con el secado al aire en un galpón, en una pequeña pila bajo un cobertizo, en una estufa solar y en una estufa a vapor. La calidad de la madera producida en la estufa solar era tan buena o mejor que la resultante del secado al aire o al vapor. En la estufa solar la madera podía secarse en un periodo de tiempo razonable hasta un contenido de humedad del 12%, en tanto que la secada al aire nunca alcanzaba valores inferiores del 15% al 20% (normalmente un 17%), que no son suficientemente bajos para la ebanistería o carpintería de alta calidad. La velocidad de secado en las fases iniciales no era mucho más rápida que en el secado al aire, pero la ventaja resultaba decisiva por debajo del 30% de contenido de humedad. Las maderas normales de peso medio para la ebanistería tales como *Chlorophora excelsa* de 25 cm de espesor podían secarse desde su estado verde hasta un valor del 12% de humedad en el plazo de un mes o menos. Desde 1967 la estufa ha estado casi en continuo funcionamiento al servicio del Departamento Forestal o de talleres oficiales o privados de ebanistería. Posiblemente debido a los pequeños respiraderos, apenas se han producido casos de endurecimiento superficial.

Estufa solar núm. 2

La estufa solar núm. 1 resultó tan útil y productiva que se decidió construir una de tamaño suficiente para atraer el interés de los talleres de ebanistería y carpintería hacia el uso de las estufas solares. El resultado fue la estufa núm. 2, cuyos detalles principales de diseño se muestran en las figuras 1 y 2. Los principios esenciales eran los mismos que los de la estufa núm. 1, excepto que el aire desciende en el interior de la estufa a lo largo de una de las paredes cambiando su dirección en un ángulo de 180° al encontrarse con una pantalla desviadora semicircular de aluminio para ascender a continuación y pasar a través de la pila de madera. Para forzar el aire se usan cuatro ventiladores de 51 cm movidos por dos motores de 2 hp (1,5 kW)

montados en el techo de la estufa. Esos ventiladores son reversibles. La estufa puede contener una pila de madera de 7,2 m x 2,3 m x 1,6 m, aproximadamente. Los reflectores perfeccionados tienen la misma longitud que la estufa y se pulimentan con cera de silicona para reducir en lo posible el efecto mate de la oxidación superficial. El material de recubrimiento de la estufa es una película de poliéster resistente a la intemperie de 0,125 mm montada en dos capas a una distancia entre sí de 4,4 cm. La película está estirada verticalmente, en lugar de a lo largo de la estufa, y sujeta en sus juntas por medio de listones. Las vigas y viguetas de la armadura de paredes y tejado están espaciadas de la moda que coincidan con la anchura de la película de plástico (107 cm).

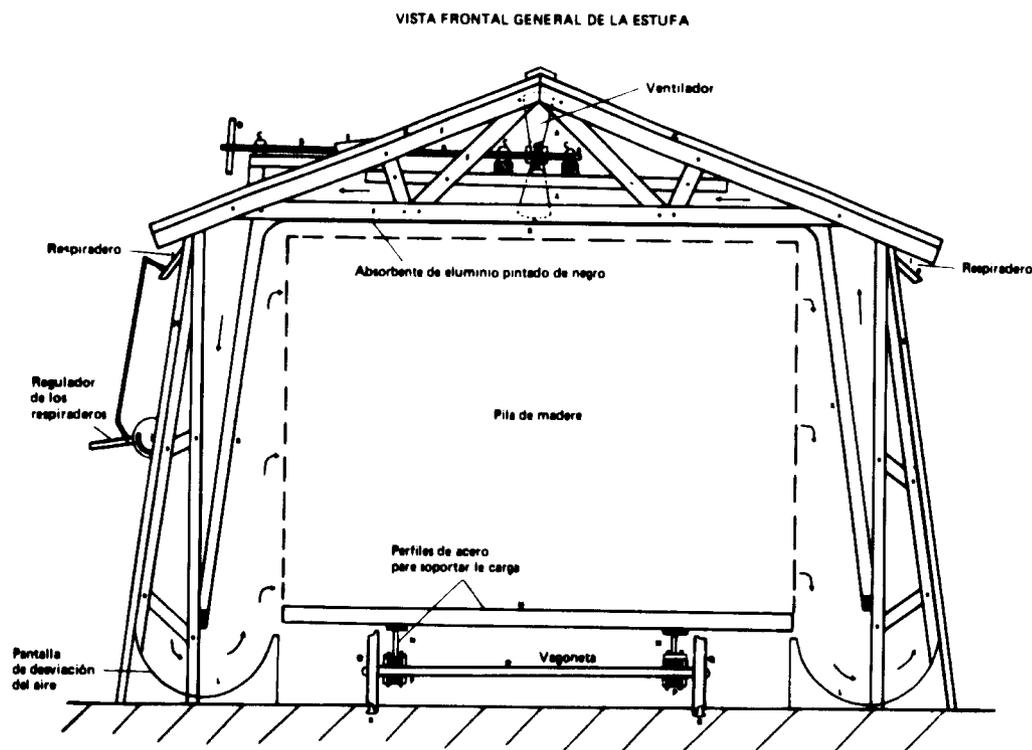
Frente a los ventiladores se hallan situados cuatro respiraderos justo debajo del alero del tejado a cada costado de la estufa, los cuales se abren y cierran de la manera que se indica en las figuras 1 y 2. Los reflectores están ubicados a los lados de la estufa y su inclinación se regula por un sistema de agujeros en los cuadrantes de ajuste que llevan marcada la hora del día. Cuando el pasador que sujeta el reflector se halla inserto en la posición adecuada, se refleja una banda de luz perpendicularmente hacia el costado de la estufa y sobre el absorbente de aluminio pintado de negro. Los reflectores tienen 2,4 m de anchura y 3,6 m de longitud; hay dos en cada costado de la estufa. El piso de ésta es de cemento y fue instalado gratis por una compañía de construcción que deseaba secar madera para su uso en un hotel. Para construir

en el taller de la Sección de Utilización del Departamento Forestal la vagoneta y los raíles se utilizaron vagonetas y raíles antes utilizados para el transporte de azúcar, perfiles de acero y juntas y redondos de 38 mm de acero laminado. Posteriormente, se ha añadido una nueva fuente de calor en forma de un calentador solar casero conectado a un bucle único de tubería de 7,5 cm pintada de negro y encajada en la pared de la estufa entre la capa interior de plástico y el absorbente de aluminio. Esto forma un circuito de agua caliente de circulación continua. Sin embargo, es dudoso que contribuya de manera importante a elevar la temperatura de la estufa debido a su baja capacidad térmica en comparación con la de una carga completa de madera verde.

Comparada con la primera estufa, la segunda resultó ser un 10% más lenta. La calidad de la madera secada era mejor que en la estufa núm. 1. Los respiraderos eran demasiado grandes para un secado óptimo, resultando necesario mantenerlos casi cerrados durante todo el período de secado.

El costo de construcción de la estufa se calcula en unos US\$ 12.000 (1.700 dólares).

Desde 1968 la estufa se ha encontrado en casi continuo uso para el secado comercial de madera de ebanistería. Normalmente, las cargas se componen de una sola especie, aunque a menudo, cuando se necesitaban pequeñas cantidades de una especie determinada, ésta se mezclaba en la misma carga con otras. En estos casos, o cuando se mezclaban maderas de distintos espesores, las especies de secado más



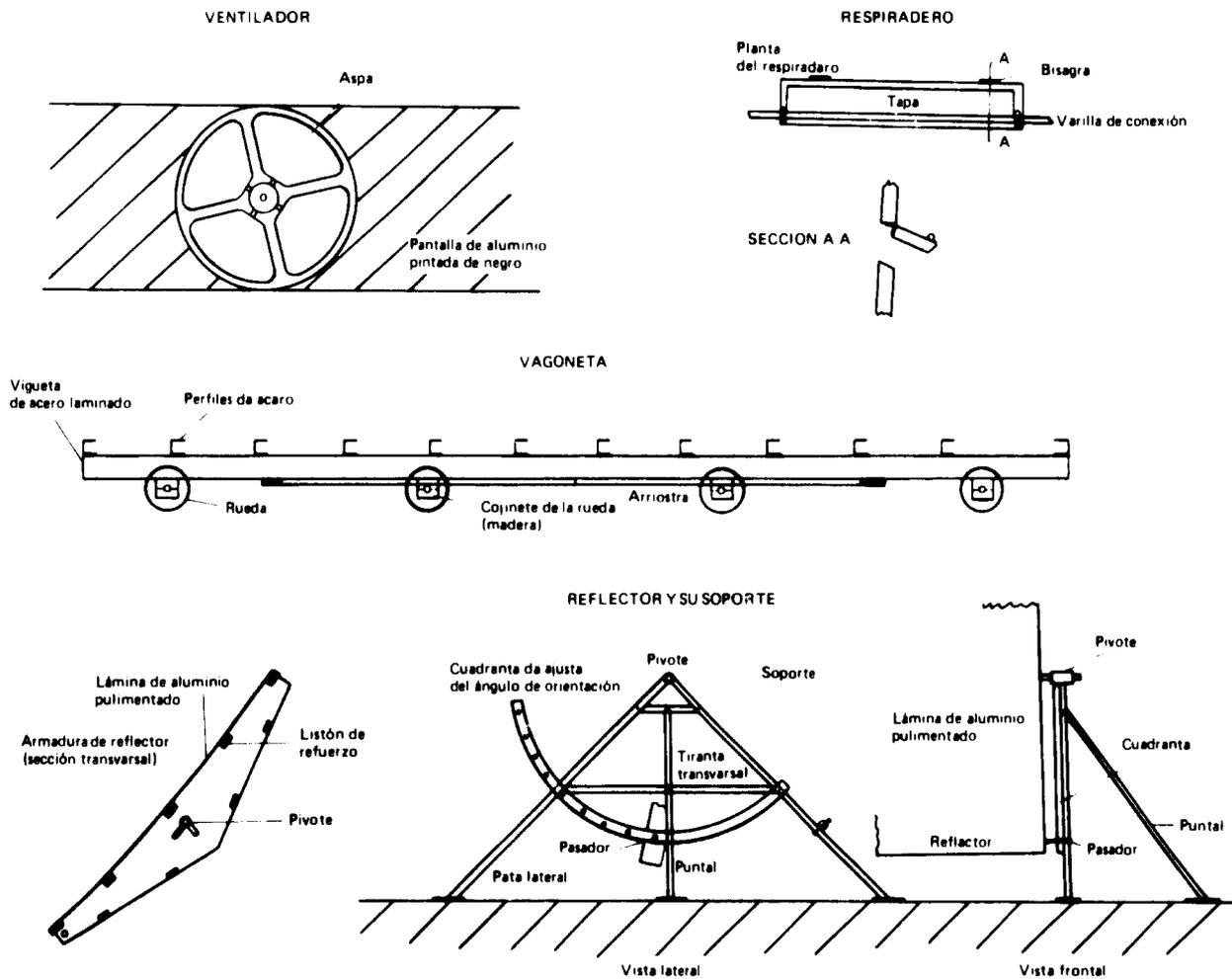


Figura 2. Estufa núm. 2 de Uganda: detalles de los ventiladores, respiraderos, vagoneta y reflectores

lento se colocaban en el fondo de la estufa de modo que el material del secado más rápido pudiera retirarse sin desmontar toda la pila. Se halló poco aconsejable mezclar pequeñas cantidades de madera verde con una carga de madera semiseca a menos que se tratara de madera de rápido secado con escasa degradación, ya que el rápido secado en una atmósfera de bajo contenido de humedad tiende a causar deformaciones superficiales u otras degradaciones. Sin embargo, no hay duda de que, debido a la lenta velocidad de secado, esta estufa es mucho más versátil que las estufas tradicionales en lo que se refiere a su capacidad para secar un lote mezclado de madera verde.

Además de la estufa construida por el Departamento Forestal sólo se han instalado en Uganda dos estufas de este diseño: una para suministrar madera seca a los talleres de ebanistería de los establecimientos penitenciarios y otra por una compañía privada de fabricación de muebles. Ninguna de ellas llegó a ser enteramente funcional debido a que la primera estaba recubierta de polieteno muy delgada que se desintegró rápidamente, y la segunda quedó sin terminar debido a que el gerente interesado en su

construcción dejó la empresa sin haber llegado a obtener el material adecuado para el recubrimiento de la estufa.

Estufa solar núm. 3

La segunda estufa fue de construcción complicada y lenta. Aunque es satisfactoria desde el punto de vista de su buen y continuo funcionamiento, desaprovecha espacio y materiales en relación con el volumen de madera que puede contener y, por consiguiente, es de escaso rendimiento económico. Además, no ha sido concebida para su producción en serie. En 1970 se proyectó una tercera estufa, que se construyó en la primera mitad de 1971, con el propósito de duplicar la capacidad de la segunda y al mismo tiempo mantener a un mínimo el costo de su construcción y simplificarla todo lo posible (figuras 3 y 4).

Una diferencia de diseño de esta tercera estufa es que el aire no desciende por la pared de la misma para ascender luego a través de la pila, como en la segunda estufa. En este caso pasa por el interior del absorbente —aunque también en parte por su

exterior, que se extiende a lo largo del costado de la estufa. Los respiraderos están situados de modo que quedan parcialmente cubiertos por el borde superior de este absorbente, por lo que sólo una pequeña proporción del aire impelido por los ventiladores entra por un respiradero y sale por el opuesto. Los respiraderos son más pequeños y más herméticos (si se los forra con fieltro o un material similar) que los de la estufa núm. 2. La estructura principal de la estufa sigue siendo la misma, pero la película de plástico (en este caso FPV de 0.1 mm para el techo y de 0.05 mm para las paredes, dado que el poliéster resistente a la intemperie no se pudo obtener más) está extendida sobre tableros de dimensiones estándar, los cuales se juntan atornillándolos antes de que la película de plástico se fije sobre el exterior de los mismos. En conjunto se utilizan 22 tableros para la construcción de las paredes, la puerta y las secciones superiores del tejado. Para las secciones inferiores del mismo sólo se necesitan 4 tableros no estándar ya que los que corresponden al lado del eje del ventilador son más pequeños que los del lado

opuesto. Hay 6 ventiladores de 51 cm (en vez de los 4 de la estufa anterior) para airear las pilas, que en esta estufa tienen mayor anchura y altura, pero los motores continúan siendo los mismos de 2 hp (1.5 kW), con suficiente potencia para mover cada uno tres ventiladores. En esta estufa los motores están montados en el extremo de la misma para evitar producir sombras en el tejado que reduzcan la cantidad de radiación que incide en la estufa. El diseño de la puerta se ha modificado para permitir que ésta se construya con tableros de tamaño normal; además, la puerta puede correrse enteramente hacia uno de los lados. Para disminuir los costos, el piso está hecho de grava apisonada recubierta de alquitrán. Los raíles de la vagoneta están montados sobre durmientes de madera tratada a presión, con una viga de cemento debajo de cada raíl para aumentar la resistencia e impedir que los raíles se hundan.

Los ventiladores y los motores han funcionado prácticamente sin averías, aparte de la necesidad ocasional de ajustar y engrasar los cojinetes. Ha sido necesario renovar la capa exterior del tejado de la

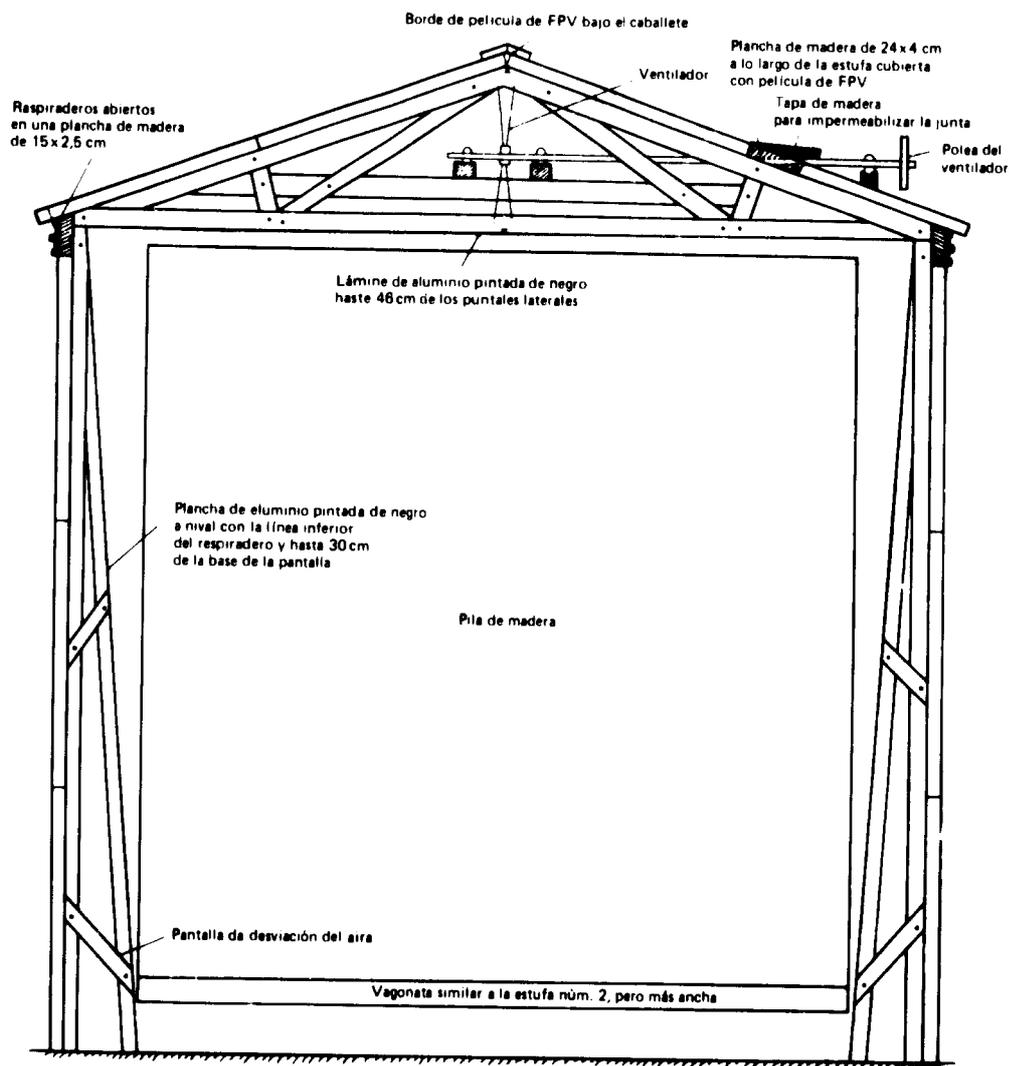


Figura 3. Sección transversal de la estufa núm. 3 con detalles de sus componentes

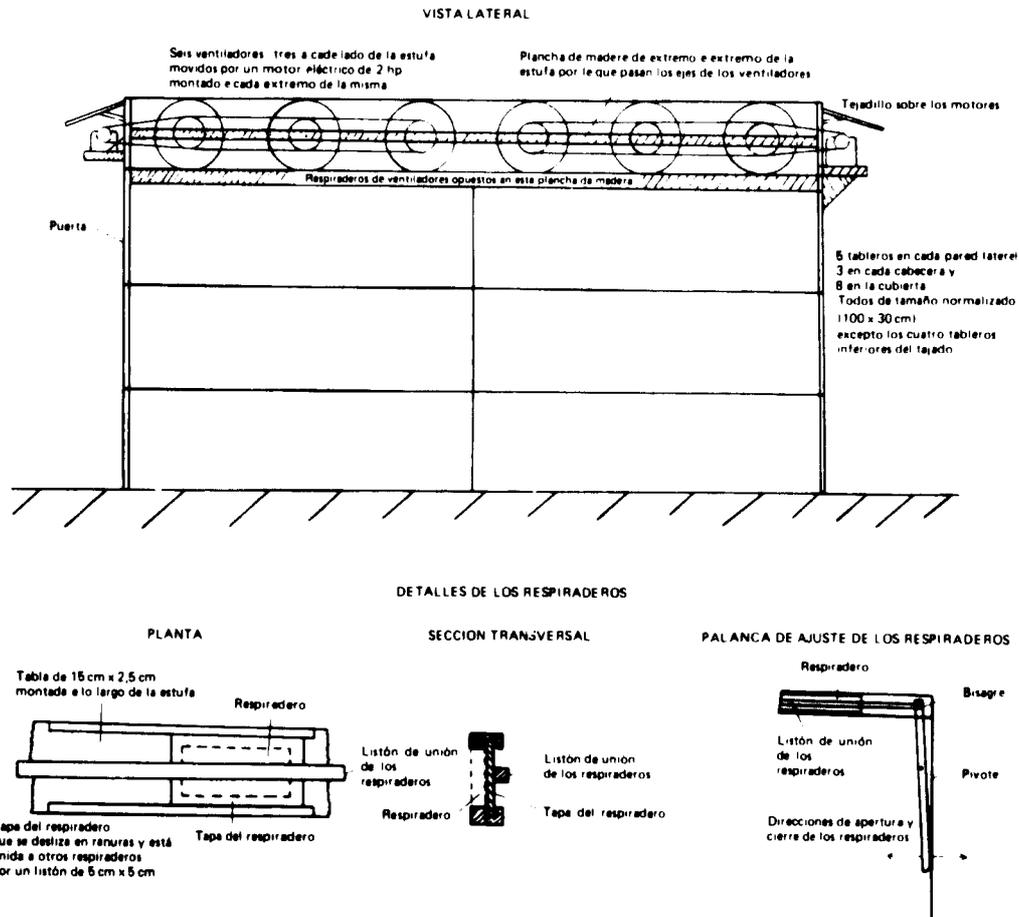


Figura 4. Detalles de ventiladores y respiraderos de la estufa núm. 3

pequeña estufa, pero sólo tras seis años de operación. También es preciso, una vez cada dos años, limpiar y repintar las superficies negras en el interior de las estufas. No se necesita un operario permanente ya que las estufas se ponen en funcionamiento por la mañana y se detienen por la tarde, y un inspector ajusta hora a hora los reflectores durante la jornada de trabajo, operación que realiza un guarda en otras ocasiones. El Ministerio de Obras Públicas posee su propia estufa eléctricamente caldeada y automáticamente controlada capaz para un volumen de 2 m^3 por carga de madera.

Fort Collins, Colorado, Estados Unidos

Troxwell y Mueller informaron en 1968 sobre una estufa solar de $2,8 \text{ m}^3$ de capacidad en Fort Collins⁹. Como recubrimiento de esta estufa se empleó una capa única de lámina de poliéster ondulada reforzada con fibra de vidrio, para determinar las propiedades de ambos como transmisores de la radiación solar, medida con un

⁹ H. E. Troxwell y L. A. Mueller, "Solar lumber drying in central Rocky Mountain region", *Forest Products Research Journal*, vol. 18, núm. 1 (1968), págs. 19-24.

piroheliómetro Eppley. Se halló que el plástico era sólo ligeramente inferior al vidrio en este respecto. En pruebas anteriores, la película de FPV había fracasado debido a la alta velocidad de los vientos prevalecientes en la región. La estufa estaba equipada con dos ventiladores de 61 cm que impulsaban el aire con una velocidad de 30 a 100 m/min. La construcción tenía una orientación este-oeste, y la vertiente del tejado norte-sur. Se observaron diferencias de temperatura durante las horas de mayor altura del sol en el verano, indicándose que para obtener las condiciones óptimas de secado era necesario ajustar cuidadosamente los respiraderos. Utilizando un piroheliómetro se calculó, a base de la radiación que entraba en el interior de la estufa y del contenido higrométrico de la madera, que del 25% al 45% de la energía solar que entraba en la estufa se consumía en el secado de la madera, disipándose el resto. Los ensayos con abeto de Engelmann y *Pinus torta* produjeron satisfactorias tasas de secado.

Wengert, en un interesante trabajo¹⁰, investigó las pérdidas de energía en la estufa solar de Fort Collins e indicó que sólo un 16% de la energía solar

¹⁰ E. M. Wengert, *Improvements in Solar Dry Kiln Design*, United States Forest Service Research Note FPL-0212 (United States Forest Service, 1971).

que incidía sobre la superficie externa de la estufa actuaba efectivamente en la evaporación del contenido de agua de la madera; el resto se perdía aproximadamente de la manera siguiente (%):

A través de las paredes y tejado	30
Energía solar reflejada	17
A través del piso	11
Calentamiento del material del secador o almacenamiento del calor en el mismo	7
Energía de onda larga	13
Por respiraderos	14
Total	92

La suma de esas pérdidas, más el 16% utilizado, excede el 100% debido a un insumo no medido de energía procedente de los ventiladores y a un error experimental. La estufa empleada tenía sólo una cubierta monocapa de poliéster reforzado con fibra de vidrio, por lo que Wenger sugirió que se usara una capa doble; también sugirió mejorar el aislamiento del piso, instalar en el tejado de la estufa pantallas pintadas de negro para absorber una mayor parte de la energía incidente sobre el mismo y mejorar el sistema de respiraderos. También propuso pintar las paredes con productos que reflejasen la radiación infrarroja, tales como el dióxido de titanio, para reducir la pérdida de radiación de onda larga.

Ghana

Martinka¹¹ utilizó en Kumasi un viejo invernadero cubierto de láminas de vidrio con espacio suficiente para unos 4 m³ de madera. Improvisó así una estufa solar para comparar sus resultados con los del presecado bien en un horno adaptado o bien al aire libre. El presecador tenía una capacidad para 0,23 m³ de madera. En la estufa se utilizaba un solo ventilador para circular el aire y una plancha de aluminio pintada de negro para absorber el calor en el interior del recinto. A base de pruebas con *Nauclea* y *Entandrofragma angolense* halló que la velocidad de secado en la estufa solar se encontraba entre las del secado al aire y el presecado, posiblemente debido a que el aislamiento en el invernadero era insatisfactorio y a que en su interior circulaba aire de características menos eficaces que en el presecador. Además, éste era mucho más pequeño.

Madagascar

En 1970, Gueneau¹² describió una estufa solar en Tananarive de diseño similar a la de Fort Collins

¹¹ E. Martinka, *Predrying of Some Ghanaian Timber*, Technical Note No. 11 (Ghanaian Forest Research Institute, 1969).

¹² P. Gueneau, "An experiment in solar drying wood", *Bois et Forêts des Tropiques*, núm. 131 (1970, págs. 69 y 70).

(véase *supra*) pero con orientación norte-sur y con la vertiente del techo en dirección oeste. Estaba cubierta con una monocapa de lámina de poliéster ondulada reforzada con fibra de vidrio; para la circulación del aire se usaban dos ventiladores, y un higrometro servía para vigilar el contenido de humedad en el interior de la estufa. El cemento del piso estaba pintado de negro. Para sellar las juntas entre las láminas de fibra de vidrio se utilizaba poliestireno. El costo de construcción de la estufa fue de FMG 417.000 (aproximadamente 1.500 dólares). En la pared más alta de la estufa, cerca del techo, se abrían dos respiraderos y otros dos cerca del suelo en la pared opuesta. Los ensayos se realizaron a base de *Pinus Kesiya* y de *Dalbergia baroni* y dieron una reducción del tiempo de secado en la estufa solar, en comparación con el secado al aire, del 34% al 68% para *Pinus* y del 48% para *Dalbergia*. La economía de tiempo era especialmente evidente a valores del contenido de humedad inferiores al 20%. Se recomendó que la estufa solar se utilizara después de un período preliminar de secado al aire de la madera que disminuyera el equilibrio higrométrico al valor requerido de 10%.

República Unida de Tanzania

En 1968 se construyó una estufa solar en la sección de utilización del Departamento Forestal de Moshi (República Unida de Tanzania). Se trataba de una estructura de tejado plano con una monocapa de vidrio en el mismo y paredes recubiertas de politeno. En el interior, a 15 cm de las paredes se instaló un absorbente de hierro galvanizado pintado de negro, y el aire circulaba por medio de tres ventiladores colocados encima del absorbente; éste se extendía a través de la estufa como un falso techo. La capacidad del recinto era de 6 m³. Desgraciadamente no existen datos sobre su funcionamiento.

Factores importantes en el secado solar

Aislamiento

Wengert¹³ demostró que gran proporción de la pérdida térmica en las estufas solares se debía al mal aislamiento de techo, paredes y piso. Su estudio se refería a una estufa cubierta sólo con una monocapa de lámina de poliéster reforzada con fibra de vidrio. Parece casi seguro que las estufas cubiertas con capas dobles de material son más eficientes. Cuando se utiliza película flexible de plástico, la doble capa es

¹³ *Op. cit.*

probablemente menos efectiva que una lámina rígida, la cual retiene un espacio constante de aire y reduce el movimiento de éste en dicho espacio durante la vibración de la estufa causada por los ventiladores. Con toda seguridad, además, las puertas pueden ajustarse mejor con un pequeño costo extra, y los ventiladores deben ser eficaces y fácilmente ajustables, de modo que controlen más exactamente la cantidad de aire que entra y sale de la estufa.

El tipo de material usado para el recubrimiento del tejado y las paredes está determinado por el limitado número de materiales transparentes o translúcidos resistentes a los agentes atmosféricos. Como dicho material es factor muy importante del costo de la construcción, es preciso aceptar una transacción entre el material ideal y la necesidad de realizar economías. Es de lamentar que la película de poliéster resistente a la intemperie utilizada en las dos primeras estufas de Uganda no siga ya produciéndose, y que en ese país todos los materiales apropiados (aparte del vidrio, que es costoso) tengan que ser importados especialmente del extranjero, lo que generalmente significa un retraso de seis meses. No cabe duda de que estos factores, más que cualesquiera otros, han impedido una utilización más extendida de las estufas solares en Uganda.

Circulación del aire

La velocidad y uniformidad del flujo de aire a través de la pila de madera es importante para controlar la velocidad de secado. Si la estufa se encuentra sólo parcialmente llena, gran parte del aire circulará por encima de la pila. Con una hoja de plástico fijada por un extremo al techo de la estufa (o al falso techo) y enrollada por el otro a una pieza de madera que se hace descansar sobre la parte alta de la pila resulta fácil impedir esa circulación. También es importante un correcto diseño de los absorbentes a fin de obtener un flujo uniforme de aire a través de la pila y una buena absorción térmica.

Es igualmente importante ajustar bien los respiraderos. El exceso de ventilación ha sido un defecto corriente de muchas estufas solares, debiendo hallarse un equilibrio adecuado entre la humedad y la temperatura. En las fases iniciales del secado, y especialmente en la región del punto de saturación de la fibra, el factor limitante es la velocidad de traslación del agua del centro al exterior de la madera. Un gradiente excesivo de humedad produce endurecimientos superficiales de la madera, por lo que en las fases iniciales del secado se necesitan elevadas temperaturas y elevados valores higrométricos. Sólo en las fases posteriores es posible combinar una elevada temperatura y una baja humedad. Por consiguiente, son necesarias investigaciones complementarias para mejorar el diseño de los respiraderos y el ajuste de los mismos.

Dimensiones de las estufas

Para que sea interesante desde un punto de vista comercial, una estufa solar debe tener capacidad de 10 a 20 m³, aun en los países en desarrollo, en los que los talleres de carpintería y ebanistería trabajan a escala mucho más reducida que en los países más desarrollados. La mayoría de las estufas experimentales han tenido hasta ahora reducidas dimensiones, por lo que es necesario realizar más investigaciones sobre estufas con una relación menor entre el área de la misma y el volumen de la madera. La estufa núm. 3 de Uganda tenía por objeto estudiar este problema. Si funciona satisfactoriamente podrá servir de base para el diseño de una estufa comercial apropiada a las condiciones en ese país.

Reflectores

En las estufas de capacidad de 10 a 20 m³ o más elevada, se necesita gran cantidad de energía térmica, que debe recogerse en una superficie lo más extensa posible. En Uganda, situada en la región ecuatorial, es fácil diseñar y hacer funcionar reflectores sencillos que envían considerable cantidad de radiación solar a través de los costados de la estufa. En regiones lejanas al ecuador esto será más difícil. Además pueden construirse calentadores sencillos de aire para elevar su temperatura antes de que penetre en la estufa a través de los respiraderos.

Costos

Si bien es posible, sin duda alguna, aumentar considerablemente la eficiencia de las estufas solares, el costo de tal operación debe tenerse muy en cuenta. La principal justificación de una estufa solar es su bajo costo y su sencillez de fabricación en comparación en las estufas tradicionales. No tiene mucho sentido renunciar a esta ventaja principal y emplear métodos muy complicados para aumentar la eficiencia de la estufa.

Calidad de la madera secada en estufas solares

Casi todos los investigadores de los métodos de secado solar han señalado la elevada calidad de la madera así producida. La razón parece sin duda ser que la inexistencia de calentamiento solar durante la noche y las consiguientes temperaturas inferiores, más elevada humedad y ausencia de flujo de aire conducen a un "condicionamiento" nocturno durante el cual el contenido interno y superficial de humedad se equilibran. Esto es especialmente importante en las especies de madera más duras, pesadas y de más lento

secado. Con métodos adecuados pueden obtenerse en las estufas tradicionales los mismos resultados, pero es necesario aplicarlos con personal especializado.

Competitividad de las estufas solares

Trataremos a continuación de la competitividad de las estufas solares en relación con cada uno de los principales tipos de estufas tradicionales.

Secado al aire

Por lo general se admite que los costos del secado en estufas solares son tan elevados o más que los del secado al aire, aun cuando se tome en consideración la inmovilización de capital resultante del más largo período de tiempo que se necesita para el secado al aire. El secado solar presenta tres ventajas principales en relación con el secado al aire. Primera, su rapidez: normalmente se necesita sólo la mitad del tiempo para alcanzar el equilibrio higrométrico de la madera en el clima de que se trate. Segunda, es posible secar madera hasta alcanzar un contenido de humedad más bajo que el de equilibrio en el interior de edificios cerrados, lo que significa que la madera puede secarse en grado suficiente para su uso en la fabricación de muebles y artículos de carpintería de alta calidad; esta es indudablemente la ventaja más importante del secado solar sobre el secado al aire. Tercera, la madera secada en estufa solar es casi siempre de calidad superior a la secada al aire, ya que su contenido de humedad es más uniforme en todas las fases del secado. Además, la madera no está sometida a un flujo de aire mayor y a una mayor incidencia de los rayos solares o del calor solar en los extremos de los tablones que en el centro de la pila, lo que es común aun en los mejores métodos de curado al aire. Por consiguiente, en las estufas solares es menor la probabilidad de degradación en forma de grietas terminales que durante el secado al aire.

La principal desventaja del secado en estufas solares es la reducida capacidad de las mismas.

Secadores de circulación forzada

Con investigaciones adecuadas, tal vez se consiga que los secadores de circulación forzada sean competitivos con las estufas solares. Para ello se necesitan grandes ventiladores, a menos que se utilicen complicados sistemas de pantallas de desviación de la corriente de aire; para ser eficaces, esos secadores deben hallarse cubiertos por un techado y montados en una pared o tabique divisorio.

Los costos de instalación son, por consiguiente, considerables; además carecen de las ventajas de una más elevada temperatura y del control del contenido de humedad que poseen las estufas solares. Actualmente, por consiguiente, no parecen poder competir con éstas en las zonas tropicales.

Presecadores

Si los presecadores se utilizan exclusivamente para el fin para el que han sido concebidos es poco probable que puedan competir con las estufas solares ya que éstas son más eficaces, sobre todo para las fases finales del secado. Sin embargo, si los presecadores se modifican para hacer de ellos estufas tradicionales baratas con un método simple de calentamiento, apropiadas a los países en desarrollo, sus posibilidades de competir con las estufas solares serán mucho más marcadas. Por ejemplo, puede ser posible aumentar el calor solar por medio de un sistema de calentamiento de agua utilizando una hoguera alimentada con restos de madera y un recipiente metálico de 200 litros.

Estufas tradicionales

En todos los casos en que se han realizado comparaciones de costos, las estufas solares han resultado más económicas que las tradicionales. Por consiguiente, dentro de las limitaciones de su tamaño, son competitivas; pero como son también más lentas y deben hallarse situadas de modo que queden expuestas a los rayos solares durante la mayor parte del día, necesitan también una superficie mucho mayor de terreno que las estufas tradicionales por unidad de madera curada. En su forma actual son más apropiadas para el secado de pequeñas cantidades de madera que para la producción en masa de madera curada. Esto parece aconsejar su uso inicial para pequeñas empresas de carpintería y ebanistería. Más tarde pueden utilizarse en batería para secar grandes cantidades de madera, pero será necesario perfeccionarlas previamente mediante ensayos en pequeña escala. Una de las ventajas de las estufas solares es que no necesitan operarios altamente calificados y que para su mantenimiento basta con ciertas operaciones periódicas.

Deshumedecedores

Debido a su escasa eficiencia, especialmente para el secado de tablones de gran tamaño, parece poco probable que los deshumedecedores puedan competir con las estufas solares.

Observaciones sobre las comparaciones de costos

Las únicas comparaciones de costos entre las estufas solares y otros métodos son las de Peck¹⁴. En Uganda, ni la estufa de vapor que funciona en el Departamento Forestal ni la eléctrica del Ministerio de Obras Públicas representan adecuadamente las estufas comerciales potencialmente competitivas, ya que son demasiado pequeñas y de muy elevado costo de funcionamiento. No existen cálculos de costos de las únicas estufas que funcionan comercialmente en el país, las cuales se encuentran ubicadas a 80 km de las estufas solares.

No se considera válida la comparación de los costos del secado al aire con los del secado en estufas solares, ya que la mejor manera de utilizar una de éstas consiste, casi con toda seguridad, en emplearla para eliminar el contenido de humedad de la madera hasta valores que no pueden obtenerse mediante el secado al aire exclusivamente.

Idoneidad de las estufas solares para los países en desarrollo

En los países en desarrollo, las empresas de la industria de la madera son, por lo general, pequeñas y a menudo están separadas por distancias considerables; las comunicaciones entre las mismas son casi siempre deficientes. Por consiguiente, las necesidades de madera curada de cada empresa son reducidas, lo que favorece el uso de las estufas solares debido a sus bajos costos de capital y de funcionamiento y a la reducida producción de madera curada. Al mismo tiempo, la mayoría de los países en desarrollo poseen características climáticas que favorecen el uso de la energía solar para el secado de la madera. Por otra parte, es necesario cierto grado de desarrollo de la industria dado que ni un "carpintero de aldea" podrá costearse una estufa solar ni a sus clientes les importa que la madera no esté absolutamente seca. Una vez que la industria se haya desarrollado lo suficiente para que exista una demanda mensual de secado de madera de 10 a 40 m³, o cuando existan cooperativas de empresas más pequeñas, se justificará probablemente la instalación de estufas solares. En la presente fase de desarrollo, no es el costo por unidad de madera secada lo que a menudo determina el método de curado que ha de emplearse sino el costo inicial que supone dicho método. Así, las inversiones iniciales deben mantenerse lo más bajas posible. Las estufas deben diseñarse de modo que puedan ser construidas sin dificultades a base de materiales fácilmente asequibles. A este respecto resultan ventajosos los

¹⁴ *Op. cit.*

sistemas de construcción modular con componentes normalizados, siempre que vayan acompañados de adecuados planos e instrucciones para su montaje.

Recomendaciones

Coordinación y centralización de las investigaciones básicas

Se necesitan investigaciones del tipo de las sugeridas por Wengert¹⁵ encaminadas a descubrir las causas de las pérdidas de energía y ensayar los cambios de diseño destinados a limitar dichas pérdidas. Es esencial asimismo la investigación dirigida a determinar los materiales de recubrimiento más convenientes. Estas investigaciones, que pueden realizarse allí donde se cuente con personal, fondos e instalaciones apropiados, producirán resultados aplicables en todas las regiones del mundo. El diseño de la estufa por lo que respecta a su tamaño y forma óptimos, que variarán de un país a otro, deberán dejarse a la discreción de los investigadores individuales en los países interesados, de modo que puedan construir estufas adecuadas a las especiales circunstancias de esos países.

Fondos para la investigación y el desarrollo

En muchos países en desarrollo se dispone de escasos fondos para la investigación, especialmente para la del tipo necesario en la esfera de las estufas solares, cuyos beneficios financieros inmediatos serán de escasa cuantía. Dado que "hay que ver para creer", la explotación comercial de las estufas solares no se convertirá probablemente en realidad en ningún país mientras no se demuestre en ese país o en uno cercano que su funcionamiento es eficaz. Por lo tanto, se necesitan fondos no sólo para la investigación sino también para la construcción de prototipos comerciales.

Difusión de información

Gran parte de las investigaciones sobre las estufas solares se han llevado a cabo sin conocer los trabajos realizados en otras partes. Un comité compuesto de personas interesadas en la investigación sobre las estufas solares en distintas partes del mundo y que se comunicasen entre sí por correspondencia podría resolver este problema. En tal caso, se necesitaría un coordinador o secretario encargado de hacer circular la información.

¹⁵ *Op. cit.*

Métodos de refrigeración y enfriamiento por energía solar

Erich A. Farber

Solar Energy and Energy Conversion Laboratory, Universidad de Florida (Estados Unidos)

En los países más industrializados se dispone de sistemas de refrigeración activados por energía eléctrica obtenida de combustibles fósiles, pero estas técnicas resultan demasiado costosas para muchos países y para la inmensa mayoría de los habitantes del mundo. Sin embargo, en la mayor parte de las zonas habitadas del planeta se dispone de energía solar, y la transformación de ésta en otras formas de energía utilizables para la activación de sistemas de refrigeración o enfriamiento puede ser de gran provecho para la satisfacción de muchas necesidades humanas. En esta monografía se examinan en detalle algunos de los métodos utilizables a este fin y se formulan recomendaciones para su puesta en práctica.

Métodos básicos

Los métodos de refrigeración más utilizados son el sistema de compresión, compuesto de un compresor que utiliza mucha energía, en ocasiones, mecánica pero casi siempre eléctrica, y el sistema de absorción, en el que se sustituye el compresor por un absorbente un generador y una pequeña bomba (figuras 1 y 2). Ambos métodos se sirven de un condensador, una válvula o un sistema de expansión,

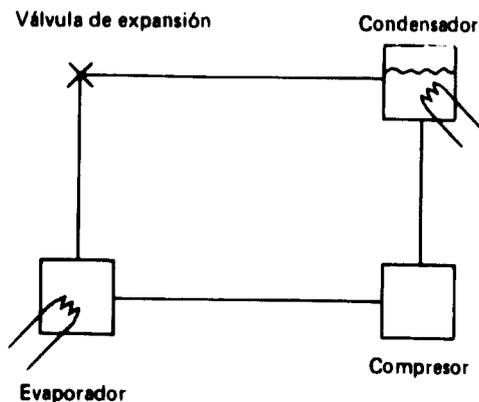


Figura 1. Sistema de refrigeración tradicional por compresión

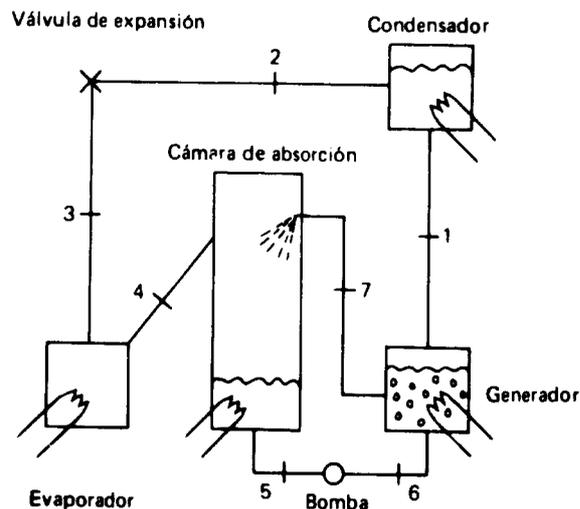


Figura 2. Sistema de refrigeración por absorción continua

y un evaporador. En un sistema de absorción con tres componentes fluidos, se puede incluso eliminar la bomba. A continuación puede verse una descripción detallada de estos métodos.

Sistemas de refrigeración por energía solar

Son numerosos los métodos utilizables para aprovechar la radiación solar como fuente de energía para la refrigeración. La energía solar puede transformarse en energía mecánica para activar de este modo el compresor de un sistema de compresión tradicional. Cabe también obtener electricidad, o bien mediante un generador activado por un motor solar, o mediante un dispositivo de estado sólido, que haga funcionar refrigeradores eléctricos tradicionales. Sin embargo, puesto que la energía solar se transforma con mayor eficacia en calor que en energía mecánica o eléctrica, parece que, por el momento, la mayor solución será utilizar un sistema por absorción, alimentado por energía solar.

Para las aplicaciones que requieren temperaturas elevadas hay que concentrar la energía solar, para lo que suele ser preciso utilizar sistemas de rastreo del sol, con lo cual aumenta su complejidad y su costo. Suelen constituir problemas la carga mecánica del viento, la duración de las superficies reflectoras, los dispositivos de rastreo solar, etc. Es preciso tener en cuenta también que los colectores de concentración solar utilizan únicamente la radiación directa del sol y no su radiación difusa, lo que significa cierta pérdida de la energía, incluso en días despejados, y la incapacidad para captar energía en días nublados.

Para aplicaciones que utilizan temperaturas menores, que pueden obtenerse con colectores de placa plana, se aprovecha tanto la radiación solar directa como la difusa. No existen de momento en el comercio sistemas de refrigeración de estas características, por lo que es preciso diseñarlos y fabricarlos por encargo. A continuación se describirán ejemplos de los dos enfoques mencionados.

Características de funcionamiento

Casi todo el mundo conoce bien el funcionamiento de los sistemas de refrigeración por compresión, ya que su uso está muy difundido. En cambio, circula menos información sobre los sistemas de absorción, que, por ser menos conocidos, se describirán aquí brevemente.

El sistema de absorción intermitente que aparece representado de forma esquemática en la figura 3 es

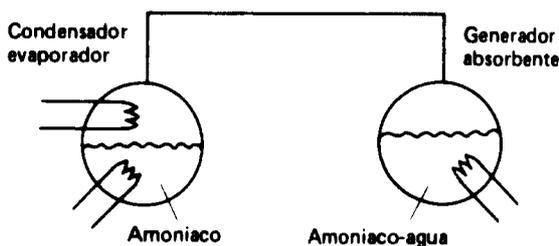


Figura 3. Sistema de refrigeración por absorción intermitente

de construcción más sencilla y consta de dos tanques, cada uno de los cuales desempeña una doble función. Durante la operación de carga, uno de ellos actúa como generador, que, al calentarse, expulsa al refrigerante (amoníaco) de la solución (en agua); y el otro actúa de condensador, haciendo cambiar el estado físico del refrigerante de gas a líquido.

La operación de carga suele ser breve comparada con la operación de enfriamiento, durante la cual el tanque que era generador pasa a actuar de cámara de absorción y el tanque que era condensador pasa a actuar de evaporador, obteniéndose así la temperatura de refrigeración necesaria.

El sistema de refrigeración por absorción continua funciona de modo similar al sistema por compresión, sustituyéndose el compresor por una cámara de absorción, un generador y una bomba. La solución absorbente-refrigerante se calienta en el generador, expulsándose el refrigerante de la solución hacia el condensador, donde se enfría hasta licuarse. De allí, pasa a través de la válvula de expansión para llegar al evaporador, donde se producen las bajas temperaturas. Una vez cumplida su función, el refrigerante pasa a la cámara de absorción para ser reabsorbido en la solución. Esta se bombea de nuevo al generador para repetir el ciclo. En otras palabras, el absorbente actúa únicamente de portador. En la figura 2, el líquido portador circula de 5 a 6 a 7, y retorna a 5, cargándose de refrigerante entre 7 y 5 descargándolo entre 6 y 7. El refrigerante circula a través del sistema de 1 a 2 a 3 a 4 a 5 a 6, y retorna a 1.

Análisis termodinámico

Pueden utilizarse muchas sustancias como absorbente y como refrigerante; agua y amoníaco forma la combinación refrigerante más en uso y mejor conocida, por lo cual será la única que se examinará aquí.

Puesto que el sistema continuo es más complicado que el intermitente, el análisis se hará respecto

CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE REFRIGERACION POR ABSORCION CONTINUA DE AMONIACO Y AGUA

Puntos de la figura 2	Temperatura °C	Presión barías	Concentración de amoníaco (fracción de peso)	Entalpía kJ/kg	Caudal kg/h
1	11	9,6	1	1 620	0,5
2	27	9,6	1	307	0,5
3	-7	2,4	1	307	0,5
4	-7	2,4	1	1 438	0,5
5	27	2,4	0,50	-42	9,1
6	27	9,6	0,50	-40,9	9,1
7	71	9,6	0,47	156	8,6

de aquél. Es preciso disponer para este análisis de diagramas de temperatura-presión para el amoníaco y de concentración-entalpía para las soluciones de amoníaco y agua. Estos diagramas se encuentran fácilmente en manuales de refrigeración. En el cuadro que aparece a continuación pueden verse datos obtenidos de estos diagramas para los siete puntos numerados de la figura 2, en la hipótesis de que el generador funcione a una temperatura de 71°C , que es una temperatura fácil de obtener con la energía solar; el evaporador, a 7°C ; y el condensador y la cámara de absorción, a 27°C .

Para un refrigerador típico de 340 litros en régimen de funcionamiento continuo, las cantidades de calor que han de intercambiarse son las siguientes:

	<i>kJ/kg</i>	
Generador	5 399	añadidos
Condensador	1 312	eliminados
Evaporador	1 130	añadidos
Cámara de absorción	5 236	eliminados

La exactitud de los valores arriba indicados es la obtenible con diagramas no mayores que la página de un libro. Para obtener valores más exactos es preciso utilizar tablas o diagramas más detallados.

El efecto frigorígeno de este sistema en las condiciones de funcionamiento descritas es de alrededor de 0,21 y la potencia de bombeo necesaria para la circulación del fluido es de 0,003 hp (2 mW).

La descripción completa de un sistema basado sobre los principios enunciados puede verse en el artículo de Assad Takla, que aparece en la página 7.

Calefacción y refrigeración de locales y calentadores de agua por energía solar

V. G. Bhide

National Physical Laboratory, Nueva Delhi (India)

Introducción

Parece estar bastante bien demostrado que la productividad humana alcanza sus niveles óptimos en ciertas condiciones ambientales de temperatura y humedad. Se considera que la temperatura óptima se halla entre 20° y 25°C.

Las condiciones climáticas de la India ofrecen un espectro muy variado. En algunas partes del país, las temperaturas invernales descienden por debajo del punto de congelación, mientras que en otras, las temperaturas estivales pueden elevarse hasta 45°C. Para que estas condiciones climáticas resulten más llevaderas se suele recurrir a sistemas de calefacción y refrigeración de locales.

Como consecuencia de la crisis energética se procura estudiar en todo el mundo las posibilidades de proporcionar calefacción y refrigeración de locales mediante la energía solar. Los resultados obtenidos en este sentido durante los últimos años han mostrado que, entre todas las aplicaciones de la energía solar, la calefacción y refrigeración de locales no sólo es técnicamente viable, sino que se está haciendo económicamente competitiva. También en la India se han efectuado algunos esfuerzos por estudiar la viabilidad de la calefacción y refrigeración de locales por energía solar. En esta monografía se recogen los resultados de los proyectos experimentales efectuados en la India en esta esfera.

Calefacción de locales

El primer gran proyecto experimental sobre calefacción de locales fue efectuado por el National Physical Laboratory (NPL). La empresa patrocinadora del proyecto, Bharat Heavy Electricals Ltd. (BHEL), había observado un notable descenso de la productividad de su fábrica de Haridwar durante los meses de invierno. Procurando elevar la productividad de la fábrica mediante un sistema de calefacción, BHEL solicitó ayuda del NPL para diseñar, instalar y evaluar semejante sistema.

Los principales objetivos de este proyecto se definieron como sigue:

- a) Estudiar la viabilidad de un sistema de calefacción para los trabajadores;
- b) Diseñar un sistema de calefacción para la fábrica por energía solar, a la vez eficaz y económico;
- c) Determinar cuál de las posibles modalidades de funcionamiento requeriría un empleo menor de energía auxiliar;
- d) Estimar el funcionamiento del sistema completo de calefacción y de cada uno de sus componentes principales;
- e) Evaluar la utilidad del sistema comparando su funcionamiento efectivo con los resultados previstos en el modelo matemático;
- f) Modificar el diseño si fuera necesario.

La fábrica ocupaba un gran edificio con grandes puertas y ventanas y amplios ventiladores. Enormes máquinas se hallaban distribuidas en diversos puntos, y había un dispositivo de grúa que se desplazaba dentro del edificio. Ante tales condiciones, se abandonó la idea de instalar un sistema de calefacción para todo el edificio para montar, en su lugar, un sistema de calefacción localizada para los operarios encargados de las máquinas. En la figura 1 puede verse un diseño esquemático del sistema de calefacción por energía solar. Consta fundamentalmente de: un ciclo de captación de energía y un ciclo de radiación de energía. Durante el ciclo de captación de energía, el agua se hace circular a través de una serie de colectores solares instalada sobre el edificio. El agua así calentada se almacena en un tanque aislado. Durante el ciclo de radiación, el agua caliente circula a través de radiadores de serpentín con ventilador de hélice. A continuación se examinarán criterios para el diseño de los dos ciclos del sistema.

Ciclo de radiación de energía

El sistema de radiación de energía aquí considerado constará únicamente del tanque de

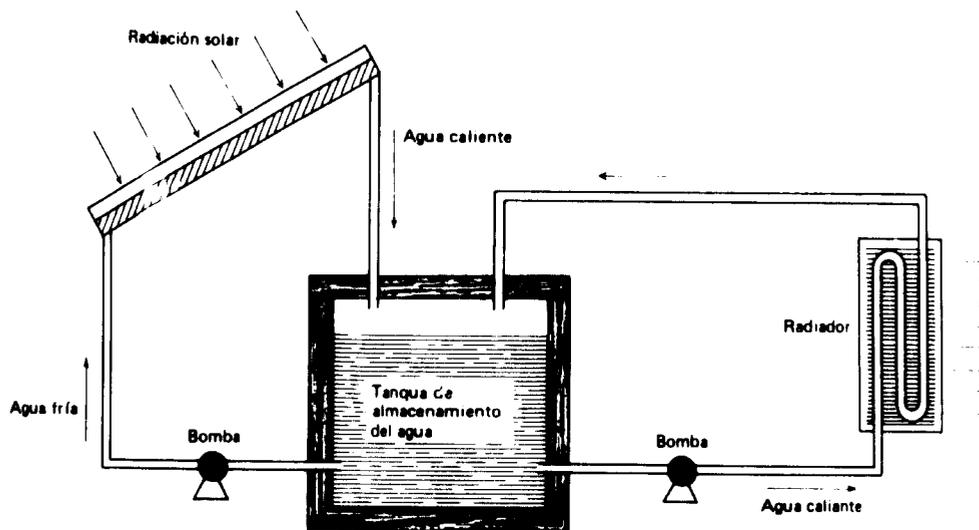


Figura 1. Sistema de calefacción de locales por energía solar

almacenamiento, la bomba y el radiador representados en la figura 1. Para simplificar el análisis y el modelo matemático del funcionamiento del sistema se adoptarán las siguientes hipótesis, que son muy razonables:

a) La pérdida de calor del tanque de almacenamiento es insignificante si se la compara con el calor irradiado por los radiadores de serpentín con ventilador auxiliar;

b) Los coeficientes de transmisión térmica de los distintos radiadores son idénticos;

c) El calor específico del agua y el del aire permanecen constantes en todo el intervalo de temperaturas;

d) Durante el ciclo de radiación no se añade ni se extrae agua del tanque de almacenamiento;

e) La bomba de circulación no altera la temperatura de la bomba de agua.

La masa de agua caliente del tanque de almacenamiento lleno se representa por M y la temperatura del agua en el interior del tanque al iniciarse el ciclo de radiación ($t = 0$) se representa por T_0 . La masa de agua que circula por unidad de tiempo (caudal) a través del radiador se representa por \dot{m}_w y la masa de aire soplada a través del radiador por \dot{m}_a . A medida que el agua circula a través de los radiadores e intercambia calor con el aire soplado, descenderá la temperatura del agua en el tanque. La temperatura en cualquier momento t se representa por T . Si el calor específico del agua es C_w y la temperatura del agua una vez que ha pasado a través de los radiadores es T_{w2} , podemos formular la siguiente ecuación:

$$MC_w \frac{dT}{dt} = N \dot{m}_w C_w (T_{w2} - T) \quad (1)$$

donde N es el número de radiadores de serpentín con ventilador auxiliar.

Para descubrir cómo varía T_{w2} al variar T , será preciso considerar el balance térmico durante el proceso de intercambio térmico. A medida que el agua caliente transmite calor al aire soplado a través del radiador, la temperatura del aire se eleva por encima de la temperatura ambiente, de T_a a T_{a2} . En estas condiciones tenemos que:

$$\dot{m}_w C_w (T - T_{w2}) = \dot{m}_a C_a (T_{a2} - T_a) \quad (2)$$

donde C_a es el calor específico del aire. Podemos ahora definir los dos parámetros R y ϵ :

$$R \equiv \frac{\dot{m}_a C_a}{\dot{m}_w C_w} \quad (3)$$

$$\epsilon \equiv \frac{T_{a2} - T_a}{T - T_a} \quad (4)$$

El producto ϵR es igual a la relación entre el calor efectivamente intercambiado y el calor máximo intercambiable, que se considera como una característica constante de cada serpentín con ventilador auxiliar (radiador) aun cuando ϵ es una relación en que intervienen las dos variables del problema.

Combinando ahora las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) obtenemos:

$$MC_w \left(\frac{dT}{dt} \right) + N \dot{m}_w C_w \epsilon R (T - T_a) = 0 \quad (5)$$

cuya solución es

$$(T - T_a) = (T_0 - T_a) \exp(-N \dot{m}_w \epsilon R t / M) \quad (6)$$

De la anterior ecuación resulta que la temperatura del tanque desciende exponencialmente con el tiempo. Utilizando las ecuaciones indicadas, es posible determinar también cómo variará con el tiempo la temperatura del aire caliente. Utilizando la ecuación (4), vemos que la temperatura T_{a2} del aire caliente puede obtenerse de:

$$(T_{a2} - T_a) = \epsilon (T_0 - T_a) \exp(-N \dot{m}_w \epsilon R t / M) \quad (7)$$

Esta ecuación muestra que la temperatura del aire caliente decrece también exponencialmente con el tiempo. Definiendo un parámetro $a \equiv \dot{m}_w \epsilon R / M$ y trazando la representación gráfica de la variación en función del tiempo de la temperatura del agua del tanque y de la del aire caliente, obtenemos las curvas que aparecen en las figuras 2 y 3. Los datos de diseño pueden obtenerse de la figura 2. El valor de a se fija de acuerdo con la temperatura que se desea obtener tras cierto período de tiempo (en este caso, al finalizar un turno de ocho horas). Una vez conocidos los valores de \dot{m}_w , ϵ y R , se podrá proceder a fijar la capacidad del depósito.

En el cuadro pueden verse los datos de funcionamiento observados en cada serpentín con ventilador auxiliar (radiador).

En la hipótesis de que la temperatura requerida al finalizar el segundo turno después de seis horas de funcionamiento de la planta es de $18,3^\circ\text{C}$, se obtiene un valor para a de 0,150. Con este valor se puede determinar la capacidad M del tanque de almacenamiento. Para $\dot{m}_w = 450 \text{ kg/h}$ y $\dot{m}_a = 408 \text{ kg/h}$, el valor de M es de 7001 por

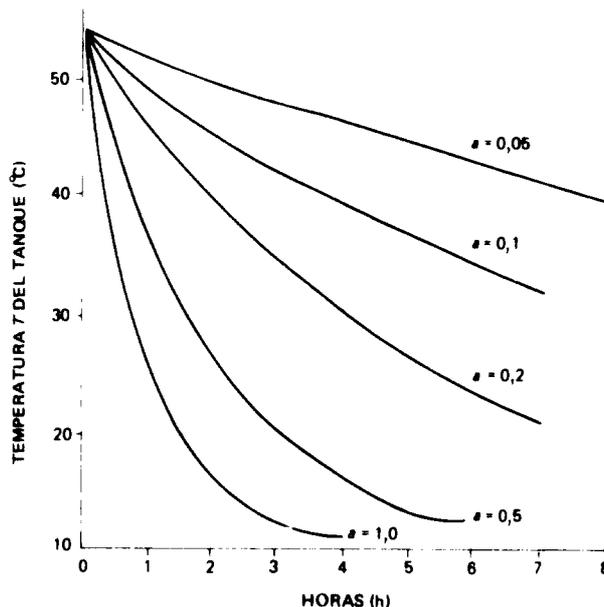


Figura 2. Variaciones de la temperatura del tanque en función del tiempo a lo largo de un ciclo de radiación para diversos valores de a

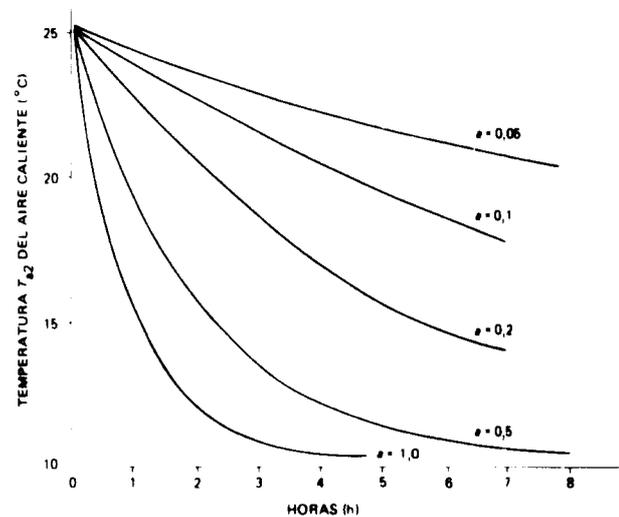


Figura 3. Variaciones de la temperatura del aire caliente en función del tiempo a lo largo de un ciclo de radiación para diversos valores de a

serpentín. En este caso la temperatura del tanque y la temperatura del aire caliente variarán como sigue:

$$(T - T_a) = (T_0 - T_a) \exp(-0.15 t) \quad (8)$$

y

$$(T_{a2} - T_a) = \epsilon (T - T_a) \quad (9)$$

Las curvas correspondientes a estas ecuaciones pueden verse en la figura 4.

De este modo, para obtener la temperatura requerida al final del turno, la temperatura del tanque de almacenamiento en $t = 0$ del ciclo de radiación tiene que ser de $54,4^\circ\text{C}$. Conocidos estos parámetros, podrá ahora determinarse la superficie de colector necesaria.

Ciclo de captación de energía

Durante el ciclo de captación de energía, el agua del tanque de almacenamiento se hace circular a través del dispositivo colector y, una vez calentada, regresa al tanque para su almacenamiento. Dados un coeficiente de insolación H_f y un coeficiente de pérdida de calor U_L , será posible determinar, para un

RESULTADOS OPERACIONALES DEL RADIADOR DE SERPENTIN

Número de mediciones	Caudal (kg/h)		Temperatura del agua caliente (°C)	Descenso en la temperatura del agua (°C)	Ascenso de la temperatura del aire (°C)	ϵ	R	ϵR
	Agua	Aire						
1	450	408	54,5	5,8	19,0	0,49	0,218	0,106
2	450	272	54,4	4,4	19,4	0,50	0,145	0,072
3	180	408	54,4	10,0	17,8	0,46	0,545	0,250
4	180	272	54,4	7,2	18,3	0,47	0,343	0,161
5 ^a	450	408	60	4,7	20,3	0,45	0,218	0,098
6 ^a	450	272	60	3,3	21,1	0,47	0,145	0,068

^a Mediciones tomadas en una habitación cerrada.

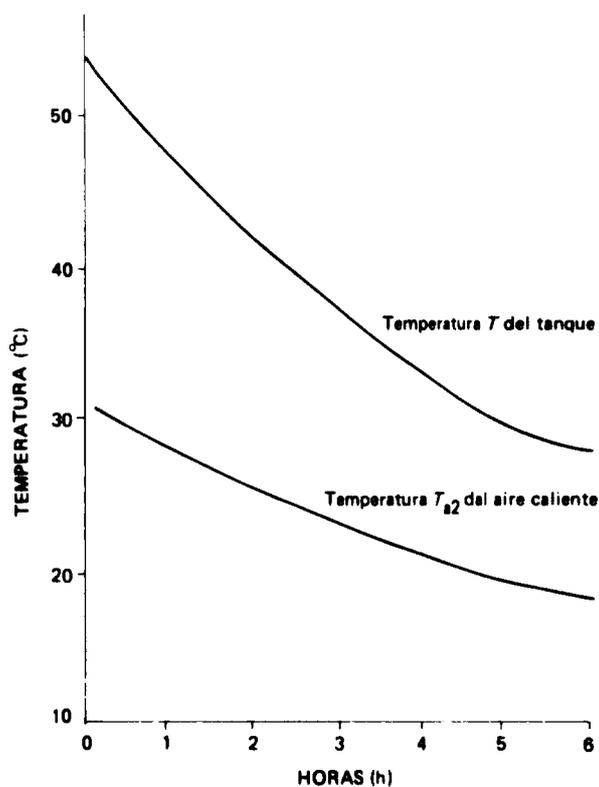


Figura 4. Variaciones de las temperaturas del agua caliente y del aire caliente en función del tiempo de utilización para un valor de $\alpha = 0,15$

caudal conocido, la temperatura del tanque en función del tiempo. Se puede demostrar que la temperatura del tanque variará bajo las condiciones indicadas como sigue:

$$(T - T_a) = \frac{H_f}{U_L} (1 - e^{-\gamma t}) + P e^{-\beta t}$$

donde

$$\gamma = \frac{N \dot{m}_w}{M} (1 - e^{-\beta_L}),$$

y

$$P = (T - T_a) \text{ at } t = 0.$$

En la ecuación anterior, β_L es un factor determinado por H_f , U_L , el calor específico, etc. Como la insolación H_f no es constante a lo largo del día, este modelo no refleja fielmente la realidad. Sin embargo, la superficie de colector requerida puede determinarse por otro método.

Los colectores de placa plana utilizados por el NPL en sus experimentos sobre calefacción de locales son iguales a los utilizados en el experimento sobre una bomba accionada por energía solar (página 59). En la figura 5 aparece representado el rendimiento de los colectores en función de la temperatura del colector para diversos valores de insolación. A partir de estas curvas, es posible determinar el rendimiento

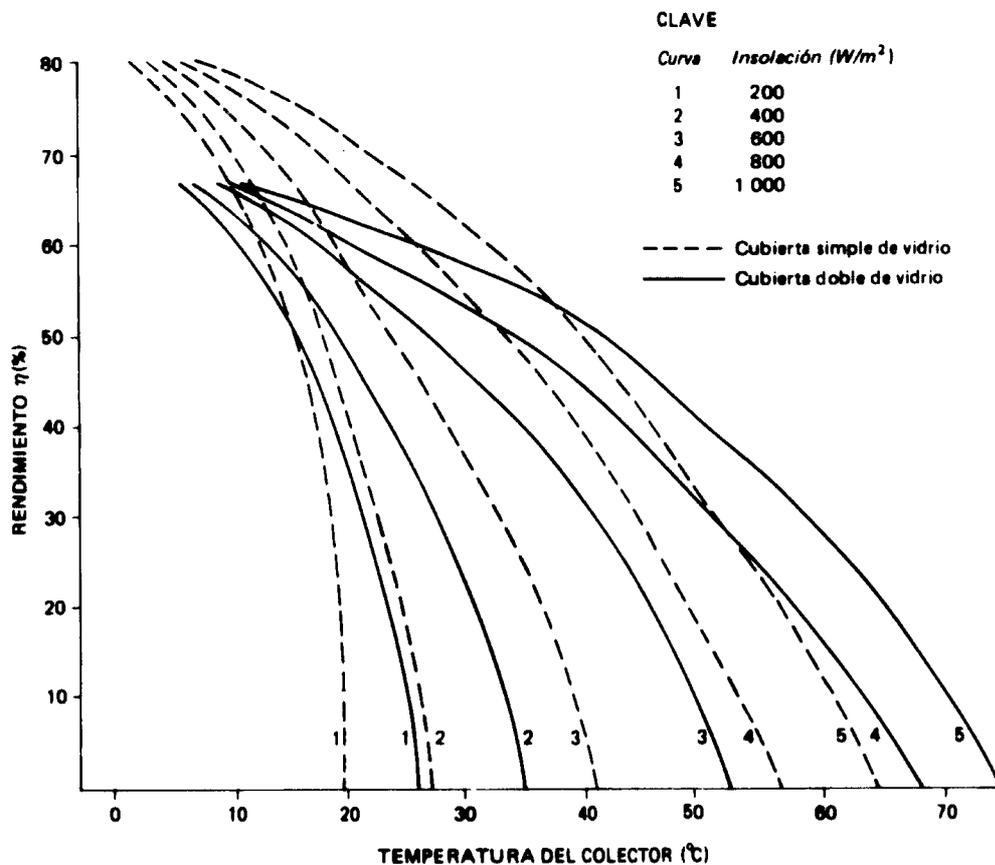


Figura 5. Variaciones en el rendimiento de los colectores en función de su temperatura

calorífico a la temperatura requerida ($54,4^{\circ}\text{C}$) para diversos valores de insolación. Con esta información y un conocimiento de las variaciones diurnas de la insolación, será posible determinar la ganancia útil de energía térmica. En la figura 6 pueden verse las variaciones anuales en la ganancia útil diaria de energía cuando se extrae calor a 60°C . A partir de esta curva, será fácil determinar la superficie de colectores necesaria para suministrar 700 l de agua caliente por serpentín.

Parámetros de diseño del sistema

Los parámetros de diseño obtenidos para un sistema capaz de suministrar calefacción adecuada a 15 lugares de trabajo de la fábrica son los siguientes:

Temperatura ambiente	10°C
Temperatura inicial del agua caliente	$54,4^{\circ}\text{C}$
Temperatura inicial del aire caliente	$26,7^{\circ}\text{C}$
Temperatura del aire caliente tras 6 h	$18,3^{\circ}\text{C}$
Especificación del radiador	Serpentín con ventilador auxiliar
Número N de radiadores	15
Caudal \dot{m}_w de agua por radiador	450 kg/h
Caudal \dot{m}_a de aire	408 kg/h
Valor de ϵ	0,49
Valor de R	0,218
Valor de a	0,15
Superficie del colector	105 m^2

En la figura 7 puede verse un esquema de las tuberías de todo el sistema.

Durante los 18 primeros meses, el sistema ha funcionado de modo muy satisfactorio. En la figura 8 pueden verse las características de funcionamiento de un día típico.

Sistemas combinados de refrigeración y calefacción de locales

Ciclo de calefacción

Alentado por el éxito del sistema de calefacción de la fábrica de Haridwar, el NPL comenzó a diseñar e instalar un sistema combinado de calefacción y refrigeración en una habitación de su sede. Las dimensiones de la habitación eran de $6,1\text{ m} \times 3,7\text{ m} \times 3,0\text{ m}$, con dos puertas (de $2,1\text{ m} \times 1,2\text{ m}$ cada una) y tres ventanas (de 1 m^2 cada una). Al diseñar el sistema de calefacción, se partió de la hipótesis de que la temperatura ambiente era de 10°C , y que la temperatura ideal era de 25°C . Al diseñar el sistema de refrigeración, se partió de la hipótesis de tener que reducir una temperatura ambiente de 35°C a 25°C . Se calculó la necesidad de suministrar a la habitación unos $9,430\text{ MJ/h}$ ($2,250\text{ kcal/h}$) durante el ciclo de calefacción. Durante los meses de verano se necesitaría una refrigeración correspondiente de casi $12,600\text{ MJ/h}$ ($3,000\text{ kcal/h}$). La diferencia entre la carga térmica y refrigeración se debe a la necesidad de efectuar ajustes durante los meses estivales en razón de la humedad.

El sistema de calefacción se basa en el modelo que aparece en la figura 1 y consta de una red colectora situada sobre el edificio, un pequeño tanque aislado de almacenamiento y un radiador de serpentín con ventilador auxiliar. Se utilizó para este experimento el mismo tipo de serpentín con ventilador auxiliar anteriormente descrito. Los valores de ϵ y de R calculados para este tipo de radiador eran de 0,49 y de 0,218, respectivamente.

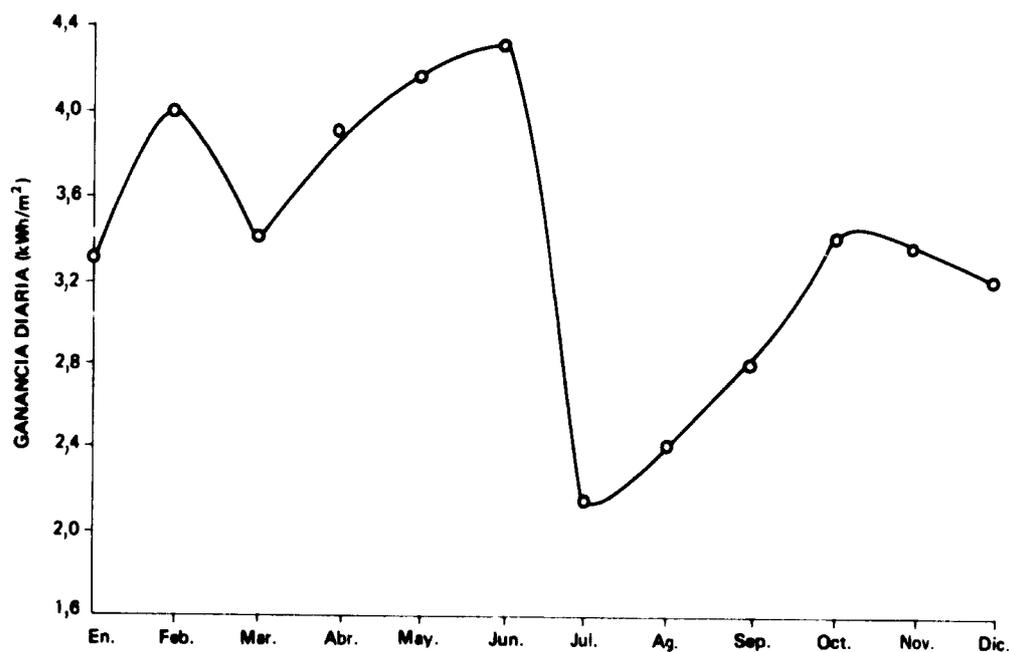


Figura 6. Variaciones anuales en la ganancia útil diaria de energía de un colector que funciona a 60°C

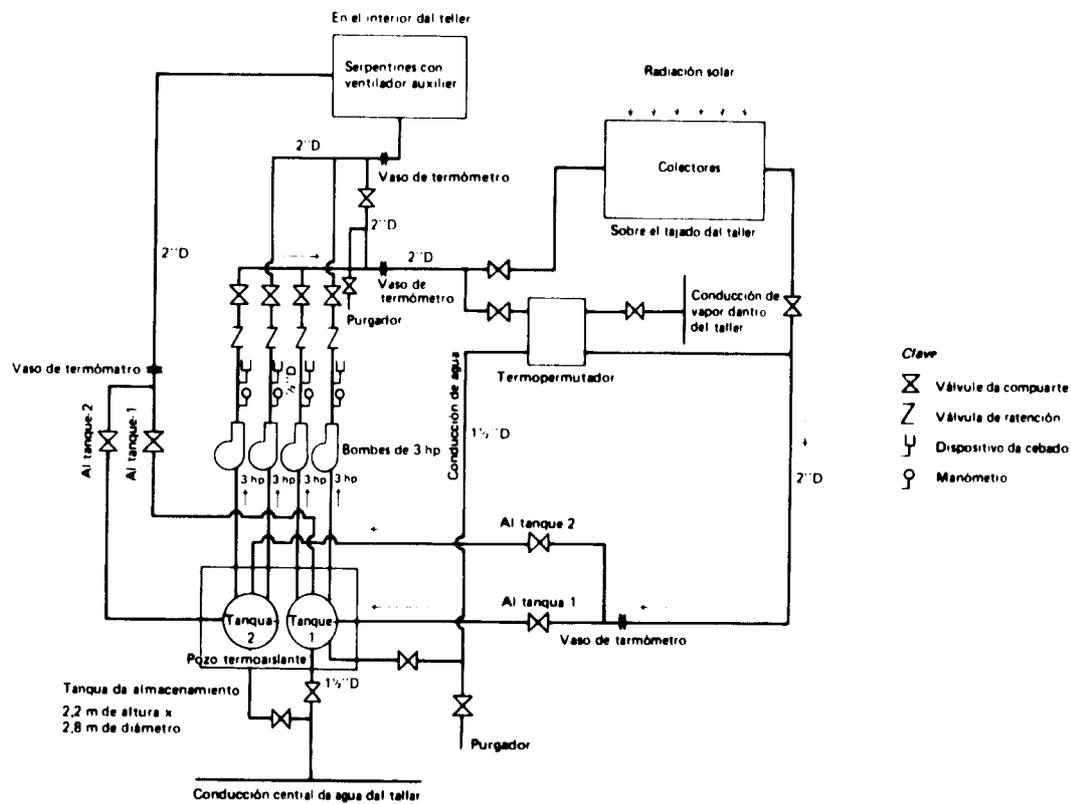


Figura 7. Sistema de calefacción de locales por energía solar en Haridwar; diagrama de las tuberías

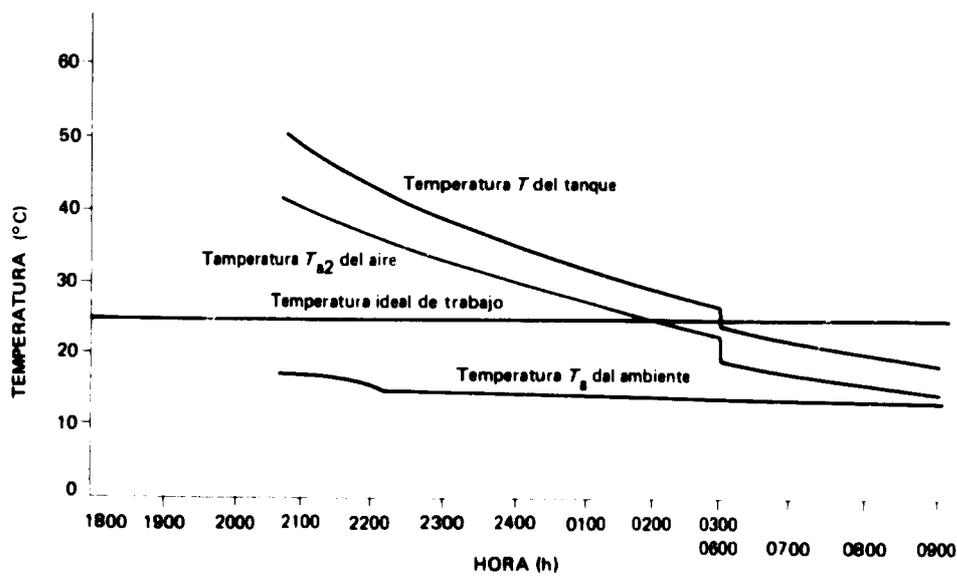


Figura 8. Ciclo de radiación en Haridwar, el 6 de febrero de 1976

En un experimento típico, se hizo pasar agua calentada a una temperatura de 60°C a través del serpentín, a razón de 400 kg/h . El caudal de aire soplado sobre el serpentín fue casi de 280 kg/h . Esto ocasionó una elevación de la temperatura del aire de unos 21°C . La temperatura del agua descendió a 54°C . En consecuencia, la pérdida térmica del agua, o sea, el calor suministrado a la habitación fue de 10.055 MJ/h (2.400 kcal/h). La superficie del colector deberá ser, pues, lo bastante amplia para proporcionar 10.055 MJ/h (2.400 kcal/h) a 60°C . Una válvula de paso de control termostático permite la entrada de agua en el tanque de almacenamiento únicamente a 60°C . Se utilizaron colectores de placa plana de alto rendimiento. La ganancia diaria de energía en un período de 7 horas durante el invierno de Delhi fue como sigue:

Mes	Ganancia de energía (kWh m^{-2})
Noviembre	3,5
Diciembre	3,1
Enero	3,3
Febrero	4,0
Promedio	3,5

La ganancia media de energía por hora fue de $0,5\text{ kWh}$, esto es, de unos $1.800\text{ MJ h}^{-1}\text{ m}^{-2}$. Para obtener la ganancia de energía útil necesaria de unos 9.430 MJ/h , haría falta, pues, una superficie de colector de 5 m^2 . Los parámetros de diseño del sistema de calefacción de locales pueden resumirse como sigue:

Superficie del colector	5 m^2
Especificación del radiador	Serpentín con ventilador auxiliar
Valor de ϵ	0,49
Valor de R	0,218
Caudal de agua en el colector	400 kg/h
Temperatura de entrada del agua en el serpentín	60°C
Caudal de aire soplado a través del serpentín	280 kg/h
Temperatura de salida del agua	54°C
Aumento en la temperatura del aire	21°C

En la figura 9 se observa el funcionamiento satisfactorio del sistema de calefacción en un día típico.

Ciclo de refrigeración

El ciclo de refrigeración es más complicado y complejo que el ciclo de calefacción. Existen tres enfoques básicos para obtener la refrigeración:

- Refrigeración por deshumectación y evaporación;
- Compresión de vapor;
- Absorción de vapor.

En el sistema de refrigeración por deshumectación y evaporación se deshumedece el aire de la habitación mediante un absorbente; sigue una fase de refrigeración por evaporación adiabática, junto con la desorción solar del absorbente en un colector de placa

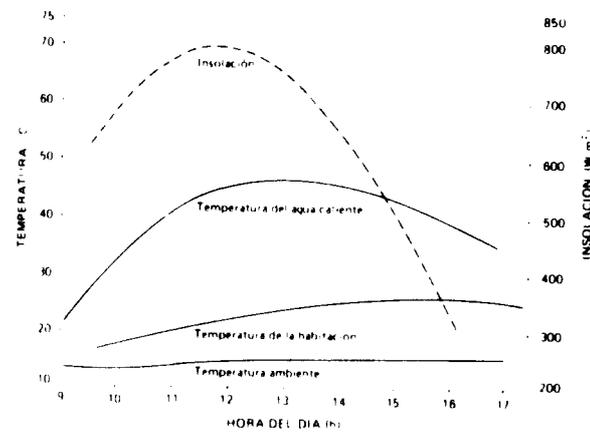


Figura 9. Funcionamiento de un sistema de calefacción por energía solar en el NPL, el 1 de febrero de 1977

plana al aire libre. Este sistema es eficaz en lugares de elevada humedad, pero no lo es mucho cuando la humedad es baja. Por lo demás, tiene el inconveniente adicional de que no puede integrarse con un sistema de calefacción.

El sistema por compresión de vapor se descarta por requerir el empleo de un compresor.

En un sistema de refrigeración por energía solar se dispone de energía térmica a temperaturas de hasta 100°C . Por esto, el ciclo de absorción de vapor resulta el más apropiado.

En la figura 10 pueden verse los elementos principales de un sistema de refrigeración por absorción de vapor. En el ciclo de absorción de vapor se utiliza una mezcla de solvente-refrigerante. Esta mezcla se calienta en el generador con agua que a su vez, ha sido calentada en los colectores solares. Al

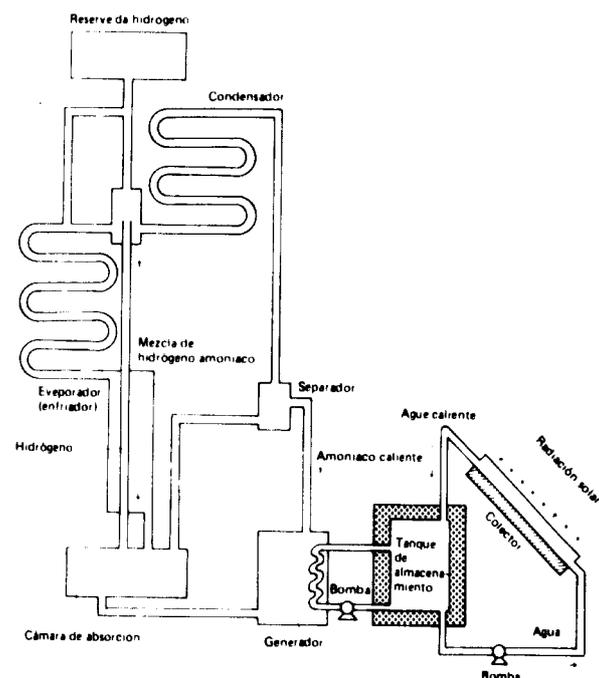


Figura 10. Sistema de refrigeración de locales por energía solar

calentarse la mezcla en el generador libera vapor refrigerante, mezclado posiblemente con pequeñas cantidades de vapor solvente. Esta mezcla de vapor, junto con pequeñas cantidades de la solución, pasa al separador donde el vapor solvente se condensa y se separa. El vapor refrigerante pasa entonces al condensador donde por condensación se convierte en líquido. Este líquido condensado pasa a través de la válvula de admisión al evaporador, donde se evapora. Aquí toma calor latente del baño circundante, produciéndose así la refrigeración necesaria. El vapor es llevado por el gas portador (generalmente hidrógeno) del evaporador a la cámara de absorción, donde el vapor refrigerante es nuevamente absorbido en la solución. La solución resultante pasa de ahí al generador, y el ciclo se repite.

Es preciso prestar particular atención a la selección de la combinación refrigerante-solvente, así como a las operaciones siguientes: el paso de la solución de la cámara de absorción al generador, la separación del vapor refrigerante de la solución diluida en el separador, la condensación del vapor refrigerante para formar líquido, y la transmisión de vapor desde el evaporador a la cámara de absorción. El producto de los rendimientos respectivos de estas operaciones determina el rendimiento del sistema.

Las combinaciones de refrigerante y solvente comúnmente utilizadas son amoníaco y agua, agua y bromuro de litio, o fluorocarbono-refrigerante/tetraetilglicol. El requisito más importante de la mezcla refrigerante-solvente es que el solvente sea capaz de absorber una proporción considerable del refrigerante. Para obtener una refrigeración dada, cuanto mayor sea la concentración de refrigerante en el solvente, menor será el caudal necesario entre cámara de absorción y generador. Es bien conocido que cuanto mayor sea la absorción de refrigerante en el solvente, mayor será la desviación negativa de la ley de Raoult; esto supone también que será mayor la vinculación entre las moléculas del refrigerante y del solvente. Esta vinculación mayor significa que el generador tendría que producir más calor para vaporizar el refrigerante. La combinación de refrigerante y solvente más utilizada es la de amoníaco y agua, que ofrece varias ventajas sobre las otras combinaciones. La capacidad de refrigeración del amoníaco es bastante elevada. Las temperaturas obtenibles utilizando la combinación de amoníaco y agua con colectores de placa plana bastan para el funcionamiento del sistema. Estas y otras ventajas han motivado la selección de la combinación de amoníaco y agua para el sistema de refrigeración construido en la sede del NPL.

Limitaciones de diseño

Como se mencionó anteriormente, la carga térmica de la habitación era de 12.600 MJ/h (3.000 kcal/h). El sistema se diseñó para proporcionar

esta refrigeración. Se utilizó para la refrigeración el mismo grupo de serpentín con ventilador auxiliar que se utilizó para el ciclo de calefacción. Se hizo pasar agua fría a través del serpentín y se sopló aire sobre el mismo. El caudal de agua a través del serpentín se mantuvo a 400 kg/h, igual nivel que en el ciclo de calefacción. El agua fría entra en el serpentín a 10°C y sale a 18°C. El caudal de aire soplado es de 280 kg/h, con una temperatura inicial del aire de 35°C, y de 25°C tras la refrigeración. Se tiene en cuenta el cambio en la humedad relativa del aire tras su refrigeración.

En el ciclo de absorción de vapor, se absorbe calor en el generador y en el evaporador, y se desprende calor en la cámara de absorción y en el condensador. Las temperaturas de estos subsistemas imponen otras limitaciones de diseño. En el norte de la India se dispone de agua de refrigeración a 30°C en los meses de verano, incluso en las condiciones más arduas. Por esto se seleccionaron temperaturas de 30°C para la cámara de absorción y el condensador. Puesto que la mezcla de amoníaco y agua se calienta en el generador con agua caliente procedente de los colectores solares, la temperatura máxima del agua calentada por energía solar constituye otra limitación. Se consideró que la temperatura máxima podía ser de 90°C. Una vez fijadas las temperaturas del generador, del condensador y de la cámara de absorción, la temperatura del evaporador queda automáticamente fijada por el sistema. En este sistema, la temperatura del evaporador será de 10°C.

Parámetros de diseño

En la figura 11 puede verse el sistema instalado. El agua calentada por la energía solar se almacena en un tanque aislado, a una temperatura de 92°C. Esto se consigue intercalando una válvula de paso de control termostático en el circuito colector. A continuación se suministra esta agua caliente al generador. El agua caliente entra por la parte superior y sale por abajo a 85°C. El caudal se mantiene a 5 l/min. El serpentín situado en el interior del generador contiene una solución concentrada de amoníaco en agua. El caudal de esta mezcla de amoníaco y agua (51% de amoníaco) es de 2 kg/min. En el generador se desprende 0,2 kg/min de amoníaco gaseoso, el cual entra a 85°C en el separador, junto con 1,8 kg de solución (41% ó 0,82 kg de amoníaco). La solución diluida de amoníaco se vacía desde el fondo del separador al termopermutador. El amoníaco gaseoso (0,2 kg/min) procedente del separador penetra al nivel medio del analizador que contiene una solución muy concentrada de amoníaco líquido. En el analizador se elimina todo rastro de vapor de agua que haya podido quedar en el amoníaco gaseoso. El vapor de amoníaco deshidratado sale del analizador

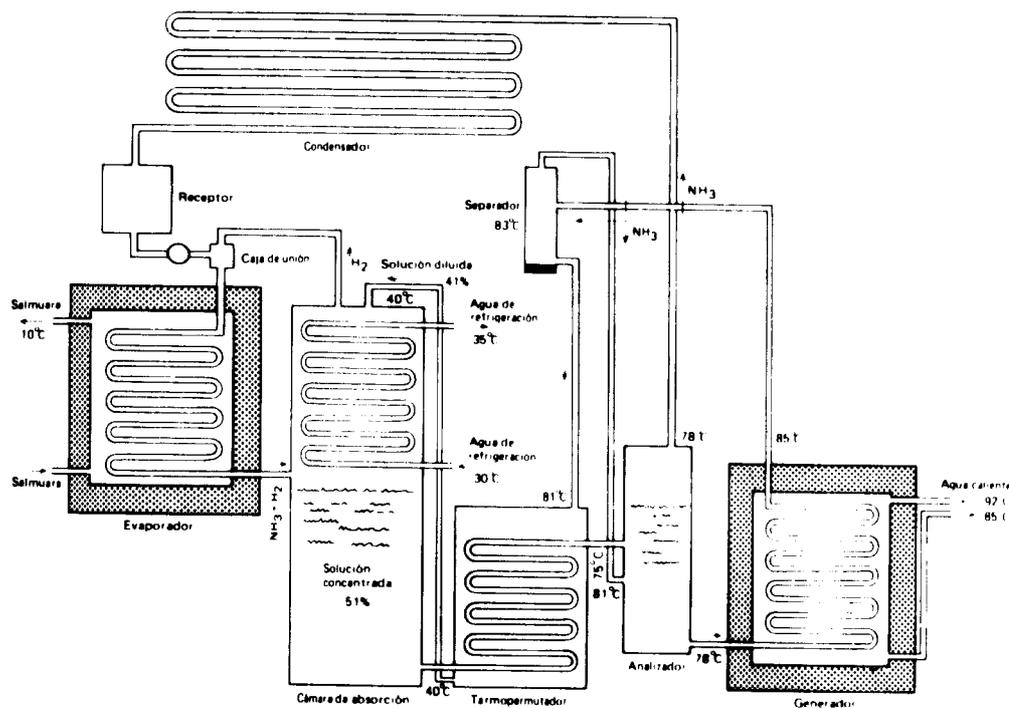


Figura 11. Sistema de refrigeración por energía solar

a una temperatura de 78°C (con un caudal de aproximadamente 0,2 kg/min) y entra en el condensador. Este se refrigera con agua fría a 30°C, y el vapor de amoníaco se condensa a unos 35°C. Durante el proceso de condensación, el agua fría del condensador extrae aproximadamente 242.000 MJ/min (57.700 kilocalorías/min) de calor. El amoníaco líquido circula del condensador al receptor. La corriente de amoníaco se regula a través de una válvula de admisión, y el líquido que pasa se mezcla con hidrógeno en la caja de unión. La mezcla de amoníaco e hidrógeno pasa al evaporador, donde el amoníaco se evapora. La mezcla de gas de amoníaco/hidrógeno, por ser más pesada, desciende a la cámara de absorción en la que penetra por la entrada central. Esta cámara se refrigera con agua a 30°C. El amoníaco entrante se mezcla con la solución, y la solución concentrada (51% de amoníaco) se reúne en el fondo de la cámara. Esta solución pasa al termopermutador, donde intercambia calor con la solución más diluida que entra del separador a 81°C. Como resultado de este intercambio térmico, la temperatura de la solución concentrada se eleva a 75°C; dicha solución entra en el analizador, y una cantidad igual de solución pasa del analizador al generador para repetir el ciclo. Se mantiene el sistema total a una presión de 12,1 barías. El hidrógeno actúa como gas portador y ayuda a llevar el vapor de amoníaco del evaporador a la cámara de absorción, y también a reducir la presión

parcial, el punto de ebullición del amoníaco en el serpentín del evaporador es de unos 5°C.

Es preciso pasar cinco litros de agua por minuto a 90°C a través del generador. Este parámetro determina las dimensiones de la superficie del colector. En el sistema de refrigeración de locales, la demanda de refrigeración está en fase con la insolación.

La ganancia diaria de energía a lo largo de un periodo de siete horas durante los meses estivales es la siguiente:

Mes	Ganancia de energía (k Wh/m ²)
Abril	3,0
Mayo	3,4
Junio	3,8
Promedio	3,4

La ganancia media de energía útil por hora viene a ser por tanto de aproximadamente 0,5 kWh/m². Sobre esta base se requerirían 7 m² de superficie de colector para producir la refrigeración necesaria. Por ello, la superficie de colector necesaria viene a ser aproximadamente la misma tanto para los ciclos de calefacción como para los ciclos de refrigeración de locales. El serpentín con ventilador auxiliar es también un elemento común a ambos ciclos. Se está ensayando uno de estos sistemas combinados de calefacción y refrigeración de locales. El ciclo de calefacción se ha ensayado con éxito, y se espera poder ensayar pronto el ciclo de refrigeración con buenos resultados.

Datos técnicos preliminares para la construcción de una casa solar en Riyadh

A. A. M. Sayigh y E. M. A. El-Salam

Colegio de Ingeniería, Riyadh (Arabia Saudita)

Una de las principales aplicaciones de la energía solar se encuentra en el hogar. La energía requerida para la calefacción y refrigeración de casas y para el funcionamiento de los aparatos electrodomésticos representa más del 20% de toda la energía consumida en los Estados Unidos de América, Europa y el Japón¹, y alrededor del 50% de la energía total consumida en los países en desarrollo. En éstos, las casas solares son más necesarias que en ninguna otra parte, principalmente porque permiten destinar la energía así economizada a fines más vitales.

Como la Arabia Saudita es el país más rico del mundo en cuanto a disponibilidad de energía solar², la proyección y construcción de casas solares en ese país permitiría, no sólo economizar energía a escala nacional, sino también construir casas en lugares apartados donde no se disponga de las formas tradicionales de energía o donde éstas no sean económicas. Por ello, se realizó un estudio con el fin de determinar los medios óptimos de construir casas solares en la zona de Riyadh. El estudio versó sobre los materiales de construcción, los sistemas de aire acondicionado, la generación de electricidad y los costos. A continuación, se examinan las conclusiones emanadas de ese estudio.

Riyadh está situada casi en el centro del país, a 24°42' de latitud N y 46°43' de longitud E. Se encuentra a unos 600 m sobre el nivel del mar y cuenta con unos 750.000 habitantes. Tiene una pluviosidad anual de tan sólo 50 mm, aproximadamente, y una humedad relativa media anual de 30%.

¹C. A. Berg: "A technical basis for energy conservation", *American Society of Mechanical Engineers. Quarterly Transactions*, vol. 98, núm. 5, mayo de 1974, págs. 30-42.

²A. A. M. Sayigh: "Saudi Arabia and its energy resources", monografía preparada para la Conferencia Internacional sobre Energía Solar, COMPLES, Universidad del Petróleo y los Minerales, Dhahran, 1-5 de noviembre de 1975; "The energy prospects in the Arab World", monografía preparada para la Conferencia Internacional sobre Ingeniería Mecánica, Universidad de Ingeniería y Tecnología, Lahore, Pakistán, 6-11 de octubre de 1975.

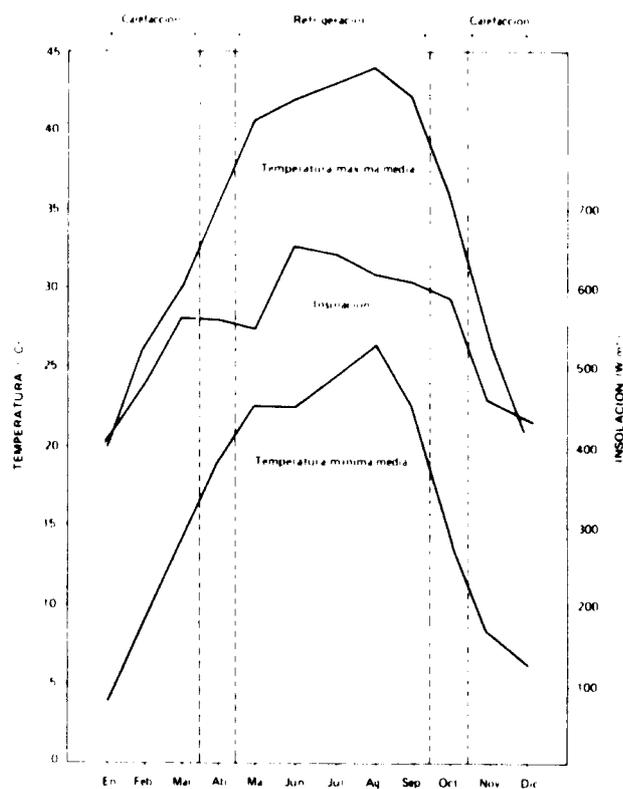


Figura 1. Períodos de calefacción y refrigeración en Riyadh

En la figura 1, se indican las temperaturas máxima y mínima medias y la insolación total de Riyadh³, así como los meses en que se requiere calefacción o refrigeración. En verano, aumenta el consumo de electricidad, debido a la mayor demanda de refrigeración, y en invierno el de gas, a causa de la mayor demanda de calefacción.

³J. A. Sabbagh, A. A. M. Sayigh y E. M. A. El-Salam: "Estimation of the total solar radiation from meteorological data", monografía preparada para la Conferencia ISES, Los Angeles, 28 de julio-1 de agosto de 1975.

Materiales de construcción

Se ensayaron diversos materiales locales de construcción desde el punto de vista de su resistencia e idoneidad para la construcción de casas solares: ladrillos de arcilla (con paja y sin ella), ladrillos de arcilla cocidos a 1.000°C y bloques de cemento parcialmente huecos. En los cuadros 1 a 3, se indican las propiedades de esos materiales.

Se expusieron a la radiación solar, durante todo el día, las superficies de diversos materiales de construcción, y se registraron sus temperaturas según se indica en la figura 2. Las capacidades de emisión y de absorción de esos materiales se obtuvieron experimentalmente, conforme se indica en el cuadro 4.

Para determinar los efectos de la erosión y la lluvia sobre los materiales de construcción, las muestras fueron sometidas, durante todo un día, a un chorro continuo de agua como también al chorro, a velocidad moderada (30 km/h), de una máquina de arena seca. Los efectos se indican en el cuadro 5.

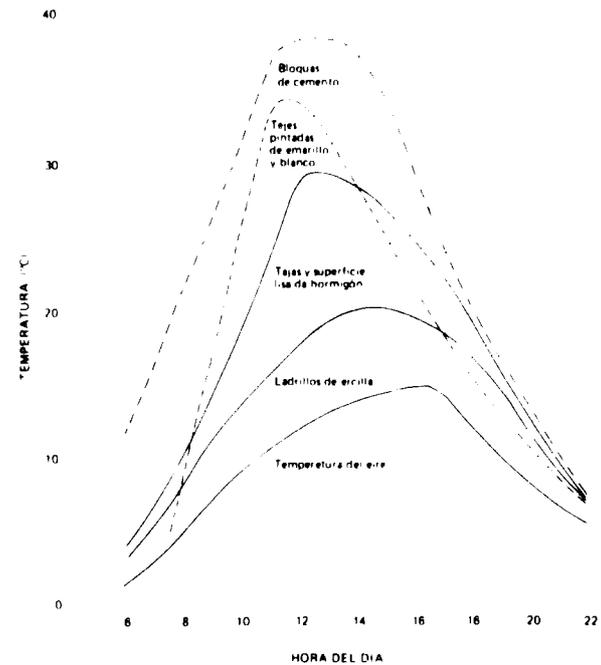


Figura 2. Temperaturas superficiales de diversos materiales de construcción

CUADRO 1. PROPIEDADES DE LOS LADRILLOS FABRICADOS CON ARCILLA DE NASIRIA (MUESTRA A)

Número	Tipo de muestra ^a	Peso (kg)	Dimensiones (cm)	Área de la sección transversal (cm ²)	Carga de aplastamiento final (kg)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Contenido de agua (% peso)
1	Cubo sin paja	5,119	14,5 x 14,3	207,35	3 700	17,84	2,85
2	Cubo con paja	4,503	14,8 x 14,0	207,2	920	4,44	2,61
3	Cilindro con paja	6,672	15,0 diám.	176,63	570	3,22	3,34
4	Cilindro con paja	6,519	15,0 diám.	176,63	1 480	8,37	3,4
5	Cilindro sin paja	7,895	14,5 diám.	165,05	700	4,24	5,47

^a Las proporciones de la mezcla, tomadas de una vieja fórmula que se empleó antaño en Riyadh para la construcción de casas, fueron (% peso): a) con paja: arcilla, 73,4; agua, 25,5; paja, 1,1; b) sin paja: arcilla, 77,5; agua, 22,5.

CUADRO 2. PROPIEDADES DE LOS LADRILLOS FABRICADOS CON ARCILLA VIEJA DE MANFOHA (MUESTRA B)

Número	Tipo de muestra	Peso (kg)	Dimensiones (cm)	Área de la sección transversal (cm ²)	Carga de aplastamiento final (kg)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Contenido de agua (% peso)
1	Cubo sin paja	4,465	13,8 x 13,6	187,68	4 920	27,03	2,82
2	Cubo con paja	4,261	14,2 x 14,00	198,8	1 820	9,154	2,77
3	Cilindro con paja	6,976	13,9 diám.	151,67	2 570	16,94	2,81
4	Cilindro con paja	6,315	14,5 diám.	165,05	770	4,66	2,9
5	Cilindro sin paja	6,155	14,5 diám.	165,05	630	3,82	2,9

CUADRO 3. PROPIEDADES DE LA MUESTRA C (ARCILLA COCIDA A 1.000°C) Y MUESTRA D (BLOQUE DE CEMENTO HUECO)

Muestra	Tipo de muestra	Peso (kg)	Dimensiones (cm)	Área de la sección transversal (cm ²)	Carga de aplastamiento final (kg)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Contenido de agua (% peso)
C	Cubo	0,372	6 x 5,8 x 5,9	34,8	4 200	120	0,0
D	Bloque	23,25	40 x 20 x 20	800	18 160	22,7	0,0

CUADRO 4. CAPACIDADES DE EMISION Y DE ABSORCION DE DIVERSOS MATERIALES DE CONSTRUCCION

Material de construcción	Capacidad de emisión	Capacidad de absorción
Ladrillos refractarios a 1000°C	0,75	0,75
Ladrillos de arcilla	0,67	0,65
Bloques de cemento	0,90	0,90
Tejas	0,9	0,9

CUADRO 5. EFECTOS DE LA EROSION Y LA LLUVIA SOBRE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCION

Muestra	Cantidad de lluvia absorbida	Erosión
A		
Con paja	Regular	Escasa
Sin paja	Apreciable (desintegración)	Escasa
B		
Con paja	Regular	Escasa
Sin paja	Apreciable	Escasa
C	Ninguna	Ninguna
D	Muy poca	Ninguna

Sistemas de aire acondicionado

De todas las aplicaciones que la energía solar pudiera tener en los países tropicales, las más viables son las de la calefacción y la refrigeración. Durante el verano, la radiación solar es intensa y puede utilizarse para fines de refrigeración; en invierno, un sistema de colectores de placa plana puede proporcionar más calor del que realmente se necesita.

Refrigeración

Se han ensayado diversos tipos de sistemas de refrigeración. Ward y Löf⁴ utilizaron, en su sistema residencial, una unidad refrigeradora de absorción, de bromuro de litio, de 3 toneladas. Esa unidad fue modificada de modo que pudiera utilizarse agua caliente en lugar de gas natural como fuente del calor suministrado al generador. En un proyecto realizado en California se utilizó, para fines de refrigeración, un sistema de absorción de amoníaco-agua⁵. En las publicaciones especializadas, se encontrarán numerosas monografías que describen otros proyectos⁶.

⁴D. S. Ward y G. O. G. Löf: "Design and construction of a residential solar heating and cooling system", *Solar Energy*, vol. 17, núm. 1 (1975), págs. 13-20.

⁵Universidad de California, Lawrence Berkely Laboratory: *Control System for Combined Solar Heating and Cooling Systems*, Progress Report No. 1, enero de 1975.

⁶Por ejemplo, R. L. Oonk, W. A. Beckman y J. A. Duffie: "Modeling of the CSU heating/cooling system", *Solar Energy*, vol. 17, núm. 1 (1975), págs. 21-28; y G. O. G. Löf y R. A. Tybout: "The design and cost of optimized systems of residential heating and cooling by solar energy", *Solar Energy*, vol. 16, núm. 1 (1974), págs. 9-18.

La refrigeración nocturna se estudió midiendo la temperatura de diferentes superficies durante la noche, según se indica en las figuras 3 y 4. Jones⁷ sugiere que, para mayor comodidad, las temperaturas interiores deben ser de 4° a 11°C más bajas que las exteriores, con una humedad relativa de aproximadamente 50%. La mejor combinación, para la refrigeración nocturna, consiste en utilizar superficies con una fina capa (2-5 cm) de agua, según se indica en la figura 3. Con este método, se obtuvo, durante siete horas de la noche, una temperatura media de 10°C por debajo de la temperatura ambiente. En Shiraz, según Bahadori⁸, se logró, por el procedimiento de hacer circular el aire exterior durante dos horas de la noche (de 2 a 4 horas) a una velocidad media de 9,1 m/min a través de una masa de roca de un volumen de 39,4 m³, que ésta alcanzara la temperatura mínima media del aire, que era de unos 17,8°C. En Riyadh, utilizando la temperatura mínima de un colector con capa de agua, temperatura que alcanza los 20°C durante los meses de verano, y con un régimen de flujo de 10 m/min, es posible enfriar hasta esa temperatura, durante la noche, una masa de roca de 160 m³. Si se almacena el calor, en parte, en el agua y, en parte, en la roca, y si el depósito de agua tiene una capacidad de 30 m³, se requerirán 66,4 m³ de roca como almacenamiento suplementario.

La casa considerada tiene una superficie de piso de 100 m² y una altura de 3 m. Consta de dos habitaciones, cuarto de baño, cocina, desván, y un sótano de 3 m de profundidad de igual superficie de piso que la casa.

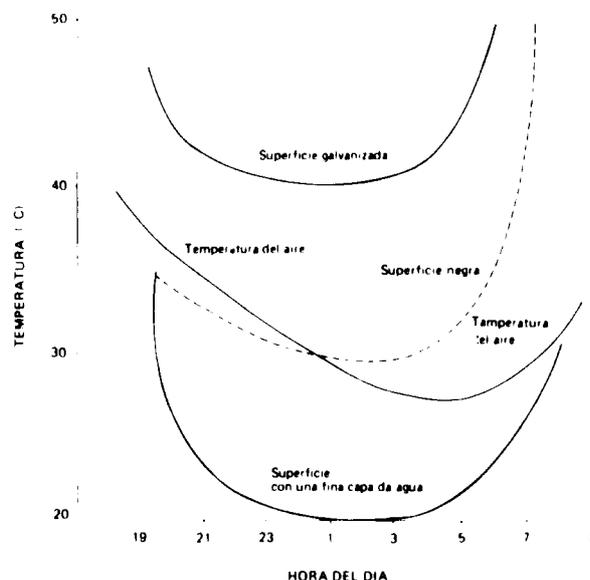


Figura 3. Temperaturas de diversas superficies registradas durante la noche del 18 de junio de 1975

⁷W. P. Jones: *Air Conditioning Engineering*, segunda edición, Arnold, 1973.

⁸M. N. Bahadori: "A feasibility study of solar heating in Iran", *Solar Energy*, vol. 15, num. 1, mayo de 1973.

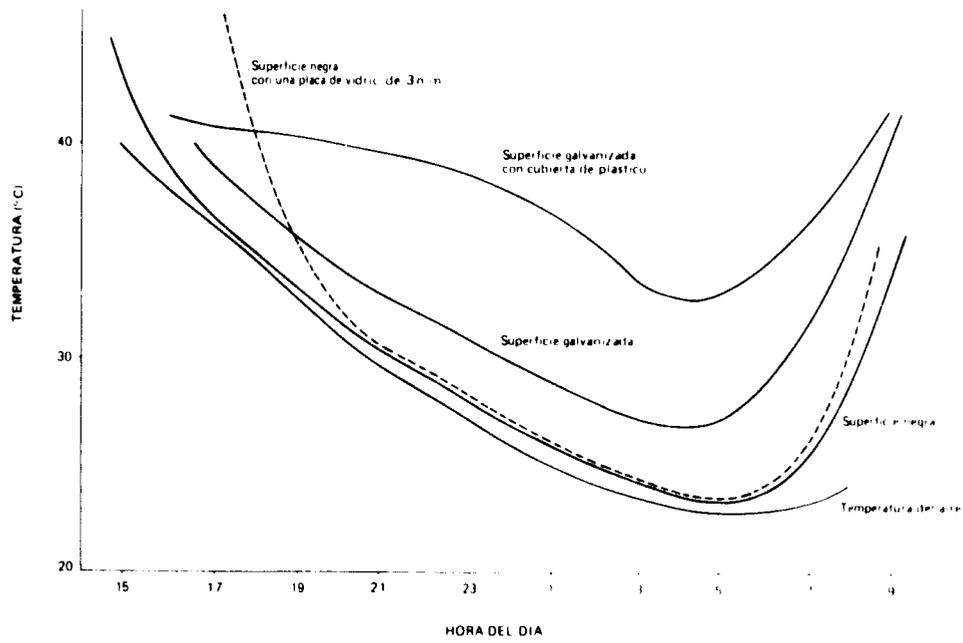


Figura 4. Temperaturas de diversas superficies registradas durante la noche del 2 de septiembre de 1975

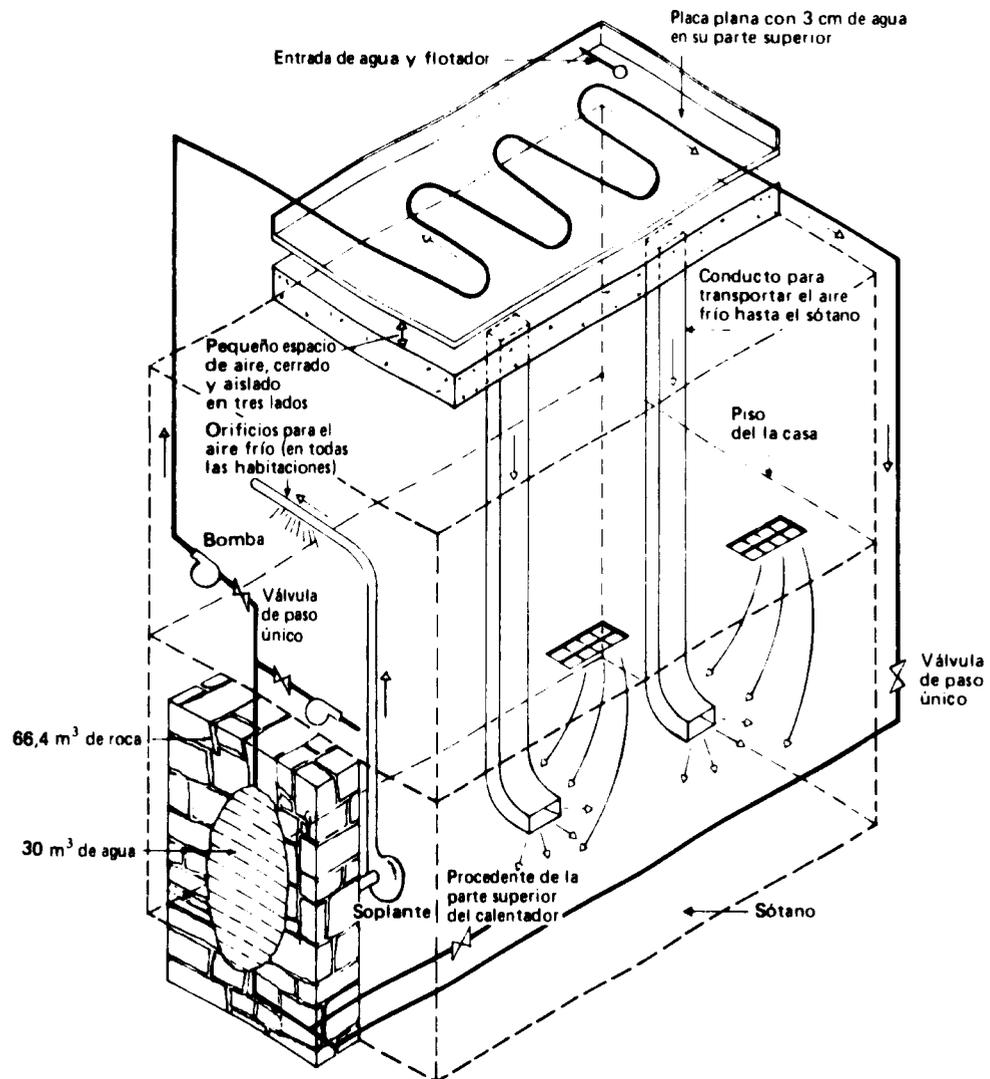


Figura 5. Sistema de refrigeración nocturna

Si se toman en consideración las condiciones exteriores e interiores del proyecto, el tipo de estructura, las puertas y ventanas, las instalaciones de alumbrado y otras instalaciones interiores de la casa, el número de habitantes y la ventilación necesaria, ese tipo de casa requerirá tres toneladas de refrigeración (10,56 kW). En la zona de Riyadh, ese valor representa un régimen de extracción de aproximadamente 40 W/m^3 en las horas de carga máxima. Al cabo de 10 horas de funcionamiento, la energía total disipada es $3,3 \times 10^8 \text{ J}$ para un régimen medio de 9 kW. A base de esos datos, puede calcularse que la temperatura de la casa será de $21,56^\circ\text{C}$, es decir, $1,56^\circ\text{C}$ más alta, lo que es tolerable.

La figura 5 ilustra el sistema de refrigeración nocturna.

Calefacción

Un material de almacenamiento idóneo: a) ha de tener una alta capacidad calorífica; b) ha de ser altamente cinético (es decir, que el calor pueda extraerse rápidamente del mismo); c) no ha de congelarse; y d) no ha de corroer ni oxidar los recipientes que lo contengan.

El calor puede almacenarse en forma de:

a) Calor sensible en un líquido o un sólido. Ejemplos de ello son: el agua, a condición de que la temperatura se mantenga entre 0° y 100°C ; la roca, que es barata, pero que tiene sólo una cuarta parte del calor específico del agua y, por ende, se precisa una masa cuatro veces mayor que la de ésta para conseguir la misma capacidad de almacenamiento; la cera C_{15} , que, con un punto de fusión de 5° a 10°C y una capacidad calorífica 28 veces la de un volumen igual de agua, puede utilizarse como medio de almacenamiento en un sistema de refrigeración;

b) Calor latente de fusión, como el de una barata solución de salmuera. Presenta un gran inconveniente: la aparición de efectos de estratificación en la fusión y la congelación;

c) Calor de una transición de fase sólida, como en el óxido de vanadio o el sulfuro férrico. En este último, la transición tiene lugar a 138°C ; la capacidad de almacenamiento es de 230 kJ/l ;

d) Calor de una reacción reversible, como en el sistema de dos cámaras con ácido sulfúrico en concentración baja en una y alta en la otra. Las reacciones reversibles entre el ácido y el agua se utilizan para almacenar y recuperar el calor.

La figura 6 ilustra el sistema de calefacción solar que utiliza agua y roca para el almacenamiento del calor sensible y una batería solar para generar electricidad.

Generación de electricidad

Las necesidades de energía eléctrica de ese tipo de casa, habida cuenta del consumo total de los aparatos electrodomésticos, del alumbrado, de las bombas de agua y de los ventiladores, se calcularon en 1 kW. El equipo solar para el abastecimiento de energía (batería solar, batería de almacenamiento, caja de mandos e inversor) se concibió de modo que pudieran cubrirse todas esas necesidades. En el proyecto, se utilizaron los siguientes factores:

Número medio de horas de sol al día	10
Relación de insolación = (fracción del tiempo durante el cual luce el sol) x (factor del ángulo de incidencia)	0,2
Rendimiento de la batería de almacenamiento	0,834
Rendimiento del inversor	0,65
Factor de pérdida general	0,9

Se emplearon cuatro sistemas de baterías solares de silicio de 24 V, cada una, con una potencia de salida de 89 W, en paralelo. Cada sistema de baterías tenía una superficie aproximada de 3 m^2 ; esos sistemas se instalaron en la parte superior de la casa, orientados hacia el sur, con una inclinación de 35° respecto a la horizontal. La batería de almacenamiento utilizada era del tipo de líquido excitador (plomo-ácido) recargable y cerrada, con una capacidad de 12 kWh. El inversor producía corriente alterna monofásica de 50 hertzios a 110-120 V, con una potencia nominal de 500 VA.

El diagrama de la batería solar para el suministro de energía puede verse en la figura 7. Cuando luce el sol, la corriente pasa a través del diodo, carga la batería de almacenamiento y acciona el inversor. El diodo de bloqueo impide que la corriente de la

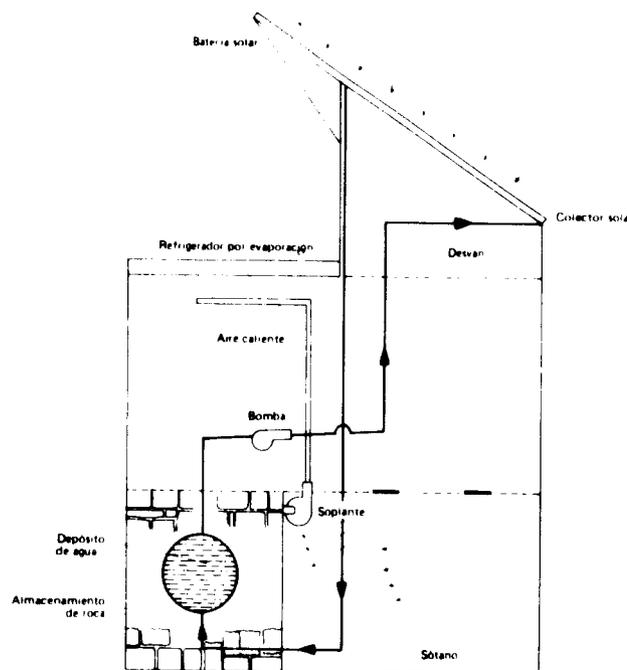


Figura 6. Sistema de calefacción solar

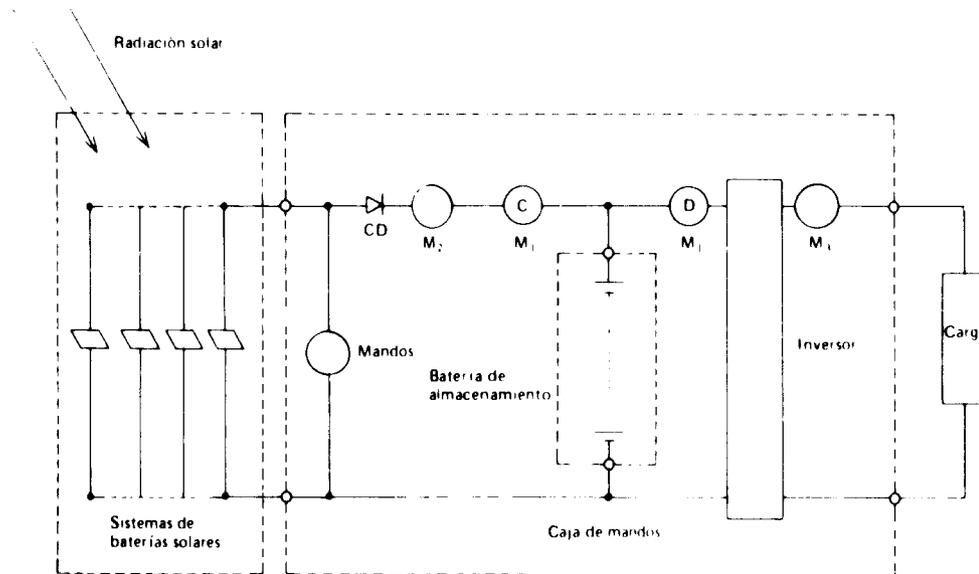


Figura 7. Diagrama de la batería solar que suministra la energía: CD es un diodo que bloquea la corriente invertida, y M₁, M₂ y M₃ son voltiamperímetros que miden las corrientes de carga y descarga, las tensiones en los bornes, etc.

batería de almacenamiento sea devuelta y consumida por las baterías solares cuando éstas no reciben energía solar, bien por la noche, bien cuando las condiciones meteorológicas son malas.

Análisis de costos

La casa solar resulta más cara que una vivienda de tipo tradicional, principalmente a causa del alto costo de la energía eléctrica que necesita. A continuación, se detallan los costos de una de estas casas (en miles de riyals de Arabia Saudita)⁹:

Materiales y trabajos de construcción	50
Sistema de calefacción y refrigeración (refrigeración nocturna)	20
Instalaciones de almacenamiento y alumbrado	10
Generación de energía eléctrica	140
Costo total, excluido el terreno	220

Una casa de tipo tradicional costaría alrededor de 100.000 riyals. El costo del equipo solar de calefacción y refrigeración es casi el mismo que el del equipo tradicional. Esta conclusión ha sido corroborada por otros investigadores¹⁰.

Conclusiones

El estudio de los parámetros técnicos correspondientes a una casa solar construida en la Arabia Saudita indica que la construcción de ese tipo de casas es, no sólo viable, sino también práctica. De los diversos materiales de construcción indicados en los cuadros 1 a 5, la combinación óptima es la de la

⁹ \$1 = 3,5 riyals.

¹⁰ R. K. Swartman, V. Ha y C. Swaminathan: "Comparison of ammonia-water and ammonia-sodium thiocyanate in a solar refrigeration system", *Coopération méditerranéenne pour l'énergie solaire (COMPLES)*, primer semestre de 1974.

muestra C. La pared, de ladrillos de 10 cm de espesor en el exterior y en el interior separados por una cavidad de 20 cm, rellena de material alveolar, deberá tener un espesor de 40 cm. El sistema de refrigeración puede ser el de refrigeración nocturna de la figura 5, o un sistema de acondicionamiento de aire de absorción con bromuro de litio/agua alimentado con energía solar¹¹. Si se emplea la refrigeración nocturna o la refrigeración por evaporación, es preciso calcular la cantidad de agua evaporada por día, por escasear ésta en Riyadh. La evaporación media medida en la cuba durante junio, uno de los meses más calurosos en Riyadh, es de 300 mm¹², o sea, una media de 1 cm por día. Como la cuba tiene una superficie de 50 m², la cantidad de agua perdida por evaporación por día será 0,5 m³. En cuanto a la calefacción, se proponen diversos colectores de placa plana de 80 m² con superficies selectivas. La cantidad de energía solar de que puede disponerse, para fines de calefacción, durante enero se calculó en 59 × 10⁸ J por día. Con esa energía, puede elevarse la temperatura de la casa en 5°C durante el día. Por lo que respecta a la batería solar, esta puede utilizarse para fines de calefacción, con lo que se dispondrá de una energía adicional de aproximadamente 8 × 10⁶ J por día. En cuanto al análisis de costos, la partida principal corresponde a la batería solar. Aparte de esto, los costos de una casa solar son más o menos idénticos a los de una casa de tipo tradicional. El empleo de la calefacción y refrigeración solares se traducirá en una economía de unos 14 riyals por día.

¹¹ J. A. Duffie y W. A. Beckman: *Solar Energy Thermal Processes*, primera edición (Nueva York, Wiley Interscience, 1974).

¹² Raikes y Partners: "Hydrological service for the period 1 August 1968 to 31 August 1970", informe preparado para el Ministerio de Agricultura y Recursos Hidráulicos de Arabia Saudita.

La refrigeración solar en los países en desarrollo

A. Eggers-Lura

International Solar Power Co. Ltd., Gentofte (Dinamarca)

Para que las tecnologías de refrigeración solar puedan aplicarse en condiciones económicas en los países en desarrollo, es preciso que satisfagan los siguientes requisitos:

a) El equipo de refrigeración ha de ser sencillo y barato, de modo que pueda fabricarse en los países en desarrollo con los materiales y la mano de obra que éstos posean;

b) El equipo ha de ser aceptable para la población desde un punto de vista social y adaptarse a los hábitos vitales y laborales de ésta;

c) No deberá precisarse ni fuerza motriz ni equipos auxiliares.

La mayor parte de las investigaciones básicas sobre refrigeración solar se realizaron en los años 50, y fueron objeto de un informe que se presentó en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre nuevas fuentes de energía, celebrada en Roma en 1961. A partir de entonces, esas investigaciones se suspendieron casi por completo, y no se reanudaron activamente hasta la aparición de la "crisis energética". No obstante, a base de los trabajos ya realizados, es relativamente fácil concluir que tecnologías, entre las actualmente disponibles, son las más idóneas o económicas desde el punto de vista de los países en desarrollo.

Actualmente, las tecnologías de refrigeración susceptibles de aplicarse en los países en desarrollo son solamente dos: la refrigeración por evaporación y la refrigeración por absorción intermitente. Todos los demás procesos de refrigeración son demasiado complicados o costosos para que puedan tomarse en consideración. El proceso de refrigeración por absorción continua requiere temperaturas de trabajo demasiado elevadas y, por ende, el empleo de colectores de concentración, que son demasiado caros y difíciles de manejar.

Refrigeración por evaporación

En principio, los refrigeradores para alimentos por evaporación consisten en un recipiente rodeado

de una pieza de tejido, de forma conveniente, cuya parte inferior se sumerge en una batea con agua. Esta es absorbida por el tejido y, por efecto de la acción capilar, se comporta como una mecha, ya que el agua humedece la mayor parte o la totalidad del tejido. Si el clima es seco y se coloca el refrigerador en un lugar sombreado donde corra aire, los alimentos, a medida que se evapore el agua, se enfriarán hasta una temperatura muy inferior a la ambiente.

A continuación, se describen tres tipos sencillos de refrigeradores de evaporación para alimentos que podrían construirse económicamente tal vez en serie con materiales disponibles en casi todos los países en desarrollo. La introducción en gran escala de estos refrigeradores en las poblaciones rurales de los países en desarrollo requeriría, más que nada, enseñar a la población a construirlos y utilizarlos.

Refrigeradores tipo canasta

Con bambú o con ramas delgadas y flexibles de otras plantas, se teje una canasta de tapa suelta. El tamaño de la canasta dependerá de las necesidades de la familia. Se fabrica una especie de batea, cuadrada o redonda, de barro cocido o metal en la que pueda colocarse la canasta. Para ello, cabe utilizar la parte inferior de un bidón de petróleo, limpio. La batea, que deberá tener una altura de 25 a 30 cm y ser más ancha que la canasta, se colocará en un lugar frío y sombreado de la cocina, lejos del fogón, donde habitualmente corra aire. En la batea, se colocarán algunos ladrillos o piedras planas de modo que la canasta se asiente uniformemente sobre los mismos.

Se cose arpillera flexible u otro tejido apropiado alrededor del borde de la canasta. El tejido deberá colgar libremente alrededor de la parte inferior y penetrar en la batea. Análogamente, se coserá arpillera sobre la tapa de la canasta. Luego, se colocará ésta sobre los ladrillos o las piedras, se introducirán en ella los alimentos y se volverá a cubrir con la tapa. Se cubre el fondo de la batea con agua, y la cubierta de arpillera de la canasta se humedece la primera vez que se use, y luego de vez en cuando.

La canasta propiamente dicha no debe estar en contacto con el agua, pero la arpillera que rodea su parte inferior colgará de modo que se moje. La arpillera se comportará como una mecha y, por la acción capilar, el agua la humectará. Los alimentos se enfriarán a medida que se evapore el agua. Este tipo de refrigerador presenta la ventaja adicional de que no deja que los insectos voladores se posen en los alimentos, los cuales, gracias al agua, quedarán también protegidos de las cucarachas y otros insectos de ese tipo.

Refrigeradores tipo armario

Utilizando la misma tecnología del refrigerador de canasta, puede construirse un refrigerador de evaporación de grandes dimensiones, tipo armario, para la conservación de alimentos. Se construye una armazón de madera, unida con clavos o tornillos, y se la coloca en el interior de una batea con agua. Encima de esta armazón puede colocarse también otra batea con agua. Para facilitar el acceso a los alimentos, que se colocarán sobre anaqueles de tela metálica dispuestos en el interior, puede ponerse una puerta de entramado, articulada con goznes. Se cubre la armazón de madera con arpillera u otro tejido adecuado, y se sumerge parte de ella en las bateas superior e inferior, llenas de agua.

Refrigeradores tipo jarra

Pueden fabricarse refrigeradores de evaporación enteramente de barro cocido en forma de cántaros o botijas, sistema que se ha venido utilizando durante siglos en Asia para enfriar las bebidas y el agua de baño. Este tipo de refrigeradores se encuentra en todos los pueblos de Birmania, China, Filipinas, Indonesia, Kampuchea Democrática, Malasia, Tailandia y Viet Nam. Hasta la segunda guerra mundial, se utilizaron profusamente, en Europa, pequeños refrigeradores de evaporación de barro cocido para enfriar la mantequilla y el queso.

Refrigeración por absorción intermitente

Si la refrigeración por evaporación es apropiada sólo para los pequeños refrigeradores domésticos, la refrigeración por absorción intermitente puede aplicarse tanto a nivel familiar como a nivel colectivo. Este tipo de refrigeración presenta la ventaja de que los ciclos de generación y absorción se ajustan al ciclo solar.

El equipo empleado para la refrigeración por absorción intermitente es algo más complejo y costoso que los refrigeradores de evaporación. Por

ello, es necesario determinar si, en las zonas rurales, el equipo de refrigeración ha de utilizarse con carácter particular o con carácter colectivo.

Para empezar, pudiera ser preferible concentrarse en las instalaciones y equipos susceptibles de un empleo colectivo, ya que sería más fácil enseñar a un reducido número de personas con inclinaciones técnicas a explotar una planta de propiedad colectiva que a un numeroso grupo de miembros de familias individuales. Si la instalación produjese hielo en bloques, y si cada familia tuviese una nevera para la conservación de alimentos, algún miembro de la familia podría llevar a casa, todos los días, una porción de hielo de la instalación colectiva y colocarla en la nevera. Es probable que algún empresario local (los tenderos, por ejemplo) estuviese dispuesto a organizar la producción, venta y distribución del hielo, tal vez con la ayuda de las autoridades.

Pero también es posible construir refrigeradores de absorción intermitente pequeños, sencillos y baratos para los particulares; el inconveniente es que este tipo de refrigerador podría resultar en la actualidad demasiado caro en la mayoría de las zonas.

Los refrigeradores de absorción intermitente, sean de pequeñas o grandes dimensiones, pueden ser alimentados con la energía suministrada por un colector de placa plana, al que se podría dotar de espejos metálicos planos para aumentar ligeramente la concentración.

Refrigeradores individuales

Para los hogares, el tipo de refrigerador de absorción que se puede considerar sería el denominado "bola helada". Este invento, que data de 1920, emplea agua como absorbente y amoníaco como refrigerante y puede calentarse con keroseno, parafina, gas e incluso leña. Las bolas heladas se utilizaron profusamente en Canadá, los Estados Unidos de América y Europa entre la primera y segunda guerras mundiales. Con el advenimiento del refrigerador de compresor eléctrico fueron cayendo gradualmente en desuso. Existen todavía hoy unos pocos refrigeradores de ese tipo. En los Estados Unidos hay seis, pero solamente dos de ellos se encuentran en buen estado. Una empresa norteamericana va a reanudar la producción de un refrigerador de ese tipo.

Los refrigeradores de bola helada eran baratos y sencillos. Consistían en un generador-absorbedor conectado mediante un tubo a un condensador- evaporador. En el generador-absorbedor había una mezcla de agua y amoníaco. Se calentaba por algún medio y, al mismo tiempo, se sumergía el condensador- evaporador en agua fría. Una vez extraído el amoníaco del agua por ebullición, operación en la que se empleaban de una a dos horas, se invertía el ciclo. Se colocaba el condensador- evaporador en una nevera, se enfriaba el generador-

absorbedor con el aire y, durante las 24 a 36 horas siguientes, el amoníaco refluja desde el condensador- evaporador hasta el generador-absorbedor, produciendo frío en el refrigerador. No había más que un inconveniente: durante la extracción del amoníaco por ebullición, parte de los vapores del agua era arrastrada simultáneamente hasta el condensador- evaporador, mermando el rendimiento del proceso.

Chung y Duffie señalan que, modificando ligeramente la bola helada, podría ser posible alimentarla con energía solar, y, en efecto, los experimentos preliminares llevados a cabo han demostrado que esto puede hacerse.

En 1957, el grupo de Wisconsin (Duffie, Lof, Williams y Chung) dio cuenta de los experimentos que había realizado con un refrigerador doméstico de tipo bola helada. El generador se calentó, por espacio de unas dos horas, en el foco de un pequeño reflector parabólico, después de lo cual se transfirió a una "nevera", que permaneció fría por espacio de unas 24 horas. Parece ser que no se han proseguido los trabajos en torno a este proyecto.

Sería cosa fácil, recurriendo a uno de los refrigeradores de este tipo que aún quedan y estudiando los trabajos especializados existentes, iniciar la fabricación de un refrigerador doméstico, sencillo y barato, del tipo bola helada, alimentado con energía solar que pudiera utilizarse en hogares de países en desarrollo. La demanda de estos refrigeradores sería enorme. El generador tendría que concebirse de modo que pudiera calentarse también con combustible fósil cuando no luciera el sol. En el caso de la generación solar, debería emplearse un colector de placa plana con espejos que aumentarían ligeramente la concentración, o un colector de concentración cilíndrico con un generador de forma tabular en la línea focal.

Instalaciones de refrigeración colectivas

Una instalación solar de refrigeración colectiva podría ser, bien un edificio frigorífico, en el que los habitantes de una población almacenasen sus

alimentos en anaqueles, para lo cual se asignaría a cada familia un reducido volumen de espacio, bien una instalación que produjese hielo en bloques destinados a las neveras particulares. Una instalación adecuada para una población tendría que producir, por término medio, 500 kg de hielo por día. Una instalación de esa capacidad ha sido concebida por el autor. Emplea cloruro cálcico/amoníaco como combinación absorbente/refrigerante, aunque en principio pueden utilizarse muchas otras combinaciones.

Actualmente, se construye en Dinamarca un prototipo a escala reducida, que se enviará luego al Sudán a fin de probarlo en las condiciones propias de un clima tropical. Para tener en cuenta los períodos de nubosidad, el sistema ha sido diseñado de modo que produzca 720 kg de hielo en los días despejados. La duración del período de generación se fijó en 5 horas alrededor del mediodía, y la del período de absorción, que es también el período de congelación, en 12 horas durante la noche.

En la figura 1 puede apreciarse el aspecto de dicha instalación. Debajo del colector solar, hay un condensador de agua estancada y un generador de hielo. La figura 2 muestra el despiece del conjunto, formado por el colector y el absorbedor-generador, construido con tubos de acero y aletas de plancha también de acero. Salvo en la parte encristalada, el colector lleva un revestimiento selectivo negro.

El aislamiento de la parte posterior del colector se ha montado de suerte que pueda retirarse durante el período de absorción. Esta es una medida necesaria, ya que la superficie selectiva del colector y la parte encristalada impiden el enfriamiento adecuado por radiación durante la noche.

De no disponerse de medios para la circulación del agua (aparte de la convección natural), la mejor solución consiste en instalar un condensador de agua estancada (figura 3). En el curso de estudios simulados, se ha podido comprobar que, incluso con un depósito pequeño, puede alcanzarse una temperatura de condensación media de 40°C.

Las dimensiones principales de la instalación productora de hielo son las siguientes:

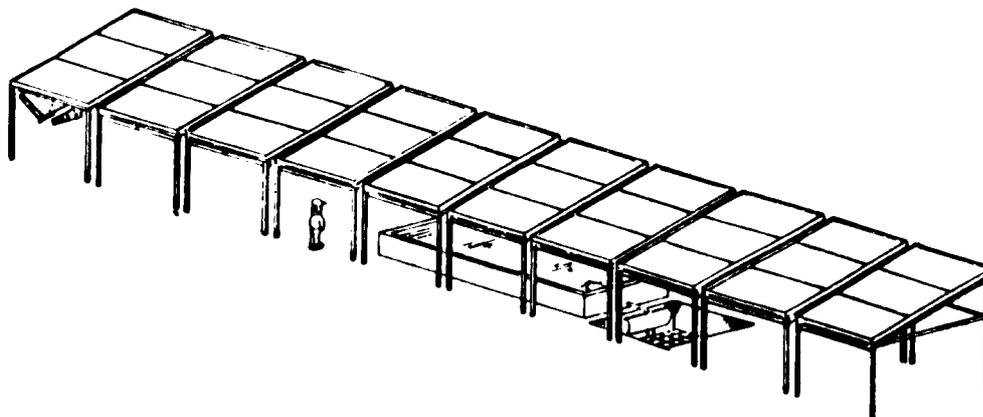


Figura 1. Aspecto general de una instalación productora de hielo alimentada con energía solar

Colector solar

Superficie total proyectada: 156 m² (10 secciones, 3 m x 5.19 m cada una)
 Diámetro de los tubos: 33.7 mm DF, 28.5 mm DI
 Número de tubos por sección: 60

Condensador

Depósito de agua: 6 m x 2.8 m x 0.8 m
 Superficie total de transferencia de calor: 18 m²
 Diámetro de los tubos: 21.4 mm DF, 16.1 mm DI
 Longitud total de los tubos: 270 m

Generador de hielo

Depósito de salmuera: 1.7 x 1.5 m x 0.85 m
 Superficie total de transferencia de calor: 16.5 m²
 Número de recipientes para hielo: 60
 Dimensiones del bloque de hielo:
 120 mm x 180 mm x 600 mm
 Peso del bloque de hielo: 12 kg

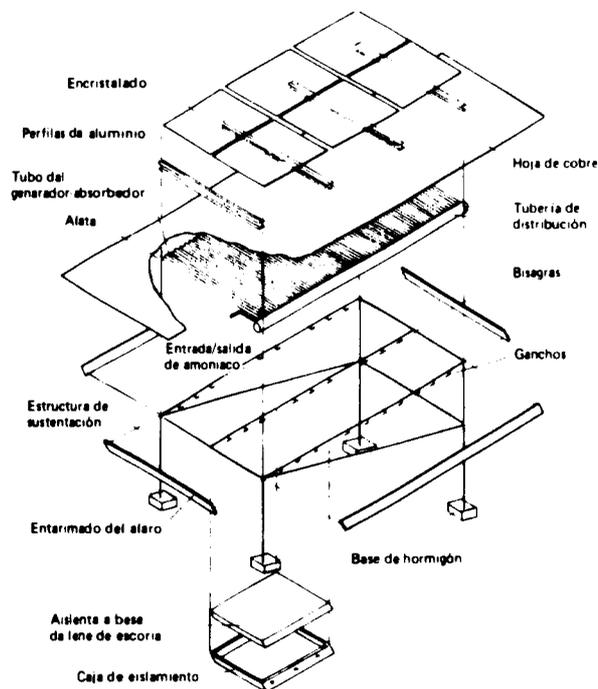


Figura 2. Despiece de una sección del conjunto formado por el colector, el generador y el absorbedor

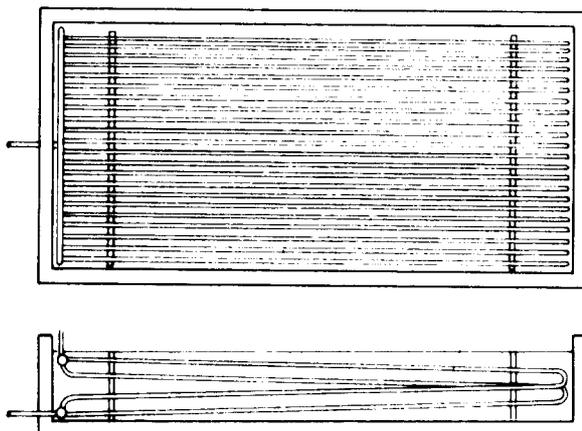


Figura 3. Condensador de agua estancada

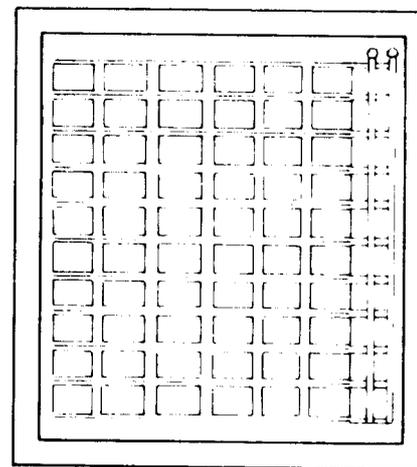
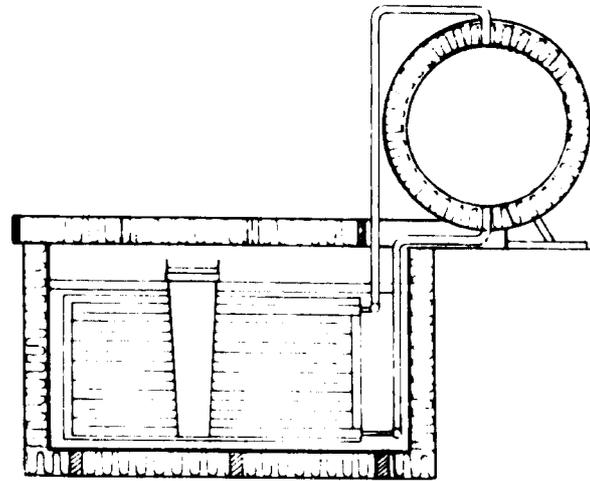


Figura 4. Generador de hielo

El generador de hielo (figura 4) funciona sin circulación forzada de la salmuera, lo que significa que la superficie del evaporador ha de ser bastante grande. La mejor solución parece ser un evaporador del tipo de chapas, con las chapas dispuestas entre las hileras de recipientes de hielo. El tamaño relativamente pequeño de los bloques que se ha elegido significa que la congelación puede completarse en 12 horas con una temperatura de evaporación de aproximadamente 11°C.

Las condiciones de funcionamiento típicas de la instalación son:

Directa	890 W/m ²
Difusa	150 W/m ²
Temperatura ambiente durante la generación	31°C
Rendimiento del colector solar	0.55-0.45
Temperatura de condensación	40°C
Temperatura de evaporación	-10°C
Temperatura de absorción final (absorbente líquido)	40°C
Duración del período de generación	5 h
Duración del período de absorción	12 h
Masa específica estimada del recipiente generador (masa del recipiente dividida por la masa del refrigerante generado)	10

De acuerdo con el proyecto preliminar, se hizo la siguiente estimación del costo de la instalación (costo en Dinamarca y en dólares):

Colector solar, generador y absorbedor	21 000
Condensador	500
Generador de hielo	2 500
Tuberías e instalación	2 000
Total	26 000

En un país en desarrollo, la instalación podría construirse, probablemente, por unos 16.000 dólares.

Sobre la base de una producción anual de unos 180.000 kg de hielo, una tasa de interés del 6% anual y una vida útil de la instalación de 12 años, podría producirse hielo al precio de 0,02 dólares por kilogramo. Este precio no parece exagerado, a juzgar por las cifras que se dan en las publicaciones especializadas.

En cuanto a las sustancias operantes para el sistema de absorción de la instalación, podrían considerarse diversas combinaciones de absorbentes/refrigerantes, tanto líquidos como sólidos, aunque es probable que las que mejores resultados den sean las siguientes:

- Bromuro de litio/agua ($\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$)
- Agua/amoniaco ($\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_3$)
- Tiocianato sódico/amoniaco (NaSCN/NH_3)
- Nitrato de litio/amoniaco ($\text{LiNO}_3/\text{NH}_3$)
- Cloruro cálcico/amoniaco ($\text{CaCl}_2/\text{NH}_3$)
- Cloruro de estroncio/amoniaco ($\text{SrCl}_2/\text{NH}_3$)

En todos los casos citados, menos en uno, el refrigerante empleado es el amoniaco, los cuatro primeros absorbentes son líquidos y los dos últimos sólidos. Pueden también emplearse otros refrigerantes, como el alcohol y la metilamina. Niebergall ha proporcionado abundantes datos sobre la mayoría de las combinaciones de absorbentes/refrigerantes que podrían considerarse.

Resultados de las investigaciones

Las observaciones que se hacen a continuación se basan en los trabajos realizados por el autor y por otros en Dinamarca.

El empleo de absorbentes líquidos es ventajoso, ya que permite regular a voluntad la concentración de refrigerante en el absorbente y adaptarla a las temperaturas más bajas de la refrigeración solar. Con los sistemas líquidos solares, sin embargo, es difícil obtener una circulación adecuada, especialmente durante el ciclo de regeneración, sin recurrir a las bombas; además, se corre el riesgo de que parte del absorbente líquido se evapore, junto con el refrigerante, durante el ciclo de generación. Esto puede remediarse, o bien eligiendo mejor la combinación del absorbente/refrigerante, o bien instalando una columna de fraccionar, que tiene el inconveniente de ser costosa. (El fraccionamiento es obligado cuando se emplea la combinación agua/amoniaco.)

Los sistemas de absorbente sólido presentan la ventaja de que no hay pérdida ninguna de absorbente por evaporación; ahora bien, debido a su densidad, se plantean algunas dificultades durante el ciclo de regeneración, y, además, ha resultado difícil conseguir que las capas de absorbente sólido del generador-absorbedor se mantengan porosas y no obstruyan los tubos.

Las temperaturas de generación requeridas para la refrigeración por absorción sólida se sitúan en el límite superior de rendimiento de los colectores de placa plana, a saber, 100° a 120°C , según la combinación de absorbente/refrigerante que se emplee. Sin embargo, es probable que los problemas técnicos que esto plantea puedan resolverse con la tecnología disponible (por ejemplo, mediante revestimientos superficiales selectivos y una ligera concentración con espejos de metal). Los verdaderos problemas son de orden económico, más bien que técnico.

Para el proceso de condensación, se requieren temperaturas de unos 40°C . Es posible que, en ciertas regiones tropicales, resulte difícil conseguir una temperatura tan baja. Se ha sugerido el empleo de un condensador de agua estancada, en el que la temperatura del agua condensante se mantiene baja mediante enfriamiento por evaporación.

Los experimentos llevados a cabo han demostrado que, con una mezcla de 85% de cloruro cálcico y 15% de cemento Portland, puede obtenerse un absorbente granulado de bastante fuerza mecánica y porosidad para que, al llenarse el absorbedor-generador, pueda obtenerse sin dificultad una distribución homogénea. Con esa mezcla granulada, no se observó merma alguna en la capacidad de absorción al cabo de 200 ciclos de generación-absorción. Con la adición de cemento, se obtiene el mismo rendimiento que cuando se emplea cloruro cálcico puro. Se produjo una mezcla granulada similar de cloruro de estroncio, pero no resultó más ventajosa que el cloruro cálcico.

En Copenhague, se han llevado a cabo experimentos simulados con una instalación destinada a Jartum (Sudán). Se alcanzó un rendimiento máximo cuando el grado de generación se mantuvo en alrededor de 70% del máximo que podía obtenerse en días de cielo despejado. En esas condiciones, la temperatura máxima del colector fue de 110° - 115°C . De esos experimentos se desprende que el diámetro óptimo del tubo del generador es de unos 40 mm, con una distancia entre tubos de alrededor de 100 mm.

El calor irradiado al contorno durante la noche no basta para asegurar la reabsorción total del amoniaco. Es posible que un enfriamiento suplementario por ejemplo, previendo una ligera separación entre el colector y el aislamiento de la parte posterior—resulte insuficiente, dando lugar a una mayor pérdida de calor durante el ciclo de generación. La mejor solución parece consistir en un

aislamiento posterior articulado mediante bisagras, que pueda abrirse por la noche.

En la Universidad Técnica de Copenhague se está construyendo una instalación piloto para la producción de agua potable refrigerada. Tiene un colector de 4 m² de superficie y un rendimiento calculado de unos 7.500 kJ cada 24 horas. Es posible que esta instalación se someta a pruebas, más adelante, en el Instituto de Energía Solar e Investigaciones Afines sobre el Medio Ambiente, de la Universidad de Jartum. Tanto los trabajos experimentales como los cálculos revisados del proyecto de esta instalación confirman que puede utilizarse una instalación solar de absorción intermitente de cloruro cálcico/amoniaco para producir hielo. La producción diaria por unidad de superficie del colector podría ser de 4 kg/m².

El proyecto de una instalación de refrigeración por absorción intermitente puede ser muy sencillo, no requiriéndose tecnología avanzada para su realización.

El cloruro cálcico/amoniaco parece ser la combinación óptima absorbente/refrigerante a todos los efectos.

Cadenas de refrigeración

En muchos países en desarrollo se necesitan "cadenas de refrigeración" para la conservación de productos perecederos durante su transporte y distribución. En México, por ejemplo, se necesitan esas cadenas para la fruta, ya que las actuales instalaciones frigoríficas apenas alcanzan para conservar el 10% de la producción.

Desde 1971, el Centro de Investigación de los Materiales, de la Universidad de México, se ha venido ocupando en el establecimiento de una cadena de refrigeración para la distribución de alimentos perecederos. De los estudios realizados hasta la fecha, ha concluido que debe hacerse un esfuerzo por instalar en las zonas rurales de México:

a) Frigoríficos regionales de grandes dimensiones (de 5.000 a 10.000 toneladas), en que los productos puedan elaborarse y almacenarse antes de ser despachados a los centros urbanos o exportados; y

b) Frigoríficos de pequeñas dimensiones (de 20 a 200 m³) para múltiples fines, destinados a las poblaciones rurales.

El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología ha aprobado la instalación de frigoríficos de pequeñas dimensiones.

Los refrigeradores solares de absorbente sólido pueden resultar útiles para las cadenas de refrigeración de México y otros países en desarrollo.

BIBLIOGRAFIA

- A case for a solar ice maker. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 7:1-1-2, 1963.
- Ba Hli y colaboradores. *Possibilities for solar ice-makers*. Proceedings of the International Solar Energy Society Conference, Melbourne, 1970 (6/59).
- Chinappa, J. C. V. Experimental study of the intermittent vapour absorption refrigeration cycle employing the refrigerant-absorbent systems of water ammonia lithium nitrate. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 5:1-1-18, 1961.
- . Performance of an intermittent refrigerator operated by a flat-plate collector. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 6:4-143-150, 1962.
- Chung, R. y Duffie, J. A. Cooling with solar energy. Documentos de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre nuevas fuentes de energía. Roma, 21-31 agosto 1961 (*Solar Energy*: III, vol. 6, pág. 20 (S/82). Número de venta: 63.I.40).
- Eggers-Lura, A. y colaboradores. Potential use of solar-powered refrigeration by an intermittent solid absorption system. *Proceedings of the International Conference on Heliotechnique and Development*, Dhahran, 1975 (vol. 2, págs. 83-104).
- Khalil, K. H. y colaboradores. Factors affecting the use of solar energy for cooling. *Proceedings of the International Conference on Heliotechnique and Development*, Dhahran, 1975 (vol. 2, págs. 125-132).
- Niebergall, W. Arbeitsstoffpaare für Absorptionskälteanlagen und Absorptionkühlschränke. Mühlhausen, República Federal de Alemania, Verlag für Fachliteratur, 1954.
En alemán.
- Stubkier, H. B. y Bechtolt Nielson B. Plantas de refrigeración solar. Tesis para el título de M. Sc. Technical University of Denmark, Refrigeration Laboratory, Copenhagen, 1974.
En danés.
- Swartman, R. K. y colaboradores. *Survey of solar-powered refrigeration*. American Society of Mechanical Engineers. Quarterly transactions (Nueva York) 73-WA/Sol-6, 1973.
- . *Survey of absorption refrigeration systems*. Proceedings of the International Conference on Heliotechnique and Development, Dhahran, 1975 (vol. 2, págs. 71-82).
- Trombe, F. y Foëx, M. Economic balance sheet of ice manufacture with an absorption machine, utilizing the sun as the heat source. Documentos de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre nuevas fuentes de energía, Roma 21-31 de agosto de 1961 (*Solar Energy*: III, vol. 6, pág. 56 (S/109)). Número de venta: 63.I.40.

Destilación solar: La evolución de la técnica

B. W. Tleimat

Sea Water Conversion Laboratory, Richmond, California (Estados Unidos de América)

Antecedentes

La moderna aplicación de la energía solar para la destilación de aguas salinas se inició en 1872 con la instalación, en el norte de Chile, de un alambique solar tipo alberca, de grandes dimensiones, que durante muchos años abasteció de agua a una población minera. El primitivo alambique¹ consistía en una serie de vanos paralelos, de 1,14 m de ancho por 61 m de largo, con una superficie total de 4.700 m². La alberca era de madera ennegrecida con tinte de campeche y alumbre para absorber la luz del sol. Habiéndose introducido otros medios de potabilizar el agua, parece ser que lo único que quedaba de ese alambique en 1965 eran algunos restos de sus cimientos y muchos trozos de vidrio.

En la figura 1 puede apreciarse un diagrama simplificado de un alambique solar. Consiste en un recipiente de agua salada, de fondo negro para absorber la luz del sol, cubierto con hojas de vidrio transparentes que forman un recinto hermético. Las cubiertas transparentes se inclinan sobre una cuba colectora. Cuando el alambique está en funcionamiento, la energía solar pasa a través de las cubiertas transparentes y es absorbida por el agua y el

revestimiento interior del recipiente. La energía absorbida calienta el agua salada y hace que se evapore parte de ella y que aumente la humedad ambiental junto a la superficie de la misma, produciéndose así corrientes de convección dentro del recinto del alambique. El aire húmedo, más caliente, asciende hasta el vidrio, más frío, en cuya superficie parte del vapor de agua se condensa, se desliza hacia abajo y cae goteando en la cuba colectora, saliendo por los extremos de esta en forma de agua dulce. Para impedir la precipitación de las sales en el recipiente, puede añadirse agua salada de manera continua o discontinua. La cantidad de agua salada vertida en el recipiente ha de ser, como mínimo, el doble de la agua dulce obtenida.

El interés por la destilación solar se reavivó durante la segunda guerra mundial con el desarrollo de alambiques de plástico destinados a las balsas salvavidas. Esos alambiques se componían de un recipiente inflable y transparente de plástico, con una almohadilla de fieltro en el fondo y una botella recogedora del destilado acoplada al recipiente de plástico. Para utilizarlos, se inflaba el recipiente, se dejaba saturar la almohadilla de fieltro con agua de mar y se arrastraba el conjunto, flotando, junto a la balsa. La energía solar, al pasar a través del plástico transparente y ser absorbida por la almohadilla de fieltro, produce vapor de agua, que luego se condensa

¹ Josiah Harding: "Apparatus for solar distillation", *Proceedings of Institution of Civil Engineers*, núm. 73 (1883), págs. 284-288.

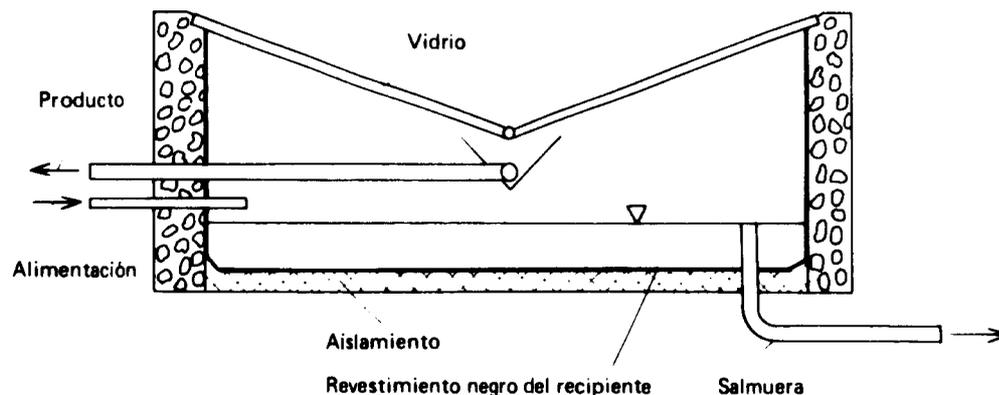


Figura 1. Esquema, en corte transversal simplificado, de un alambique solar

en el interior del plástico y es recogido en la botella acoplada al fondo del conjunto.

Con las prolongadas sequías registradas en muchas partes del mundo en los decenios siguientes a la segunda guerra mundial, el problema del abastecimiento de agua volvió a adquirir actualidad. El recurso a la desalación para obtener agua potable pareció que aportaría una solución parcial al problema de las sequías. En todo el mundo, se emprendieron programas para desarrollar métodos de desalación del agua. La destilación solar fue uno de los muchos métodos estudiados. Sin embargo, se consideraba que los métodos que empleaban energía eléctrica o combustibles fósiles encontrarían aplicación comercial antes que la destilación solar, que recibió una parte relativamente pequeña del apoyo financiero disponible.

El Laboratorio de Destilación de Agua de Mar de la Universidad de California, empezó a investigar los métodos de desalación en 1951. Durante las primeras fases de sus investigaciones, el Laboratorio concluyó que debían estudiarse atentamente los procesos que utilizaban fuentes de energía distintas de los combustibles. Esa conclusión se basaba en el cálculo de la energía requerida para desalar el agua de mar por los métodos de desalación de que se disponía entonces. Por ejemplo, si se destilara agua de mar para satisfacer todas las necesidades de una ciudad de las proporciones de Los Angeles, la energía que necesitaría el destilador de efecto múltiple utilizado a la sazón sería superior a la de todo el petróleo en el sur de California. A base de esa conclusión, la Universidad construyó una central de destilación solar en Richmond (California) y prosiguió las investigaciones a un ritmo acelerado durante los 10 años siguientes. Se construyeron y probaron diversas configuraciones de alambiques solares sencillos con el objeto de reducir los costos de construcción y mejorar el rendimiento. El Gobierno de los Estados Unidos, a través de su Oficina de Agua Salada, instituyó también un programa de destilación solar más o menos al mismo tiempo y financió la construcción y prueba de diversos tipos de alambiques solares en su centro de pruebas de Daytona Beach (Florida).

Los investigadores de la Universidad de California y de otros centros llegaron por último a la conclusión de que el alambique solar de tipo alberca, en cualquiera de las configuraciones consideradas no podía competir económicamente con las grandes instalaciones que empleaban otros procesos de desalación para obtener grandes cantidades de agua. A partir de 1961 la Universidad de California ha orientado sus trabajos sobre destilación solar hacia el desarrollo y perfeccionamiento de instalaciones pequeñas destinadas a abastecer de agua potable a pequeños núcleos de población. Howe y Tleimat² han

²E. D. Howe y B. W. Tleimat: "Twenty years of work on solar distillation at the University of California", *Solar Energy*, núm. 16 (1974), págs. 97-105.

publicado un resumen de los trabajos realizados en la Universidad de California.

Aunque los trabajos sobre desarrollo y construcción de alambiques de gran capacidad se suspendieron en la mayoría de los países del mundo, en Australia se han seguido desarrollando alambiques solares, de mediana capacidad, bajo los auspicios de la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO). Por encargo de la Oficina de Agua Salada, Talbert y sus colaboradores³ han hecho la reseña más actualizada de los trabajos sobre destilación solar.

El costo del agua producida por las instalaciones de desalación es la suma del costo de la energía, el capital y la mano de obra. Como la energía solar es gratuita, el costo del agua producida por los alambiques solares sencillos de tipo alberca es función del costo inicial del alambique. Los esfuerzos por reducir el costo del agua han tendido, principalmente, a lograr una reducción del costo inicial de capital, pero sin que ello repercuta demasiado en el rendimiento. Las más de las veces, esos esfuerzos han entrañado la prueba de diferentes configuraciones geométricas. En la figura 2 se muestran algunas de las ensayadas en la Universidad de California. Sin embargo, el diseño más prometedor, desde el punto de vista del costo inicial y del rendimiento relativo, fue el de la figura 1. Ha sido instalado en diversos emplazamientos⁴ del Pacífico sur. La alberca, recubierta de vidrio, tiene una superficie de 5 m². Este diseño se utilizó también en forma modular, con módulos adicionales de 2.4 m² cada uno, con lo que se lograba una mayor flexibilidad en cuanto a dimensiones y rendimiento.

En la figura 3 se muestran las secciones transversales de algunos de los alambiques solares de grandes dimensiones contruidos en el mundo entero. La sección A tiene lados de hormigón, en los que se han practicado ranuras para sostener la cubierta de vidrio y la cuba colectora. Sobre el fondo aislado de la alberca, se ha colocado un revestimiento de color negro, que va plegado en el interior de la cuba colectora y herméticamente adherido a los bordes del vidrio. Para el caballete, formado por las dos hojas de vidrio, utilizase un obturador de caucho silicónico, que, una vez seco, actúa como charnela de las dos hojas de vidrio. Este diseño ha dado buenos resultados y se ha utilizado en diversas instalaciones australianas.

La sección B de la figura 3 se asemeja a la de una instalación de grandes dimensiones contruida en la isla griega de Patmos. Tiene cubierta de vidrio y está provista de cubas colectoras de aluminio y soportes

³S. G. Talbert, J. A. Eibling y G. O. G. Löf: *Manual on Solar Distillation of Saline Water*. Research and Development Report No. 546 (Washington, United States Department of the Interior, Office of Saline Water, 1970).

⁴E. D. Howe y B. W. Tleimat: "Solar distillers for use on coral islands", *Desalination*, núm. 2 (1967), págs. 10-115.

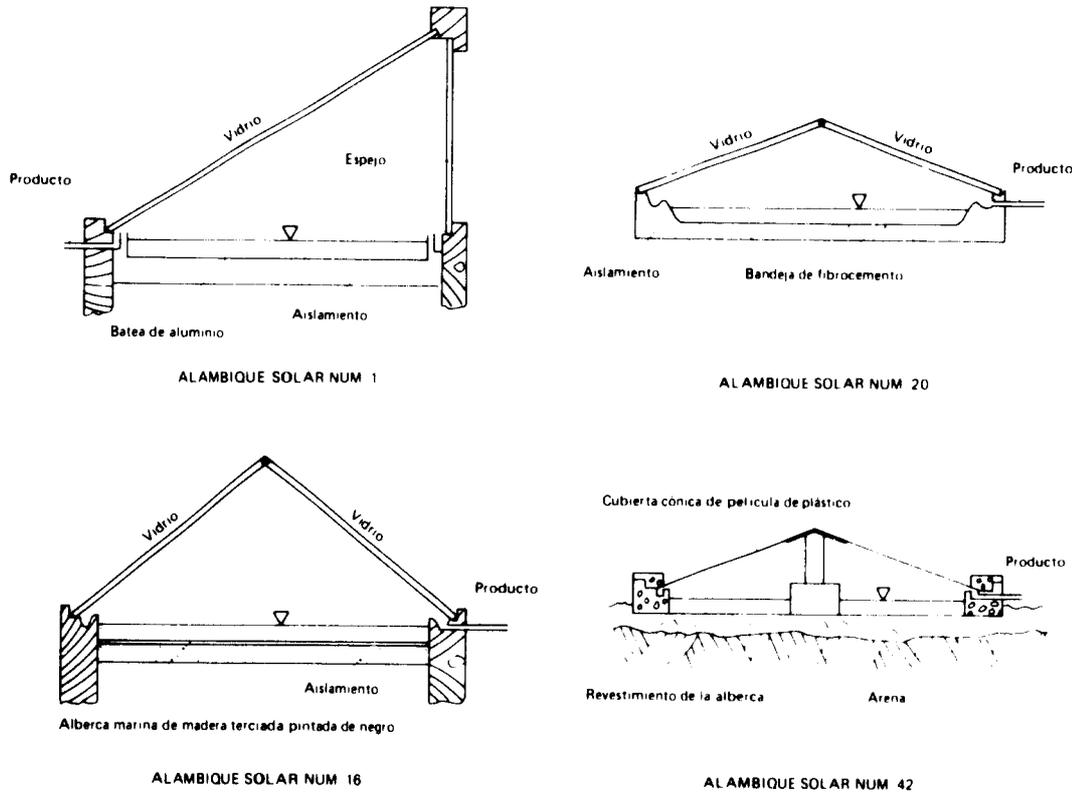


Figura 2. Corte transversal de algunos alambiques solares de la Universidad de California, Richmond

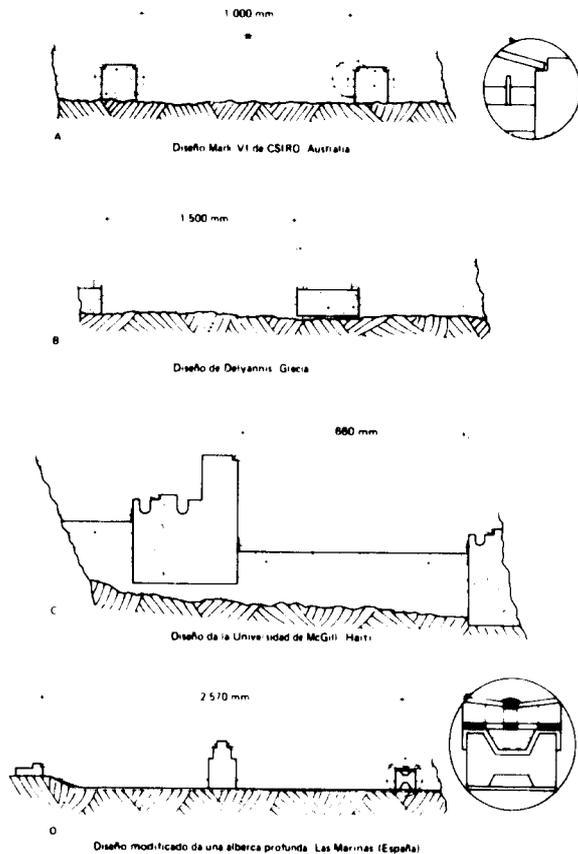


Figura 3. Esquemas, en cortes transversales simplificados, de alambiques de grandes dimensiones instalados en diversos lugares

para las hojas de vidrio. La sección transversal C es similar a la utilizada por el Brace Research Institute, de la Universidad McGill, en la instalación de La Gonave (Haití).

La sección D es similar al alambique empleado en Las Marinas (España). Corresponde a un alambique concebido según el concepto de alberca profunda probado en Daytona Beach (Florida). El concepto de alberca profunda se basa en el argumento de que, con este tipo de construcción, no se requiere un nivelado preciso del terreno y no aparecen puntos secos en el momento de la evaporación. Además, dada la importante masa de líquido contenida por la alberca, la evaporación se prolonga hasta las horas de la noche por efecto del calor almacenado en el agua salina. Sin embargo, tras numerosos experimentos y comparaciones con alambiques de alberca poco profunda, se llegó a la conclusión de que, para obtener un mejor rendimiento, era preciso que la profundidad del agua fuese mínima.

Entre los dos tipos de alambiques solares que se han probado en diferentes centros, figuran el alambique de cubeta inclinada y los de tipo mecha, ilustrados esquemáticamente en la figura 4. El alambique solar de cubeta inclinada es una unidad en la que la alberca está dividida en estrechas bandas paralelas, cada una de ellas a diferente altura. Con esta disposición, se consigue acercar más la superficie del agua a la superficie del vidrio. Este tipo de construcción ha permitido obtener mayores rendimientos que con el tipo sencillo de alberca; sin

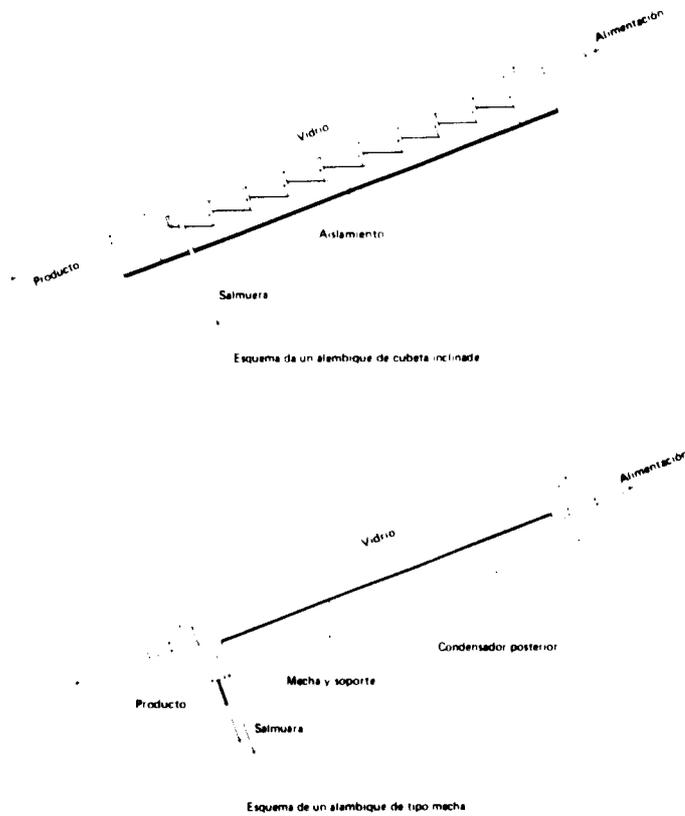


Figura 4. Alambiques solares de cubeta inclinada y de mecha

embargo, el aumento del rendimiento no compensa el mayor costo de construcción. El alambique tipo mecha, con cubierta de vidrio, consiste en un tejido trenzado dispuesto sobre una superficie inclinada. El agua salina, vertida a lo largo del borde superior de la superficie inclinada, fluye hacia abajo a través del material absorbente, que se mantiene así humedecido. Dada la reducida capacidad térmica de ese tipo de alambique, su rendimiento puede ser muy alto; sin embargo, por lo difícil que resulta mantener la mecha húmeda y limpia y por el costo de construcción, estos alambiques no pueden utilizarse en gran escala.

Los trabajos más recientes, en el campo de la destilación solar, se realizan en Tecamachalco (México) bajo los auspicios de la Comisión para el Aprovechamiento de Aguas Salinas. Se trata de tres instalaciones con un rendimiento normal de 1 a 1.5 m³/d. Constan de alambiques individuales colocados en el suelo y unidos entre sí mediante tuberías de cloruro de polivinilo. Los alambiques son similares a los de bandeja de fibrocemento construidos por Gomella, componiéndose de una bandeja de fibra de vidrio, de 0,93 m x 1,063 m, con el fondo pintado de negro, y de una cubierta de vidrio con una inclinación de 30° con respecto a la horizontal. El costo medio por alambique, en México, parece ser de unos 25 dólares y el del agua producida, por unidad, de 3 a 4 dólares por metro cúbico, incluidos los costos de capital, mano de obra y mantenimiento.

Rendimiento de los alambiques solares

El rendimiento de los alambiques solares se expresa normalmente por la cantidad de agua producida por unidad de superficie por día. Esa cantidad varía según la configuración del alambique, la insolación y las condiciones ambientales. Una vez que un alambique solar está construido e instalado tiene una configuración geométrica permanente, por lo cual su rendimiento será función, exclusivamente, de la insolación y de las condiciones ambientales. En la figura 5 se muestra el rendimiento de los alambiques de las figuras 1 y 2 en función de la insolación recibida por una superficie horizontal. Fueron construidos y probados en la Universidad de California. El alambique solar núm. 1 es el primero que se construyó. Fue mantenido en buen estado de funcionamiento y utilizado como modelo a fines de comparación con otros alambiques. Exceptuado el alambique núm. 41, del tipo cubeta inclinada, todos los demás eran del tipo alberca. Aunque la figura 5 muestra sólo el rendimiento de alambiques solares construidos y probados en la Universidad de California, otros alambiques, construidos en otros lugares, presentan características análogas, obteniéndose rendimientos algo inferiores a los del tipo cubeta inclinada.

Parecen tener un rendimiento más elevado los alambiques que reúnen las siguientes características:

- Baja capacidad calorífica;
- Bajo contenido de agua;
- Bajo contenido de aire;

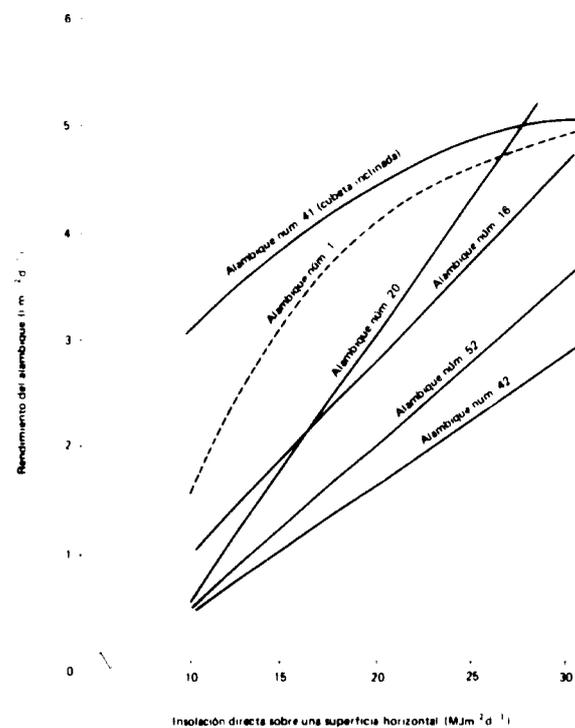


Figura 5. Rendimiento de algunos de los alambiques solares probados en la Universidad de California, Richmond

Cubierta hermética a los vapores;
Alberca que no permita filtración de agua;
Buen aislamiento alrededor de la alberca.

Los trabajos realizados hasta la fecha en diversos laboratorios han proporcionado también información útil sobre materiales de construcción. La cubierta transparente puede ser de vidrio o de plástico. Abstracción hecha de su vulnerabilidad al daño mecánico, el vidrio posee todas las propiedades deseadas, como una alta transmisividad de la radiación solar, una baja transmisividad de la radiación de baja temperatura, humectabilidad con el agua, facilidad de obtención y alta estabilidad de sus propiedades durante prolongados períodos de exposición. Las cubiertas de película de plástico transparente utilizadas en los alambiques solares han mostrado una transmisividad relativamente alta de la radiación solar y de la de baja temperatura, pero también una degradación debida a los rayos ultravioleta. Es preciso tratarlas mecánicamente para hacerlas humectables con agua, y, por lo general, se fabrican sólo en países muy desarrollados. Por otra parte, aunque las películas de plástico son menos vulnerables al daño mecánico, son sensibles a los efectos del viento y no han sido perfeccionadas suficientemente aún como para que resistan largo tiempo en las condiciones inherentes a la destilación solar.

La figura 6 muestra el rendimiento de los alambiques solares núms. 38-1 y 38-2. Esos dos alambiques eran del tipo de cubeta inclinada y, a excepción de las cubiertas transparentes, de idéntica construcción. El alambique núm. 38-1 tenía una

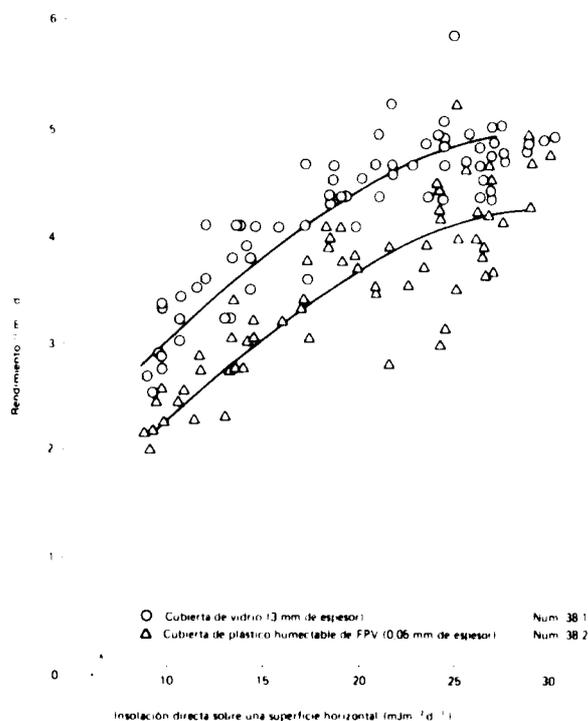


Figura 6. Comparación del rendimiento de los alambiques solares núms. 38-1 y 38-2 de la Universidad de California

cubierta de vidrio de doble espesor (3 mm); y el alambique núm. 38-2, una de película de fluoruro de polivinilo, mecánicamente tratada, de 0.05 mm de espesor. Ambos alambiques se instalaron uno al lado del otro y se probaron en idénticas condiciones durante dos años. En la figura 6 se ve claramente que el rendimiento medio del alambique con cubierta de plástico fue aproximadamente un 20% inferior al del alambique con cubierta de vidrio.

Como la hermeticidad a los vapores influye mucho en el rendimiento de los alambiques solares, la obturación de la cubierta transparente de éstos para impedir posibles fugas de vapor reviste suma importancia. El compuesto obturador más eficaz y duradero empleado en la Universidad de California fue el caucho silicónico. Otros obturadores, como la masilla ordinaria, el alquitran y la cinta adhesiva de plástico, se deterioraron con el tiempo, formándose en ellos grietas por las que se escapaban el condensado y el vapor de agua.

Los materiales empleados para el revestimiento de la alberca han de ser impermeables y capaces de absorber la radiación solar. Además, ante la posibilidad de que el alambique se quede sin agua, es preciso que esos revestimientos puedan resistir temperaturas relativamente elevadas sin deteriorarse. El material más idóneo encontrado hasta la fecha es la goma butílica. También se han ensayado otros materiales, como las esteras de asfalto, utilizadas para el revestimiento de depósitos de almacenamiento y para el techado de edificios, y el polietileno. Aunque las esteras de asfalto dieron buenos resultados en los alambiques de alberca profunda, son demasiado rígidas para los de alberca poco profunda, con vanos largos y estrechos, mientras que el polietileno se deteriora con bastante rapidez cuando se expone a los rayos ultravioleta.

La cuba colectora del condensado y las tuberías han de ser de materiales que resistan al agua destilada. Con este objeto puede utilizarse un material plástico. El acero, según pudo observarse, se oxida muy pronto; al paso que las hojas de acero galvanizado dieron buenos resultados, pero mostraron señales de oxidación en los puntos en que se habían efectuado uniones y curvaturas. El aluminio con protección galvánica puede utilizarse con buenos resultados. Las cubas colectoras que dieron mejores resultados y que presentaron menos corrosión o ninguna fueron las de acero inoxidable.

El empleo de alambiques solares sencillos se ha limitado a la obtención de cantidades relativamente pequeñas de agua, debido a la gran superficie que se necesita, lo cual entraña unos costos de inversión y mantenimiento tan elevados que esos alambiques no pueden competir con otros métodos de desalinización.

En los alambiques solares, la energía solar se aplica una sola vez durante el proceso, a diferencia de la destilación de efecto múltiple, en la que se aplica

varias veces. Diversos investigadores⁵ se han esforzado por encontrar otros medios que permitan utilizar la energía solar de manera más eficaz. La figura 7 es una representación esquemática de un alambique de efecto múltiple estudiado por uno de ellos (Dunkle). Consta de una serie de placas verticales dispuestas en el interior de una caja; la primera placa se calienta con agua calentada por los rayos solares, y la última se enfría con agua salina que circula por tuberías interiores unidas a ambas placas. El agua salina, calentada con el vapor de condensación en el lado izquierdo de la última placa, se hace entrar en una cuba abierta, y se deja caer luego, en forma de una película fina, por el lado derecho de las tres primeras placas. El vapor producido en el lado derecho de la primera placa se condensa en el lado izquierdo de la segunda, y así sucesivamente, hasta la última placa. En esta disposición, el calor solar transmitido a la primera placa por medio del agua se transmite a la segunda placa, y luego a la tercera y cuarta placas para precalentar el agua salina entrante. Los condensadores que se forman en los lados izquierdos de la segunda, tercera, y cuarta placas se recogen y utilizan como agua dulce. El número de placas (efectos) de este tipo de alambique dependerá de la diferencia de temperatura entre el agua calentada con energía solar y el agua salina fría entrante. Huelga decir que estos alambiques utilizan la energía solar en forma indirecta. Si el lado izquierdo de la caja fuese de material transparente, y si se pintase de negro la primera placa y se eliminasen las tuberías, el alambique utilizaría entonces la energía solar de manera directa. Esta disposición ofrece la ventaja de

que permite explotar el alambique cuando no luce el sol, siempre que se disponga de agua calentada con energía solar. Desgraciadamente, el mayor rendimiento de estos alambiques no compensa los mayores costos de construcción. El costo del agua obtenida con un alambique sencillo de tipo alberca es inferior al de la obtenida con un alambique de efecto múltiple, y esto parece explicar el poco interés que despierta este tipo de construcción.

Se han propuesto y ensayado⁶ numerosos métodos de utilización de la energía solar para obtener vapor con que explotar sistemas de destilación tradicionales de efecto múltiple y de múltiples etapas. En esos métodos se utilizaron colectores solares para captar energía solar con que producir vapor. El vapor así obtenido, se emplea luego para calentar el primer efecto (o placa) de un alambique de efecto múltiple, o para calentar la salmuera en un alambique de varias etapas, de vaporización rápida. De todos esos métodos, solamente se puso en práctica y se ensayó el de Baum. Este empleó un colector paraboloide de concentración para generar vapor a alta temperatura destinado a un alambique de tres efectos. Desgraciadamente, a causa del bajo coeficiente de termotransferencia del alambique, sólo podían utilizarse tres efectos, por lo que el costo del vapor suministrado por la caldera solar resultaba demasiado alto para que el alambique pudiera explotarse de manera económica.

El rendimiento de los alambiques de efecto múltiple se define como la cantidad de agua obtenida por unidad de calor liberado por el vapor de condensación en el primer efecto, y se denomina relación de rendimiento ganado (RRG). La RRG aumenta con el número de efectos y con la temperatura del vapor. Siendo constantes la temperatura del vapor y la del agua de refrigeración, la RRG es función únicamente del número de efectos; por consiguiente, aumentando el número de éstos se disminuye la cantidad de vapor necesaria para obtener una cantidad unitaria de agua, lo que se traduce en un colector más pequeño. Sin embargo, el aumento del número de efectos entraña un aumento del costo de los evaporadores en el alambique de efecto múltiple. Es preciso ver si los beneficios resultantes de la disminución del tamaño del colector solar compensan el mayor costo de los evaporadores.

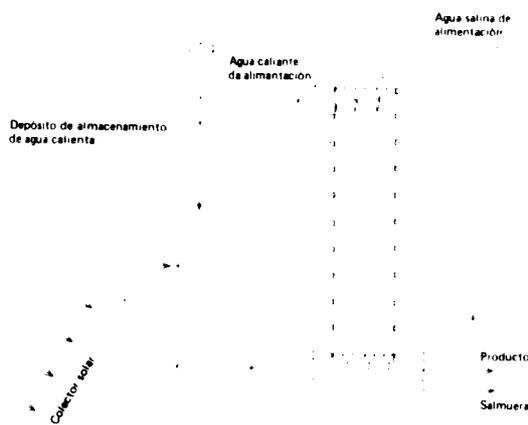


Figura 7. Alambique solar de efecto múltiple

⁵R. V. Dunkle: "Solar water distillation: the roof type still and a multiple effect diffusion still", *American Society of Mechanical Engineers, Quarterly Transactions*, 1961, págs. 895-902; M. K. Selcuk: "Design and performance evaluation of a multiple-effect tilted solar distillation unit", *Solar Energy*, núm. 8 (1964), págs. 23-30; Maria Telkes: *Research on Methods for Solar Distillation*, Research and Development Report No. 13 (Washington, United States Department of the Interior, Office of Saline Water, 1956).

⁶V. A. Baum: "Solar distillers", monografía preparada para la Conferencia de las Naciones Unidas sobre nuevas fuentes de energía, Roma, 1961 (35 S/119); D. B. Bruce: "Saline water conversion by flash evaporation utilizing solar energy", *Advance in Chemistry Series*, núm. 38 (1963), págs. 99-116; J. A. Libling, R. F. Thomas y B. A. Landry: *An Investigation of Multiple-Effect Evaporation of Saline Waters by Steam from Solar Radiation*, Research and Development Report No. 2 (Washington, United States Department of the Interior, Office of Saline Water, 1953); H. Weihe: "Fresh water from sea water, distilling by solar energy", *Solar Energy*, núm. 13 (1972), págs. 439-444; B. W. Fleimat y E. D. Howe: "Solar-assisted distillation of sea water", *Actas de la Conferencia Internacional sobre Heliotécnica y Desarrollo*, Dhahran, 2-6 de noviembre de 1975.

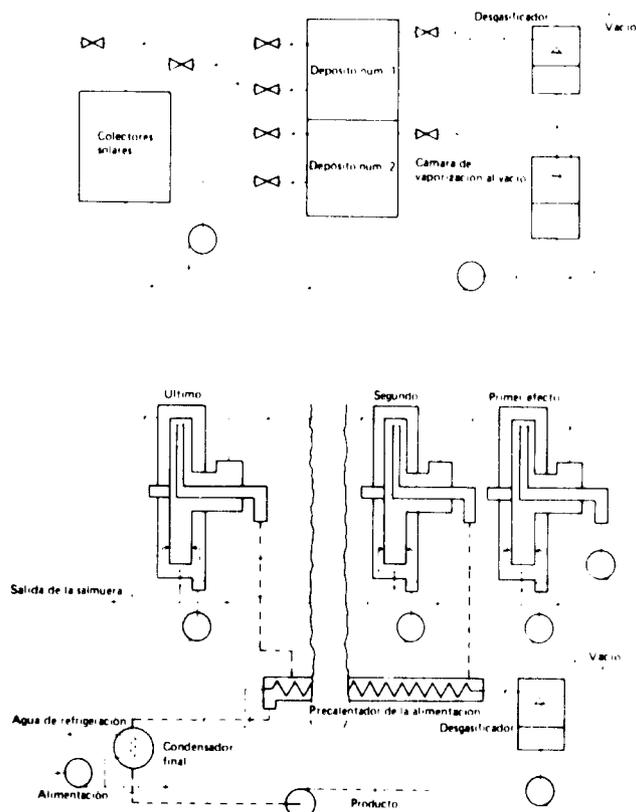


Figura 8. Alambique de efecto múltiple con caldera solar

A título ilustrativo, la figura 8 muestra un diagrama esquemático de funcionamiento basado en un proyecto propuesto por Tleimat y Howe⁷. Este proyecto emplea colectores solares de placa plana en la sección generadora de vapor (caldera solar) y evaporadores de disco rotatorio en la sección de

⁷Op. cit., pág. 439.

efecto múltiple. Una vez en funcionamiento, se saca agua calentada con energía solar de los depósitos de almacenamiento y se vierte en el desgasificador para eliminar los gases no condensables. Del desgasificador, el agua se introduce en la cámara de vacío, donde una pequeña parte se transforma en vapor por ebullición. El resto del agua se vuelve a calentar en el colector solar durante las horas de sol, almacenándose en el segundo depósito, o enviándose directamente al segundo depósito de almacenamiento durante la noche, y el condensado del primer efecto se introduce nuevamente en la caldera solar.

El rasgo particular de este método es el empleo del evaporador de película y disco rotatorio de Tleimat, evaporador de gran rendimiento concebido en el Sea Water Conversion Laboratory, Universidad de California (Berkeley). En condiciones experimentales, se han obtenido coeficientes totales de transferencia de calor de 2 a 5 W cm⁻² °C⁻¹. Esos valores son casi 10 veces más altos que los obtenidos con los alambiques de varias etapas de vaporización rápida actualmente empleados para la desalación de agua de mar. Gracias a esos altos coeficientes de transferencia de calor, puede utilizarse un gran número de efectos, lo que significa el empleo de pequeños sistemas colectores. Basándose en los datos relativos al evaporador Tleimat, éste y Howe pudieron demostrar que, con vapor procedente de la caldera solar a una temperatura de 60°C y agua de mar para refrigeración a una temperatura de 20°C, se puede lograr un alambique de 15 efectos, con una RRG de 12.8. Además, como el vapor de la caldera solar ha de tener una temperatura de 60°C, los colectores funcionan a temperaturas relativamente bajas y, por consiguiente, su rendimiento es mayor. El método considerado podría utilizarse para aumentar el rendimiento de los alambiques solares muy por encima del de los alambiques solares de tipo alberca.

Técnicas solares de destilación de agua

Carlo Mustacchi y Vincenzo Cena

Roma (Italia)

La destilación de agua por medio de la energía solar es la tecnología solar que data de más antiguo. Hace ya cosa de veinte siglos que se construyen instalaciones para este fin. Sin embargo, si se exceptúan algunos lugares de condiciones especiales, tales como islas, y algunas necesidades excepcionales, tales como equipo de emergencia para la navegación, no se había despertado el interés por estas técnicas hasta que se sintió la necesidad de ellas, hará cosa de unos 20 años, como resultado del crecimiento demográfico en regiones áridas y de la elevación general del nivel de vida.

La destilación solar del agua admite dos enfoques muy diversos: uno integrado, de tecnología sencilla, por el que una instalación de un solo elemento sirve para captar la energía solar y utilizarla para evaporar el agua con un rendimiento bajo y un costo de inversión también bajo; y uno de tecnología más compleja y más costosa, por el que ambos procesos se llevan a cabo separadamente mediante sendos sistemas especializados y diseñados para optimizar los rendimientos.

Alambiques solares

Para construir un alambique solar del tipo más elemental basta con una lámina flexible de plástico (polietileno) de alrededor de un metro cuadrado, una pequeña batea, una piedra y un azadón. El azadón se utiliza para excavar un agujero cónico redondo en el suelo. Se cubre este agujero con la lámina de plástico, que se sujeta apilando tierra sobre sus rebordes. Se coloca la batea en el centro del agujero para atrapar con ella el agua que gotea de la lámina de plástico, cargada en su centro con la piedra. No hace falta alimentar el sistema descrito con agua; el fenómeno de la capilaridad y los gradientes de temperatura y humedad del suelo bastan para alimentar el sistema. Si se adoptan precauciones adecuadas, tales como la de cubrir el fondo del agujero con limo oscuro bien apisonado para aumentar el poder absorbente de la acción capilar, pueden obtenerse rendimientos de más de $1 \text{ l m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ en lugares desérticos situados a

distancias de hasta 500 km del mar, donde la humedad diaria es del orden del 10 al 15%. El costo de este tipo de instalación es de alrededor $1 \text{ \$}/\text{m}^2$, que incluye tanto el costo de los materiales como el de la mano de obra. Lo reducido del costo no justifica la construcción de grandes instalaciones, que requerirían una mano de obra excesiva para su supervisión y su funcionamiento (vaciado de las bateas al amanecer).

El paso siguiente consiste en cubrir la cavidad con una capa negra impermeable (alquitrán, caucho butílico, polietileno negro) y cerrar herméticamente las juntas entre la cobertura transparente y los costados. El aumento del poder de absorción obliga a alimentar el alambique con cualquier fuente disponible de agua (plantas del desierto, agua estancada, agua del mar, etc.). La geometría de la hoya parece tener un efecto poco considerable sobre el rendimiento (usualmente de 1 a $5 \text{ l m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). La utilidad de captar también el agua de lluvia induce a levantar construcciones simétricas o asimétricas, tipo cobertizo. El material de la hoya puede ser tierra apisonada, hormigón, asbestocemento, madera o plástico. La cobertura suele ser de cristal o de FPV, poliéster u otra película de plástico. El soporte de la cobertura puede ser un marco del mismo material que la hoya o un marco metálico (aluminio, acero galvanizado o pintado). El material obturador suele ser caucho silicónico en los alambiques experimentales, pero los datos más recientes sobre la durabilidad de los asfaltos o de las mezclas de asfalto y poliéster hacen pensar en la posibilidad de utilizarlos como materiales obturadores, sobre todo si se añaden pigmentos adecuados a la mezcla para impedir una mayor polimerización y un aumento de la fragilidad. El aislamiento del fondo o de los costados del alambique parece ser de menor importancia que el acondicionamiento del suelo para dotarlo de drenaje e impedir el crecimiento de vegetación que pudiera dañar el alambique.

Las evaluaciones del costo actual de los distintos diseños habrán de basarse sobre el costo de los materiales locales y sobre todo de la mano de obra local. Oscilan de 8 a 20 dólares por m^2 , y sucede a

menudo a que una inversión más alta puede verse compensada por unos costos de intervención, mantenimiento y funcionamiento más bajos. De hecho, las instalaciones grandes (20 a 50 m³/d) deben disponer de sistemas de llenado y vaciado automáticos, aunque estas operaciones suelen llevarse a cabo semanalmente. En estos casos la única tarea del personal de la planta es el mantenimiento de la instalación y la renovación periódica de la sustancia obturadora tras unos cuantos años de funcionamiento.

Las pérdidas por convección y absorción en el terreno, así como las fugas de vapor son todas del mismo orden de magnitud, es decir entre 4% y 6%. No se prevé ninguna utilidad apreciable de intentar mejorar la geometría de la hoya o su comportamiento térmico. Cabe sin embargo esperar mejoras cualitativas del empleo de sistemas combinados, tales como alimentar las hoyas con el agua de refrigeración descargada por el condensador de una central eléctrica, refrigerar la cubierta de vidrio precalentando el agua alimentada a las hoyas o utilizando superficies de condensación (distintas de la cubierta transparente), capaces de proporcionar una mayor radiación y convección.

No existe demasiado margen para mejoras tecnológicas en lo que respecta a los materiales de construcción fuera de las sustancias obturadoras. Sin embargo, cabría recoger más datos sobre la fiabilidad y los fallos de los materiales a lo largo de periodos prolongados para distintos niveles de mantenimiento. En conjunto, cabe señalar un costo aproximado de 2 dólares por cada m³ de agua dulce obtenida por una instalación a escala natural (2-50 m³/d).

Es preciso señalar que los alambiques de hoya son una solución inadecuada para comunidades de más de 10.000 habitantes que no dispongan de otras fuentes de agua dulce. La ausencia de economías de escala apreciables en este sistema obliga a efectuar inversiones excesivas y a ampliar de tal modo la superficie colectora, que se complican en exceso los problemas de fontanería y de bombeo.

Captación indirecta de la energía solar

La captación indirecta de la radiación solar y su transformación para separar el agua de las sales disueltas requiere el empleo de colectores de placa plana en una planta desalinadora tradicional del tipo multifásico, multiefecto o por compresión de vapor.

Los colectores de placa plana son iguales a los que se encuentran en el mercado para proporcionar agua caliente a las viviendas. No se necesitan medidas especiales para elevar la temperatura operacional del sistema, puesto que, actualmente, la temperatura operacional máxima de las plantas de destilación es de 90°C. Por encima de esta temperatura, el agua del mar resulta demasiado corrosiva para la mayoría de los materiales de construcción utilizados, y se

precipitan sales de calcio, salvo que se añadan productos químicos costosos (ácido sulfúrico, polifosfatos). Incluso por debajo de este límite de 90°C, el material del colector tiene que ser de cobre al níquel o de una aleación de aluminio. Sin embargo, suele ser conveniente hacer pasar agua dulce en ciclo cerrado a un colector típico de acero al carbono, y construir un termopermutador separado para transmitir la energía captada por el colector a la salmuera de la planta de destilación.

Los tipos de colectores más utilizados para este fin se fabrican encerrando una lámina doble de acero ondulado dentro de una caja rectangular de fibra de vidrio, acero galvanizado y hormigón. La superficie colectora de metal va pintada de negro o recibe un acabado selectivo (óxido de cobre). La cubierta de la caja está formada por una o dos capas de vidrio corriente de ventana, dejándose una separación de unos cuantos centímetros entre el vidrio y la superficie colectora. Debajo del colector de metal, la caja está forrada con una capa de material de aislamiento térmico (lana mineral, o espuma de poliuretano o de poliestireno). Las dimensiones de un colector típico de uno de nuestros circuitos experimentales son de 1 m x 2 m x 15 cm, con una caja de resina con fibra de vidrio de 1 mm, una capa aislante de espuma de uretano de 5 cm, doble lámina de vidrio y una sustancia obturadora de silicona. Este colector viene a costar entre 30 y 40 dólares por m² para instalaciones de producción en escala muy reducida, y proporciona un rendimiento calorífico de más de $2,9 \times 10^6$ kJ/m² al año en Roma. En un lugar desértico con un clima más seco, situado entre los 10° y los 20° de latitud, podría facilitar alrededor de 7×10^6 kJ/m² al año.

Todos los materiales de construcción (pero no el colector ya montado) tienen una durabilidad ya comprobada de entre 20 y 25 años. Se espera que la producción en serie de este tipo de colectores haga descender su costo a unos 25 ó 30 dólares por m², aunque el precio de venta al por menor de la mayoría de los colectores en Europa y los Estados Unidos se sitúa actualmente a un nivel de entre 70 y 100 dólares por m² de superficie de colector.

No se requiere mano de obra especializada para el montaje de los colectores, la construcción de la caja ni el encristalado de la cubierta superior.

A continuación se examinarán los principios operacionales de los principales sistemas de destilación que pueden acoplarse a colectores solares.

Proceso de descenso multifásico de la temperatura

En este proceso (figura 1) se calienta previamente el agua del mar mediante un intercambio térmico con los vapores de agua dulce en fase de condensación, recibiendo seguidamente la salmuera así calentada el calor derivado de la energía solar, que eleva su

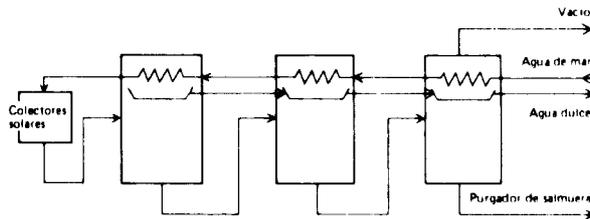


Figura 1. Caída multifásica

temperatura a 70° ó 90°C. A continuación se hace descender gradualmente la presión de la salmuera en una serie de recintos por los que pasa el haz de tubos del precalentador. Se recoge el agua dulce condensada que gotea del haz del precalentador y se la hace circular a través de la cadena de recipientes para recuperar su calor sensible. Las fases de presión máxima y mínima se mantienen alrededor de 0.8 barías y de 0.05 a 0.07 barías, respectivamente, y el número de fases será el necesario para poder fraccionar el descenso total de la temperatura (entre el colector caliente y el agua fría del mar) en descensos o "caídas" de temperatura de unos 2°C por fase. Las instalaciones actualmente en venta cuentan con un total de unas 10 a 30 fases. Teóricamente se reutiliza el calor latente de evaporación de cada fase para evaporar igual cantidad de agua a menor presión en la fase siguiente, por lo que, con 30 fases, el rendimiento máximo teórico de cada unidad de colector debería sobrepasar los 1201 m⁻²d⁻¹. En la práctica se producen ciertas pérdidas, atribuibles a caídas de presión, a la pequeña dimensión de las superficies de transmisión del calor y al aumento ebulloscópico, por lo que los rendimientos reales vienen a ser del orden de unos 60 a 1001 m⁻²d⁻¹.

Se efectuaron cierto número de evaluaciones paramétricas de plantas destiladoras multifásicas, cuyos resultados fueron correlacionados por la siguiente ecuación:

$$C = 256\,000 + 853\sqrt{PN} + 4,5(10\,764)NA + 0,45P + 20,0P^{0,8} + 562P^{0,6} + 12\,900P^{0,3}$$

- P = producción de agua dulce (lb/h)
 N = número de fases
 A = superficie de transmisión térmica por fase (m²)
 C = costo (\$)

Si sumamos la amortización de este costo con unos 200 dólares diarios para mano de obra y productos químicos y con la amortización del costo de los colectores de placa plana, calculada en unos 50 a 70 dólares por m², se obtiene un descenso del costo por unidad de volumen de agua dulce de 2 a 1 dólar por m³, para producciones del orden de 50-500 m³/h. Estas estimaciones son más bien cautas y se basan en el empleo de una tecnología moderna. No se ha efectuado ninguna tentativa de almacenar energía solar para su utilización nocturna; esta instalación irá dotada de una caldera alimentada con

combustibles fósiles para mantener la planta en funcionamiento en ausencia de la radiación solar.

A continuación pueden verse los datos típicos utilizados en el diseño de dos plantas de caída multifásica:

Producción nominal	(lb/h)	10 ⁵	10 ⁶
	(kg/h)	45 x 10 ³	45 x 10 ⁴
Temperatura del mar	(°F)	77	77
	(°C)	25	25
Temperatura de descarga de salmuera concentrada	(°F)	82	82
	(°C)	27,8	27,8
Caída de la temperatura	(°F por fase)	4	4
	(°C por fase)	2,2	2,2
Temperatura máxima del colector	(°F)	180	200
	(°C)	82	93
Número de fases		24	29
Descarga de salmuera	(10 ³ lb/h)	780	6 300
Reciclaje de salmuera	(10 ³ lb/h)	75	590
Caudal en los colectores	(10 ³ lb/h)	950	7 900
Superficie total de transmisión térmica	(10 ³ pies ²)	60	560
	(10 ³ m ²)	5,5	52
Costo de inversión solar	(10 ⁶ dólares)	3,48	16,3
Superficie del colector solar	(10 ³ m ²)	6,1	66
Costo del agua dulce	(\$/m ³)	1,98	0,94
Producción diaria de agua dulce por unidad de superficie de colector	(l/m ²)	74	68,5

Proceso multiefecto

Este proceso (figura 2) requiere también una serie de recipientes cuya presión y temperatura van descendiendo progresivamente. La fase más caliente del proceso está alimentada directamente por el colector solar, y la fase más fría se mantiene a una temperatura cercana a la temperatura ambiente del mar. La producción de vapor de la primera fase pasa, a través de un haz de tubos, al recipiente siguiente para calentar el líquido en la fase siguiente. De este modo se recupera el calor latente de cada fase por transmisión a la siguiente. La diferencia de temperatura entre cada dos fases es del orden de los 10° a 15°F (5,6° a 8,3°C), y por ello rara vez se utilizan más de 5 a 10 fases.

Una evaluación paramétrica del costo efectuada sobre cierto número de diseños detallados permitió

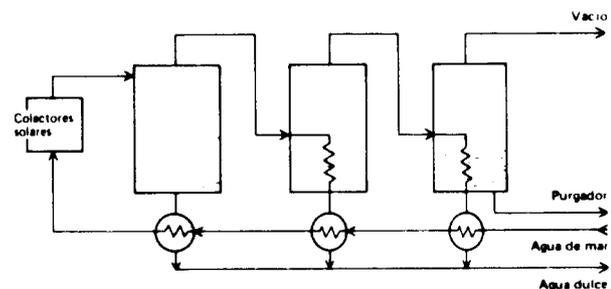


Figura 2. Multiefecto

formular la siguiente ecuación sobre el costo de inversión de la planta:

$$C = (2 - 1,37 N^{-1}) P + 556 \sqrt{PN} + 4,3 P^{0,8} + 139 P^{0,6} + 7\,120 P^{0,3} + 422\,000$$

En esta ecuación, P y N tienen el mismo significado que en la anterior. El proceso multiefecto parece tener una ligera ventaja, desde el punto de vista de su comodidad, sobre el proceso de caída multifásica para producciones del orden de los 10 a 80 m³/h, pero pierde esta ventaja para capacidades más elevadas. En una planta de diseño típico, con una capacidad de producción de unos 50 m³/h (nivel en el que este proceso resulta competitivo), el costo del agua dulce sería de 1,7 a 1,8 \$/m³, en el cual se incluye la amortización, la mano de obra, los colectores y los productos químicos.

Otros procesos

En el proceso por compresión de vapor (figura 3) se recupera calor extrayendo vapor de una fase, elevando su nivel térmico mediante un compresor (centrifugo o por eyector de vapor), y alimentándolo como vapor de calefacción a la fase de la que procede o a otra fase. Un estudio de las evaluaciones paramétricas de costos y de los diseños del proceso muestran que este tipo de planta no resulta demasiado ventajoso si no va acoplado con una sección de caída multifásica. Además, parece ser que este sistema necesita un motor propulsor, tal como un motor diesel, para satisfacer sus necesidades de energía mecánica, y que la refrigeración del radiador de un motor de este tipo proporciona más calor del necesario para satisfacer los requisitos térmicos del proceso, por lo que, al sobrar los colectores solares, no se ve la utilidad de acoplarlos al sistema.

En el sistema de humectación y deshumectación se calienta el agua de mar en colectores solares, saturándose el aire ambiente en una torre de rectificación de relleno en contracorriente, recuperándose seguidamente el agua dulce al refrigerarse el aire húmedo en un condensador que recupera parte del calor, pasándolo al agua de mar que se alimenta a los colectores solares. Este proceso resulta poco intere-

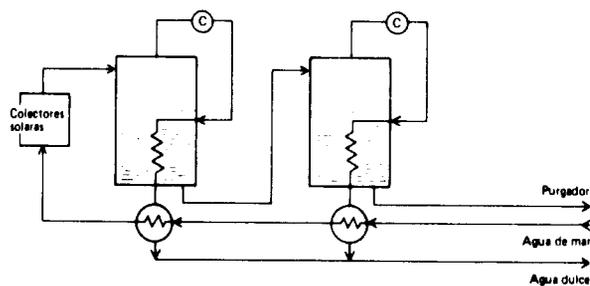


Figura 3. Compresión de vapor

sante si se trata únicamente del suministro de agua dulce, pero pudiera resultar útil si el aire húmedo generado como subproducto puede aprovecharse para otras aplicaciones (cultivos de invernadero, acondicionamiento de aire, etc.).

Limitaciones y perspectivas

A primera vista se diría que el alambique de hoya es el único sistema que permite aprovechar plenamente la mano de obra y los materiales locales de los países en desarrollo. Por otra parte, la llamada tecnología avanzada que entra, por ejemplo, en la construcción de una instalación de caída multifásica es una tecnología fácil de transmitir y, en algunos casos, existe ya en la mayoría de los países áridos, por ser la misma que se utiliza para la construcción o la reparación de una instalación tradicional de elaboración de productos químicos. Si se exceptúa la compra de algunos materiales especiales para las fases más calientes del proceso (aleaciones de níquel y cobre) y posiblemente también del equipo de vacío, cualquier equipo de soldadores y de montadores de tuberías encargado habitualmente del mantenimiento de alguna refinería local de petróleo conoce todas las técnicas necesarias para fabricar los escasos recipientes de presión y termopermutadores de que se compone la instalación.

Hay que recalcar también que algunos países áridos (como, por ejemplo, Arabia Saudita, Bahrein, Kuwait, Qatar) han construido o están construyendo grandes plantas desalinadoras alimentadas por combustibles fósiles. Una propuesta constructiva sería añadir a estas plantas una batería de colectores de placa plana que permitiría ahorrar combustible sin alterar el funcionamiento de las plantas o requerir modificaciones de diseño. Con una inversión limitada podría ahorrarse, o más bien "conservarse", la mitad del combustible transformándolo en colectores que tras un periodo de unos 10 años seguirían suministrando energía prácticamente gratuita para el proceso.

Esta propuesta soslaya una de las principales dificultades de las plantas desalinadoras alimentadas por energía solar: las fluctuaciones del suministro energético. Las grandes plantas desalinadoras están diseñadas mecánicamente de modo que las caídas de presión entre fases o efectos vienen determinadas por el nivel del líquido en los distintos recipientes. La elevación o el descenso del insumo calorífico alterará el caudal y desequilibrará el proceso. Por ello, a no ser que se introduzcan diseños especiales para la desalinación solar, será preciso adoptar medidas para conseguir que las fluctuaciones de temperatura de la fuente calorífica sean del orden de los 2-5°C. Esto puede conseguirse de una de las siguientes maneras:

a) Instalando una caldera compensatoria alimentada con combustibles fósiles;

b) Parando la planta por la noche;

c) Instalando un depósito para almacenar el calor solar.

La solución a) es el método en que se basan las evaluaciones anteriores y coincide con la propuesta de acoplar colectores solares a las plantas desalinadoras ya existentes. La solución b) empieza a resultar posible puesto que los diseños más recientes de plantas desalinadoras prevén una fase de puesta en marcha de tan sólo 15 minutos, lo que supone una pérdida poco considerable de energía térmica. La solución c) requiere un mayor esfuerzo de investigación para hacerla económicamente rentable, pero es la que encierra mayores posibilidades.

En un estudio reciente sobre los principales procedimientos para almacenar las enormes reservas de energía térmica necesarias para el funcionamiento nocturno de una planta desalinadora de gran tamaño se llegó a las conclusiones siguientes. Es preciso descartar la idea de almacenar agua caliente, ya que supondría un aumento de unos 2 \$/m³ (para amortizar el costo de los depósitos) en el costo del agua dulce, que ascendería al doble. El almacenamiento químico, frecuentemente preconizado en muchas propuestas, no resulta aún viable. Por ejemplo, el procedimiento de desprender durante el día vapor de amoniaco de un absorbente tal como el cloruro cálcico y permitir su reabsorción durante la noche para obtener el calor de la reacción, requeriría para la compresión y licuación del amoniaco casi tanto calor como el que se pretende almacenar. Otra posibilidad sería la de almacenar calor mediante la fusión de una sustancia compuesta para recuperar el calor latente de fusión al recongelar la sustancia por la noche. Los cuatro estudios efectuados a este respecto sugieren la viabilidad de esta solución cuando se emplea parafina (punto de fusión de 70° a 80°C) encerrada en bolsas de polietileno dentro de los tanques de agua caliente. Este procedimiento permitiría un ahorro de un 50% a 80% en el volumen del tanque necesario para un almacenamiento equivalente de energía térmica. Las investigaciones se prosiguen actualmente en esta misma línea.

Tendencias futuras

Varias proyecciones sobre las tendencias del mercado mundial de combustibles fósiles y nucleares indican que los costos de la energía aumentarán en un 50% cada 10 años. Al nivel actual de costos, de los 1 ó 2 dólares por m³ que cuesta el agua dulce producida por una gran planta destiladora (50 a 500 m³/h), 0,75 \$/m³ corresponden a los costos del combustible. Conforme a estas proyecciones, dentro de 20 años estos 0,75 \$/m³ se habrán elevado a unos 1,7 \$/m³, mientras que con colectores solares, que

estarían plenamente amortizados para entonces, el costo sería nulo. El ahorro total por concepto de energía sería de este modo del orden de 1,7 \$/m³. Con respecto a la dificultad habitual de los países en desarrollo para reunir capitales para la inversión, en este caso en colectores, debe señalarse que, para instalaciones de las dimensiones mencionadas, los colectores vienen a representar entre un 5% y un 25% del costo total de inversión. Cabe simplificar la decisión reduciéndola a la aceptación de una inversión global adicional efectuada hoy para reducir aproximadamente a la mitad el costo del agua dulce dentro de unos 15 ó 20 años. Sin embargo, si no se dispone de capital de inversión, quedará siempre como alternativa la posibilidad de utilizar alambiques solares. El carácter modular de la construcción de estos alambiques permite establecer un pequeño número de unidades cada año, o siempre que se pueda financiar la adquisición de los escasos materiales necesarios (principalmente vidrio).

Se considera que esta solución será la mejor, por lo menos para aquellos casos en los que se trate de suministrar agua a una población de menos de 5.000 ó 6.000 habitantes, como es el caso de la mayoría de las aldeas de las zonas áridas del mundo.

BIBLIOGRAFIA

- Ahmed, S. Y. y colaboradores. Scope and development of solar stills for water desalination in India. *Desalination* (Amsterdam), 5:1:64-74, 1968.
- Bahadori, M. N. y Eldin, F. E. Improvement of solar stills by surface treatment of the glass. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 14:339, 1973.
- Baum, V. A. Solar distillers. Monografía preparada para la Conferencia de las Naciones Unidas sobre nuevas fuentes de energía, Roma, 21-31 de agosto de 1961 (*Solar Energy*: III, vol. 6, pág. 178 (S/119)). Número de venta: 63.1.40.
- Bloemer, J. W. Experimental investigation of the effect of several factors on solar still performance. Tesis para el título de M. Sc. Ohio State University, 1963.
- . Factors affecting solar-still performance. *Journal of heat transfer* (Nueva York), 65, noviembre de 1965.
- Brice, D. B. Saline water conversion by flash evaporation utilizing solar energy. American Chemical Society, Washington, D.C., 1960 (*Advances in Chemistry Series* 38).
- . Sunshine fuel combine for desalination. *Chemical and engineering news* (Washington, D.C.), 40:72, 1962.

- Cooper, P. I. Digital simulation of transient solar still processes. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 12:3:313-331, mayo de 1969.
- Some factors affecting the absorption of solar radiation in solar stills. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 13:373, 1972.
- The absorption of radiation in solar stills. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 12:333, 1969.
- The maximum efficiency of single-effect stills. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 15:205, 1973.
- Delyannis, A. Water from the Sun. *New Scientist* (Londres), 34:388, mayo de 1967.
- Delyannis, A. y Delyannis, E. Sea water distillation trough solar radiation. *Chemie-Ingenieur Technik* (Weinheim, República Federal de Alemania), 41:90, febrero de 1969.
- Texto en alemán, con resúmenes en alemán y en inglés.
- The Gwadar, Pakistan, solar distillation plant. Paper prepared for the Solar Energy Society Meeting, Palo Alto, California, octubre de 1968.
- Operation of solar stills. Paper prepared for the United Nations Solar Distillations Panel Meeting, octubre de 1968.
- Delyannis, A. y Piperoglou, E. Solar distillations development in Greece. *Sun at work*, 12:1:14, 1967.
- Dunkle, R. V. A simple solar water heater and still. Paper presented at joint AIRAH-SES Meeting, Perth, mayo de 1971.
- Solar water distillation: the roof-type still and a multiple effect diffusion still. University of Colorado, 1961 (International Heat Transfer Conference, part 5: International Dev. a Heat Transfer, pág. 895).
- Dzhubalieva, P. A. Determination of the aerodynamic coefficients of solar stills in relation to the leakage of steam-air mixture. *Applied solar energy* (Nueva York), 1:4:31-36, julio/agosto de 1965.
- Effect to leakage from a solar still on its performance under thermal head. *Applied solar energy* (Nueva York) 1:4:37-42, julio/agosto de 1965.
- Edlin, F. E. Air supported solar still. E. I. du Pont de Nemours, US patent No. 3, 174,915, marzo de 1965.
- Eibling, J. A., Talbert, S. G. y Löf, G. O. G. Solar stills for community use-digest of technology. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 13:263, 1971.
- Gomkale, S. D. y Datta, R. L. Solar energy applications in India. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 14:321, 1973.
- Some aspects of solar distillation for water purification. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 14:387, 1973.
- Hay, H. R. Plastic solar stills: past, present and future. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 14:393, 1973.
- Khanna, M. L. Solar water distillation in North India. *Journal of Scientific and industrial research* (Nueva Delhi), 21A:9:429-433, septiembre de 1962.
- Solar water distillation in North India. Nueva York. Plenum Press, 1964. *Proceedings of the International Seminar on Solar and Aeolian Energy*, Sounion, Grecia, septiembre de 1961.
- Lawand, T. A. y Alward, R. *Plans for a glass and concrete solar still*. Brace Research Institute Technical Reports (McDonald College of McGill University, Ste. Anne de Bellevue, Quebec), 58, diciembre de 1968.
- Löf, G. O. G. Application of theoretical principles in improving the performance of basin-type solar distillers. Monografía preparada para la Conferencia de las Naciones Unidas sobre nuevas fuentes de energía, Roma, 21-31 de agosto de 1961 (*Solar Energy*: III, vol. 6, pág. 266 (S/77)). Número de venta: 63.1.40.
- Löf, G. O. G., Eibling, J. A. y Bloemeer, J. W. Energy balances in solar distillers. *AIChE journal* (Nueva York), 7:4:641-649, diciembre de 1961.
- Martens, C. P. Theoretical determination of flux entering solar stills. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 10:2:77-80, abril/junio de 1966.
- Morse, R. N. Solar distillation in Australia. *Civil Engineering* (Nueva York), 38:39-41, agosto de 1968.
- The theory of solar still operation. Paper prepared for the United Nations Solar Distillation Panel Meeting, octubre de 1968.
- Morse, R. N. y Read, W. R. W. A rational basis for the engineering development of a solar still. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 12:5, 1968.
- Morse, R. N., Read, W. R. W. y Trayford, R. S. Operating experiences with solar stills for water supply in Australia. Paper presented at the Solar Energy Society Annual Meeting, Palo Alto, California, octubre de 1968.
- Proctor, D. The use of waste heat in a solar heater. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 14:433, 1973.
- Satcunanathan, S. y Hansen, H. P. An investigation of some of the parameter involved in solar distillation. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 14:353, 1973.
- Soliman, S. H. Effect of wind on solar distillation. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 13:403, 1972.

- Szulmayer, W. Solar stills low thermal inertia. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 14:415, 1973.
- Telkes, M. Fresh water from sea water by solar distillation. *Industrial and engineering chemistry* (Washington, D.C.), 45:5:1108, marzo de 1953.
- Tleimat, B. W. y Howe, E. D. Comparison of plastic and glass condensing covers for solar distillers. *Proceedings of the Solar Energy Society Conference*, Phoenix, Arizona, marzo de 1967.
- Weihe, H. Fresh water from sea water: distilling by solar energy. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 13:439, 1972.

**Informes publicados
por la Oficina de Aguas Saladas,
Departamento del Interior de los EE.UU.,
Washington, D.C.**

Número

- 13 Research on methods for solar distillation (por M. Telkes), diciembre de 1965.
- 50 Study and evaluation of solar sea-water stills, septiembre de 1961.
- 60 Development of an improved solar still (por W. N. Grune y colaboradores), marzo de 1965.
- 147 Second two years' progress on study and field evaluation of solar-water stills (por el Battelle Memorial Institute), julio de 1965.
- 190 Final three years' progress on study and field evaluation of solar sea-water stills (por

Número

- el Battelle Memorial Institute), mayo de 1966.
- 233 Conceptual design study of a 50 million gallon per day msf desalination plant and test module, noviembre de 1966.
- 251 Parametric cost studies of the multistage flash progress, mayo de 1967.
- 276 Preliminary design of a diesel-powered vapour-compression plant for evaporation of sea-water, agosto de 1967.
- 355 Analisis and optimization of a multi-effect multi-stage flash distillation system, mayo de 1968.
- 438 Sea water corrosion control by environment modification, abril de 1969.
- 479 Test facility and vertical-tube-evaporator test-bed plant, Freeport, Texas. Annual report, septiembre de 1969 (FY 1968).
- 490 Multistage flash distillation. Desalting state-of-the-art, 1968, octubre de 1969.
- 492 Pilot plant tests and design study of a 2.5 MGD horizontal-tube multiple-effect plant, octubre de 1969.
- 546 Manual on solar distillation of saline water, abril de 1970.
- 635 Seawater desalting with chemical recovery, enero de 1971.
- 638 Economic analysis of the membrane water desalting processes, diciembre de 1970.
- 641 Study of unconventional methods for brine concentration, abril de 1971.

Posibilidades de utilización de secadores agrícolas solares en las zonas en desarrollo

T. A. Lawand

Brace Research Institute, Macdonald College de la Universidad McGill, Quebec (Canadá)

Introducción

Desde la aurora de la civilización se ha utilizado la energía solar para secar y conservar excedentes agrícolas. Los métodos empleados son sencillos y a menudo toscos, pero razonablemente eficaces. En términos generales, los frutos se esparcen por el suelo o sobre plataformas, muchas veces sin tratamiento previo, y se voltean de vez en cuando hasta que se hayan secado bastante como para poder ser almacenados con miras a un consumo posterior. El proceso absorbe mucha mano de obra y el equipo requiere poco capital.

Varios productos tales como fruta, verduras, cereales, granos, pieles, cueros, carne, pescado y tabaco se secan utilizando estas sencillas técnicas. Probablemente no hay cálculos precisos sobre las grandes cantidades de material secado de esta manera. El secado al sol es una tecnología muy difundida, practicada en casi todos los países del globo y casi en cualquier latitud.

Dado que el secado al sol se originó en muchos de los países en desarrollo, no hay grandes dificultades sociales en persuadir a la población local a que coma alimentos deshidratados. Sin embargo, el proceso presenta varios problemas técnicos:

a) Es intermitente, ya que se ve afectado por la nubosidad y la lluvia;

b) Es afectado por el polvo y la contaminación atmosférica;

c) No está a salvo de intrusiones de personas y animales;

d) Los productos están expuestos, mientras se secan, al ataque de los insectos.

En el segmento más adelantado de la sociedad, tanto en las zonas en desarrollo como en las regiones industrializadas, se ha sustituido muchas veces el tradicional secado al sol por el secado artificial, con objeto de mejorar el control de calidad, reducir el

desperdicio y eliminar pérdidas e ineficiencias surgidas de las dificultades mencionadas.

El elevado costo de la mano de obra en la mayor parte de las zonas industrializadas y, hasta hace poco, el bajo costo de los combustibles fósiles permitían el desarrollo de procesos de secado artificiales en gran escala. El costo de la deshidratación se añadía al costo de vender las materias elaboradas. El advenimiento de precios más elevados para los combustibles fósiles y las perspectivas de agotamiento y escasez de estos combustibles han estimulado un renovado interés por los secadores agrícolas solares.

La cantidad de productos agrícolas deshidratados mediante la energía solar en 1968 se ha calculado en 255×10^6 t. Sólo en ese año, Australia exportó más de 72×10^3 t de alimentos secados al sol, por valor de 27 millones de dólares. Durante los últimos tres decenios, ha aumentado el interés por el desarrollo de secadores agrícolas solares que utilizan los principios conocidos de la heliotecnología para contrarrestar algunos de los principales inconvenientes que presenta el secado al sol tradicional.

Al evaluar las tecnologías que pueden ser adecuadas para las zonas en desarrollo, debe distinguirse entre pequeñas y grandes explotaciones. Los pequeños sistemas se utilizarían cuando las propiedades no fueran grandes y los agricultores, pescadores y ganaderos produjeran sólo excedentes modestos. El objetivo es deshidratar estos excedentes para ser consumidos únicamente por la familia del productor o para la venta en el mercado local en la vecindad inmediata. A veces, se entregan pequeños excedentes de ciertos productos tales como cacahuetes o arroz a instalaciones centrales para ser elaborados, deshidratados y, finalmente, comercializados. Estos sistemas están generalmente bien establecidos y requieren cierto grado de organización en la industria. Muchas veces, sin embargo, esas instalaciones no existen. Por consiguiente, al elegir tecnologías, hay que diferenciar entre la existencia de infraestructuras comerciales y físicas en una localidad dada.

Los grandes sistemas exigen siempre una fuente exterior de energía. Donde se dispone de electricidad de fuentes tradicionales, de suministro seguro y a un costo no excesivo, es lógico utilizarla para hacer funcionar ventiladores y sopladores, respiraderos y deflectores en los conductos, con el fin de aumentar la eficiencia y el rendimiento de un sistema agrícola basado en la energía solar. Algunos secadores son del tipo portátil y motorizado, en el que se acoplan colectores solares calentadores de aire con ventiladores eléctricos (también se podrían utilizar motores de gasolina o diesel) y que se llevan directamente a las zonas de producción para el secado en el lugar mismo. Tradicionalmente, ese proceso se utilizó empleando combustibles fósiles, muchas veces gas butano o propano, como fuente de energía. Con el aumento de precio de estos sistemas, se tiende a desarrollar sistemas de esa naturaleza que recurran a la energía solar para suministrar la mayor parte de la energía necesaria para la deshidratación. De hecho, se utilizan algunas veces combustibles fósiles para complementar estos colectores solares, a fin de mantener condiciones óptimas de funcionamiento en un sistema operado parcialmente con energía solar.

El otro gran sistema aplicable a la deshidratación en los sectores industrializados de los países desarrollados y países en desarrollo es utilizar la superficie del techo de los edificios como colector solar, dotando a los edificios de sopladores, conductos, colectores y, muchas veces, mecanismos de almacenamiento adecuados. En los Estados Unidos, la Universidad Politécnica de California y la firma Thompson Ramo Wooldridge Systems han iniciado un proyecto, financiado por el Gobierno, en el que la energía solar se ha de utilizar en la deshidratación como sustituto del gas natural. El Estado de California, por sí solo, produce anualmente frutas y verduras por valor de más de 450 millones de dólares. El sistema se hará, sin duda, cada vez más económico al seguir su ascenso el costo de los combustibles fósiles.

Otro sistema que despierta cada vez más interés en esta esfera, tanto en los países desarrollados como en los países en desarrollo, es la utilización de invernaderos para deshidratar excedentes de producción. La combinación del secado con la utilización del invernadero presenta muchas ventajas y debe examinarse para cada conjunto de circunstancias. Finalmente, un sistema más antiguo, pero ciertamente no menos válido, ha sido la utilización del calor extraído de la cara inferior de los techos. Este sistema, que es una de las más antiguas aplicaciones del secado solar de productos agrícolas, ha resultado muy satisfactorio en varias aplicaciones.

Principios básicos del secado solar

Las dos fases principales del proceso utilizado en los secadores agrícolas solares son el calentamiento

solar del fluido utilizado (generalmente el aire) y el secado mismo, en el que el fluido ya calentado extrae la humedad del material que se ha de secar.

La primera de estas dos fases puede cumplirse de dos maneras: 1) indirectamente, mediante colectores solares calentadores de aire, utilizando la convección natural o forzada para precalentar el aire ambiente y reducir su humedad relativa; 2) directamente, calentando en el lugar mismo el aire, que a su vez deshidrata directamente el producto.

Queda fuera del ámbito de este trabajo el examen de la teoría del secado, pero se pueden esbozar unos pocos principios aplicables al secado por radiación directa, ya que los principios involucrados en el secado de materiales en recintos opacos mediante el aire caliente procedente de un calentador solar o de algún otro tipo de unidad de calentamiento han sido ya estudiados en otro lugar.

El primer requisito es la transferencia de calor a la superficie del material húmedo por conducción desde superficies calentadas en contacto con el material, por conducción y convección del aire adyacente a temperaturas sustancialmente superiores a las del material que se seca, o por radiación de superficies circundantes o del sol. La absorción de calor por el material suministra la energía necesaria para evaporar el agua que contiene, aproximadamente 2.5 kJ (590 cal) por gramo de agua evaporada. El agua empieza a evaporarse de la superficie del material húmedo cuando la energía absorbida ha aumentado la temperatura lo suficiente para que la presión del vapor de agua supere la presión parcial en el aire ambiente. Se logra un estado estacionario cuando el calor necesario para la evaporación llega a ser igual a la tasa de absorción de calor del entorno.

Para que se renueve la humedad eliminada de la superficie, debe producirse difusión del agua desde el centro a la superficie del material que se ha de secar. Este proceso puede ser rápido o lento según sea la naturaleza del material que se seca y su contenido de humedad en un momento dado. Puede, pues, determinar la velocidad máxima de la operación de secado; o bien, si la difusión de la humedad es rápida, el factor limitante puede ser la tasa de absorción de calor sobre la superficie o la tasa de evaporación. En algunos materiales muy porosos, la evaporación puede ocurrir incluso bajo la superficie aparente del material, difundiéndose el vapor a través de los poros del sólido.

En el secado por radiación directa, parte de ésta puede penetrar en el material y ser absorbida por el sólido mismo. En esas condiciones, se genera calor en el interior del material y en la superficie, y se facilita la transferencia térmica en el sólido.

Por razones económicas, se buscan, por lo común, las velocidades máximas de secado. Se debe, sin embargo, tener presente la calidad del producto y evitar temperaturas excesivas en muchos materiales. Además, dado que el secado se produce en la superficie, los materiales que tienen una tendencia a

formar superficies duras y secas relativamente impermeables a la transferencia de líquido y de vapor deben secarse a un ritmo suficientemente lento para evitar la formación de cortezas. Las tasas de transferencia de calor y de evaporación deben vigilarse muy bien, limitando el suministro de calor o bien regulando la humedad del aire ambiente.

El secado de un producto por el simple expediente de permitir que el aire seco circule en torno a él, sin utilizar ninguna fuente directa ni indirecta de calor, se conoce como secado adiabático. El aire proporciona al material sólido el calor necesario para evaporar la humedad, reduciéndose así la temperatura del aire a la vez que aumenta su humedad absoluta y relativa. Dado que la capacidad térmica del aire es baja en comparación con el elevado calor latente de evaporación del agua, deben emplearse en ese tipo de secado grandes volúmenes de aire con una humedad razonablemente baja. El aire que sale del secador está casi saturado de agua a la temperatura del termómetro de bola húmeda. Los sólidos húmedos en contacto con este aire se aproximan a la misma temperatura.

La generalización precedente debe modificarse en parte si los materiales que se secan son solubles, incluso en pequeña medida, en el agua presente. Los frutos y otros productos agrícolas contienen sales y azúcares que causan una disminución de la presión del vapor. Las temperaturas superficiales de estos materiales deben, por tanto, ser superiores a la temperatura del aire en el termómetro de bola húmeda para permitir que se produzca la evaporación. Esto significa que el secado adiabático de estos sólidos exige aire con humedades relativamente más bajas que los materiales que no tienen solutos en la fase líquida.

Una importante propiedad de los materiales procesados mediante secado por radiación directa es su poder de absorción de la radiación. Por fortuna, la mayor parte de los sólidos tienen poderes de absorción relativamente altos, pero pueden cambiar a medida que avanza el secado, al hacerse menos "opacas" —en algunos casos más— las superficies de los materiales durante el proceso. Igualmente, puede haber cambios en la opacidad de la superficie de los materiales que son parcialmente transparentes a ciertas longitudes de ondas representadas en el espectro de la fuente radiante.

La conductividad térmica del material es también una propiedad importante, particularmente si se efectúa el secado en una capa lo bastante profunda como para requerir la conducción de calor de partícula a partícula. Si la conductividad térmica es baja, la circulación de aire calentado a través de las partículas del sólido húmedo, y entre ellas, permitirá una transferencia térmica mejor que la radiación directa sobre la superficie de una gruesa capa de partículas.

En los sistemas de deshidratación a gran escala, la convección forzada, dependiente generalmente de una

fuerza exterior y no renovable de energía, aumenta la transferencia de humedad por difusión y, si se aplica adecuadamente, aumenta la velocidad de deshidratación y mejora la calidad del producto.

A continuación se describen brevemente secadores agrícolas solares usados principalmente en países en desarrollo para aplicaciones en pequeña escala.

Clasificación de los secadores

Los secadores solares se clasifican según el modo de calentarse o la manera como se utiliza el calor derivado de la radiación solar. A este respecto, se han establecido varias categorías generales que se definen a continuación. En general, se han clasificado los secadores según su principal modo de funcionamiento. Algunos de los secadores directos y mixtos emplean también ventiladores de circulación y no son, en términos estrictos, sistemas totalmente pasivos. Los secadores que para funcionar utilizan únicamente energía solar o eólica se clasifican como sistemas pasivos.

Secado al sol o natural. Estos secadores hacen uso de la acción natural de la radiación solar y de la temperatura, humedad y movimiento del aire ambientes para lograr el secado.

Secadores solares directos. En estas unidades, el material que se ha de secar se coloca en un receptáculo con cubierta o paneles laterales transparentes. El calor es generado por la absorción de radiación solar sobre el producto mismo así como sobre las superficies internas de la cámara secadora. Este calor evapora la humedad del producto que se ha de secar. Además, sirve para expandir el aire en el recinto, provocando así la eliminación de la humedad por la circulación del aire.

Secadores solares mixtos (directos e indirectos). En estos secadores, la acción combinada de la radiación solar que cae directamente sobre el material que se ha de secar, precalentado en un calentador de aire solar, proporciona el calor necesario para lograr el secado.

Secadores solares indirectos. En estos secadores, la radiación solar no cae directamente sobre el material que se ha de secar. El aire se calienta en un colector solar y se conduce luego a la cámara secadora para deshidratar el producto.

Secadores de madera solares. Estos secadores se han puesto en una categoría especial, porque constituyen una importante aplicación de esta tecnología. En la mayoría de los casos se utiliza ventilación forzada, ya que la circulación apropiada del aire ayuda a moderar el ritmo de secado a fin de evitar el endurecimiento superficial.

Otras definiciones

En los secadores de cámara el material se seca en un receptáculo. En los secadores de bastidores o de bandejas el material se coloca sobre bastidores de tela metálica o similares.

En los secadores híbridos se utiliza otra fuente de energía, como, por ejemplo, un combustible o la electricidad, para suministrar calor o ventilación suplementarios.

En la sección siguiente se describen las características de uno o dos secadores solares pertenecientes a cada una de las categorías indicadas.

Características de determinados secadores

Secado de uvas sobre bastidores (Australia)¹

En Australia, desde hace ya bastante tiempo se secan las uvas al sol sobre bastidores. En 1972, se secaban de esta manera unas 100.000 t de uva fresca en 8 a 14 días.

El secador comprende entre ocho y doce pisos de rejilla de alambre galvanizado. La rejilla está reforzada en sentido longitudinal en ambos bordes con alambre para cercas. A cada extremo del bastidor, el peso descarga sobre dos pesados postes clavados en tierra e inclinados y apuntalados en sentido contrario a la carga. Se considera que una unidad de secado de 50 m proporciona suficiente espacio en los bastidores para secar los frutos de tres acres (1,2 ha) de viña. A intervalos de 3 m a lo largo de los bastidores, postes intermedios sostienen traviesas para los pisos.

El secador puede estar cubierto por un techo para proteger las uvas de la lluvia o del sol excesivo, lo que mejora la calidad del producto. El techo está construido de planchas de hierro ondulado fijadas en sentido transversal. Aleros iguales en ambos lados del bastidor mantienen el goteo de agua de lluvia alejado de los bastidores. El techo no tiene inclinación, de manera que cuando el viento de cualquier dirección acompaña a la lluvia, expulsa el agua del techo alejándola de los frutos. Ciertos tipos de uva alcanzan una calidad superior cuando se secan a la sombra. Para dar esta sombra se colocan muchas veces en el secador cortinas laterales de arpillera. (Debe evitarse el uso de estas cortinas en climas húmedos, ya que la humedad excesiva favorece la formación de moho.)

Secador vertical natural (Colombia)²

En Colombia se ha sometido a prueba un sistema de secado vertical concebido para secar partículas de

¹ Investigador principal: J. V. Possingham, CSIRO Division of Horticulture Research, Adelaide (Australia).

² Investigador principal: Gonzalo Roa, Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad del Valle, Cali (Colombia).

mandioca. Consiste en dos paneles de tela metálica fijados sobre dos montantes de madera, clavados en el suelo, que actúan a la vez como soportes y como tabiques de los extremos. Aberturas en la parte superior y en el fondo facilitan la carga y descarga del secador. La distancia entre los tabiques de tela metálica era variable en el prototipo experimental, a fin de permitir cargar el espacio de secado con diferentes densidades de carga de mandioca sobre la superficie expuesta. La unidad se cubre con un techo de madera para proteger el producto de la lluvia y permitir que el secado continúe durante la noche. Este método de secado da una mandioca de alta calidad, fácil de manipular y almacenar.

Secador solar de gabinete (República Árabe Siria)³

En la República Árabe Siria se ha utilizado un secador de gabinete concebido para el secado solar directo de una gran variedad de productos agrícolas en pequeña escala. Es fácil de construir con casi cualquier tipo de materiales de construcción disponibles, y fácil de manejar, mantener y controlar. Tras haberse ensayado y utilizado en muchos países con climas diferentes, este secador ha resultado ser muy eficaz para su objeto.

El secador es básicamente una cámara caliente solar en la que se pueden deshidratar en pequeña escala fruta, vegetales y otras sustancias. Consiste en un receptáculo rectangular aislado en su base y lados y cubierto por un techo doble transparente. La radiación solar se transmite a través del techo y es absorbida en las superficies internas ennegrecidas. Debido al aislamiento, sube la temperatura interna. Agujeros hechos en la base y aspilleras de descarga situadas en las partes superiores de los paneles laterales traseros del gabinete proporcionan ventilación. A medida que aumenta la temperatura, el aire caliente sale por convección natural por las aberturas superiores, mientras que el aire fresco es absorbido a través de la base. Como consecuencia, existe una perceptible corriente constante de aire sobre el material que hay que secar, situado en el interior sobre bandejas perforadas.

Secador oscilante (Costa de Marfil)⁴

El secador oscilante fue desarrollado originalmente en la Costa de Marfil para secar café y granos de cacao. El diseño fue posteriormente perfeccionado en trabajos patrocinados por el Gobierno de Ghana y la FAO. Este sencillo secador es adecuado para el secado en pequeña escala y puede manejarse con

³ Investigador principal: T. A. Lawand, Brace Research Institute, Macdonald College de la Universidad McGill, St. Anne de Bellevue, Quebec (Canadá).

⁴ Investigador principal: M. Richard y M. Vincent, Institut Français du Café et du Cacao, Parí (Francia).

facilidad. Está destinado al uso en regiones tropicales. El funcionamiento oscilatorio permite que el material que hay que secar reciba más insolación directa durante el día, aumentando la producción y obteniéndose un producto secado más uniformemente.

El secador consiste en una bandeja rectangular enmarcada en madera y dividida a lo largo en canales paralelos del mismo ancho. Hay barras de retención colocadas transversalmente. El fondo de la bandeja, sobre el cual se pone directamente el material que hay que secar, está hecho de estera de bambú. La cubierta es de una película de cloruro de polivinilo transparente, que proporciona un tamizado sustancial de los rayos ultravioletas, reduciendo así la fotodegradación del producto que se seca. Todas las partes internas del secador están cubiertas de pintura negra mate.

El marco secador está montado sobre un caballete orientado de norte a sur cuya altura es igual a un cuarto de la longitud del marco. El movimiento oscilatorio se realiza, pues, en el plano vertical este-oeste, de manera que se pueda inclinar el marco secador hacia el este por la mañana y hacia el oeste por la tarde.

La superficie efectiva del secador está limitada por dos barras de retención transversales fijadas a 200 mm de cada extremo del marco secador y otras dos a 300 mm aparte en el centro del mismo. Las tres pequeñas bandas negras así delimitadas por las barras de retención se dejan libres del producto que se seca; su objeto es convertir en calor la energía radiante procedente del sol. El aire calentado circula por convección natural del extremo inferior al superior del marco mediante huecos abiertos en cada extremo. También se absorbe aire adicional a través de la base de estera, por el efecto convectivo natural. El producto que se ha de secar se carga, con el marco en posición horizontal, hasta el nivel de las barras de retención transversales, dejando un espacio bajo la cubierta para permitir la libre circulación del aire.

Secador solar con techo de vidrio (Brasil)⁵

Un secador solar con techo de vidrio es semejante a un invernadero, salvo que tiene una cumbrera especial de hoja de zinc ondulada que permite que escape el aire caliente cargado con la humedad extraída del producto y que el aire fresco entre a través de los postigos laterales. Dentro del secador hay hileras de plataformas de secado a lo largo de los lados mayores, y un pasillo central para el operario. Los lados mayores están orientados en dirección norte-sur y todas las superficies interiores están pintadas de negro para facilitar la absorción de radiación solar (figura 1).

⁵ Investigador principal: Biswa Nath Ghosh, Centro de Pesquisas do Cacau (CEPEC), Itabuna, B. A. (Brasil).

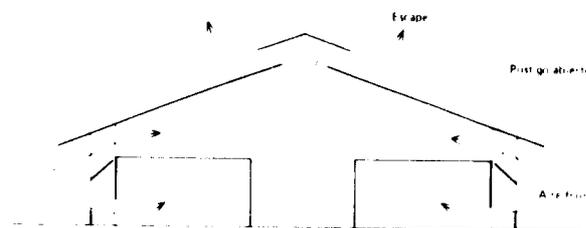


Figura 1. Circulación de aire en el secador solar con techo de vidrio

La superficie de secado está hecha de tela de alambre de hierro galvanizado colocada sobre vigas de madera fijadas transversalmente en la plataforma. Fuertes alambres extendidos perpendicularmente sobre las vigas de madera y debajo de la tela metálica proporcionan apoyo adicional a la tela metálica cargada durante el proceso de secado. Esto permite que el aire calentado pase con facilidad a través de la tela metálica sobre la cual se seca el producto.

En el secador prototipo hay calentadores de gas debajo de una de las dos hileras de plataformas de secado, que se utilizan sólo durante periodos lluviosos o por la noche, para acortar el tiempo de secado.

Un espacio libre vertical entre el borde inferior del techo de vidrio y el borde exterior de la plataforma permite la adecuada ventilación del secador. En este espacio a lo largo de cada lado del secador hay seis postigos de madera montados sobre bisagras que pueden abrirse o cerrarse independientemente para regular la corriente de entrada de aire durante las horas de secado solar.

Secador solar de fruta y verdura (Estados Unidos)⁶

Este sencillo secador de cámara que funciona tanto de modo directo como indirecto fue concebido para el secado de alimentos para uso doméstico y para pequeños restaurantes. Ha sido empleado con buen éxito para secar una gran variedad de productos alimenticios, que van desde frutas y verduras a hierbas y carne. En la figura 2 se ve una sección de este secador.

El aire, precalentado en un calentador de aire solar situado en la base del secador, es admitido en el fondo del receptáculo de secado. De ahí sube a través de los bastidores de secado, deshidratando los productos situados sobre ellos y es expulsado luego por convección natural, con su contenido de humedad, a través de aberturas situadas en el extremo superior del tabique trasero de la cámara. El secado se efectúa también con la ayuda de la radiación solar directa sobre el producto a través de los lados transparentes y los paneles anterior y superior. El secador está orientado hacia el sur.

⁶ Investigador principal: Peter Van Dresser, El Rito, Nuevo México (Estados Unidos).

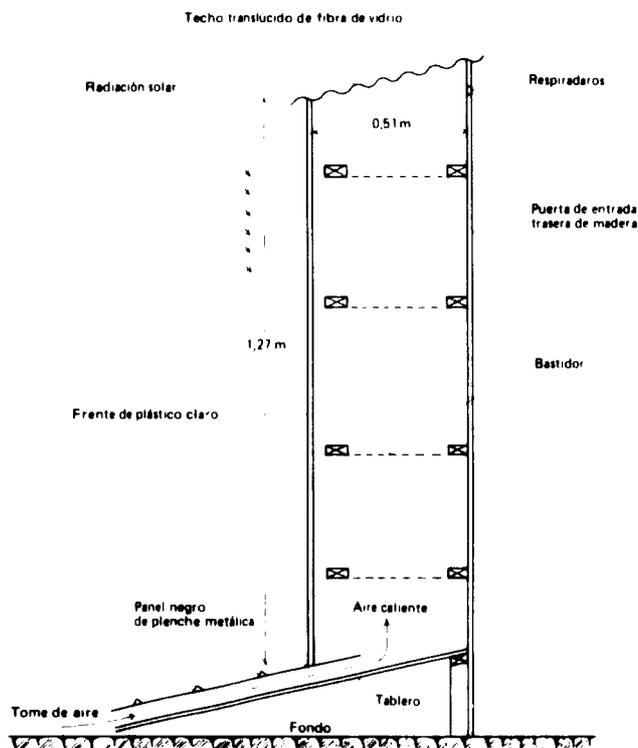


Figura 2. Corte transversal del secador de fruta y verdura

Secador solar con ventilación eólica (República Árabe Siria)⁷

En la República Árabe Siria se utiliza un secador solar con un sistema peculiar de circulación del aire. El aire es absorbido a través del secador por una rueda de paletas movida por el viento situada en la punta de una chimenea. La temperatura y el caudal de la corriente de aire se controlan mediante un regulador de tiro. Este secador se describe detalladamente en el artículo de Assad Takla, en la página 7.

Depósito de secado solar con calor complementario (Estados Unidos)⁸

Un secador de tipo tradicional puede transformarse en secador solar indirecto utilizando la misma estructura original. De ello resultarán considerables ahorros en el consumo de combustible.

El depósito está orientado de este a oeste y como colector de calor solar se utiliza el lado del techo que mira al sur (figura 3). Este colector de techo está inclinado a unos 30 grados de la horizontal y está diseñado para producir un aumento óptimo de la temperatura de 5 a 12°C por encima de la del aire exterior. La estructura del depósito proporciona cerca

⁷ Investigador principal: T. A. Lawand, Brace Research Institute, Macdonald College de la Universidad McGill, Ste. Anne de Bellevue, Quebec (Canadá).

⁸ Investigador principal: W. H. Peterson, South Dakota State University, Department of Agricultural Engineering, Brookings, Dakota del Sur (Estados Unidos).

de un metro cuadrado de superficie de colector por cada 2 metros cúbicos de grano. Esta proporción suministra un tiempo de secado aceptable para el maíz desgranado. La superficie del techo está pintada de negro para absorber la energía solar. Unos 8 cm por encima del techo se coloca una película de plástico transparente, extendiéndola sobre las vigas del entramado dispuestas de canto. El aire, aspirado por un ventilador, entra en la abertura a lo largo del caballete del tejado, se desplaza a través del colector y baja por la pared sur hasta el conducto exterior de aire. Desde aquí el ventilador impulsa el aire calentado al conducto interior de aire y a través del grano pasando por un suelo perforado. El depósito está diseñado para secar cada vez hasta la mitad de su altura de maíz desgranado (1.22 m). El ventilador debe poder suministrar aire a razón de unos 2 m³ por minuto por cada m³ de grano que haya que secar, suponiendo que el depósito esté lleno.

Gran secador solar agrícola (Barbados)⁹

El gran secador agrícola de Barbados está concebido para secar alimentos para el ganado.

⁹ Investigador principal: I. A. Lawand, Brace Research Institute, Macdonald College de la Universidad McGill, Ste. Anne de Bellevue, Quebec (Canadá).

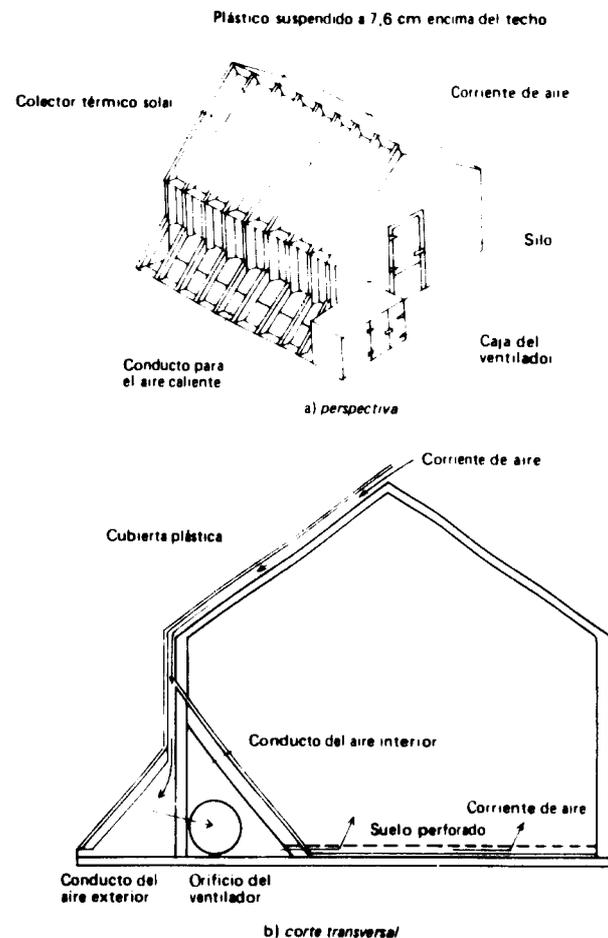


Figura 3. Silo secador solar con calor complementario

principalmente maíz; funciona en dos etapas con una capacidad diaria de 0.9 m^3 (770 kg) de maíz recién desgranado. La primera etapa utiliza un carro secador solar móvil calentado con aire en el cual debe reducirse el contenido de humedad del maíz recién recogido del 30% al 18% en el primer día de funcionamiento. El maíz se traslada luego a un silo solar calentado por aire, de una capacidad de 18 m^3 , donde el contenido de humedad se reduce gradualmente al punto de equilibrio del 13%. Se prestó particular atención en el diseño a que la corriente de aire causara una caída mínima de la presión en todas las partes de los calentadores de aire y las cámaras de secado.

Un ventilador centrífugo sopla aire a través de un conducto difusor hacia el colector solar de campana calentado por aire, que tiene 29 m de largo. El colector está fabricado con tres hojas de plástico: la superior transparente, la central que es una rejilla negra con un 50% de abertura, y la inferior que es una capa aislante puesta entre dos películas, la de encima pintada de negro y la de abajo de aluminio. Las hojas están selladas en los bordes más largos y sostenidas por collares de aprieto a distancias de un metro. La rejilla central descansa sobre una criba rígida y tendida entre postes en el terreno. El colector se hincha en ambos lados de la tapa tensionada, y calienta el aire inyectado longitudinalmente a través de él. El extremo del colector está conectado con el carro secador móvil. Este último está aislado para reducir pérdidas térmicas, y cuenta con divisores de la corriente de aire, que sostienen un suelo perforado dispuesto para secar. El maíz fresco se carga en el carro, que está cubierto por un techo doble de plástico inclinado.

Cuando se ha reducido el contenido de humedad al nivel requerido, se va echando el maíz en un soplador y se traslada al silo secador, donde su humedad se reduce gradualmente al 13%. Este secador es parte de una construcción agrícola, una de cuyas salas se ha convertido en cámara de secado, con

una cámara impelente y un suelo perforado para el secado. El techo se utiliza como colector calentador de aire solar.

Horno solar para secado de madera (India)¹⁰

Se diseñó un secador de madera solar para aumentar la velocidad de secado de la madera en relación con el método tradicional de secado con aire. Este diseño particular utiliza grandes cantidades de aire calentado (hasta 60°C) y permite un secado rápido sin que se produzca una degradación indebida de la madera (grietas, alabeos).

La estructura de carpintería del horno está orientada en sentido longitudinal sobre un eje este-oeste, con la pared más alta mirando hacia el norte. Salvo la pared norte, toda la estructura está cubierta por dos capas de película transparente de polietileno, separadas por una cámara de aire; la pared norte está cubierta con madera terciada. El techo mira hacia el sur y está inclinado en un ángulo de 0.9 veces la latitud sobre la horizontal (27°). El espacio para el secado en el horno tiene cabida para unos 3.5 m^3 de tablas de 25 mm. Dentro del horno está instalado un techo falso sobre las estibas de madera. Una pared norte falsa que comprende toda la longitud del horno se extiende del suelo hasta el techo falso y tiene un agujero en su centro para dar cabida al ventilador. Las superficies interiores de las partes estructurales del horno (pies derechos, techo y pared falsos, contrapuestas y suelo de hormigón) están pintados de negro para lograr una máxima absorción de calor. El ventilador funciona con un motor eléctrico reversible de 0.75 kW y se utiliza para la circulación forzada del aire. El uso de contrapuestas y tabiques de separación móviles de madera terciada permite usar el secador en una sola pasada o mediante recirculación (figura 4).

¹⁰ Investigadores principales: S. N. Sharma y Prem Nath, Wood Seasoning Branch, Forest Research Institute, Dehra Dun, U.P. (India).

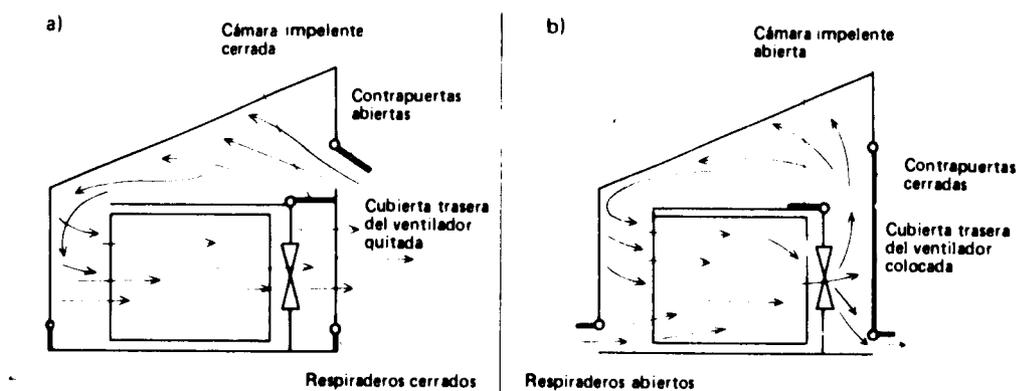


Figura 4. Horno solar para secado de maderas funcionando como a) secador de aire forzado de una sola pasada; b) secador con aire de recirculación con descarga parcial

BIBLIOGRAFIA

- Akyurt, M. y Selcuk, M. K. A solar dryer supplemented with auxiliary heating systems for continuous operation. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 6:4, 1962.
- Akyurt, M., Selcuk, M. K. y Akyurt, S. A continuous solar dryer. Paper prepared for the Conference of the Coopération méditerranéenne pour l'énergie solaire, Atenas, octubre de 1971, 4 p.
- Bevill, V. D. y Brandt, H. A solar energy collector for heating air. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 12:19-29, 1968.
- Buchberg, H., Edwards, D. K. y Lalude, O. Performance characteristics of rectangular honeycomb solar-thermal converters. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 13:95, 1971.
- Buelow, F. H. Drying crops with solar heated air. Conferencia de las Naciones Unidas sobre nuevas fuentes de energía, Roma, 21-31 de agosto de 1961 (*Solar Energy*: II, vol. 5, pág. 267 (S/17)). Número de venta: 63.1.39.
- Close, D. J. Solar air heaters for low and moderate temperature applications. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 7:3, 1963.
- Davis, C. y Lipper, R. I. Solar energy utilization for crop drying. Conferencia de las Naciones Unidas sobre nuevas fuentes de energía, Roma, 21-31 de agosto de 1961. (*Solar Energy*: II, vol. 5, pág. 273 (S/53)). Número de venta: 63.1.39.
- Dried Fruits Processing Committee. Grape drying in Australia. Melbourne, 1973 (CSIRO, ISBN-0-643-00054-4)
- Ghosh, B. N. A new glass roof dryer for cocoa beans and other crops. *Proceedings of the International Congress: The Sun in the Service of Mankind*, París, 2-6 de julio de 1973, pág. 17.
- Green, L. Solar heat for drying shelled corn. *Electricity on the farm magazine* (New York), 47:4:14-15, abril de 1974.
- Gueneau, P. Une expérience de séchage solaire du bois. *Bois et forêts des tropiques* (Nogent sur Marne, France), 131:69-78, 1970.
- Gupta, C. L. Draft for action plan for solar drying. Pondicherry, India, Auroville Centre for Environmental Studies, 1973 (Occasional Paper No. 5).
- Gupta, C. L. y Garg, H. P. Performance studies of solar air heaters. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 11:25, 1967.
- Jordon, R. C. Low temperature applications of solar energy. New York, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 1967.
- Khan, E. U. The utilization of solar energy. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 8:1:17-22, 1964.
- Khanna, M. L. y Singh, N. M. Industrial solar drying. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 11:2, 1967.
- Lalude, O. y Buchberg, H. Design and application of honeycomb porous-bed solar-air heaters. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 13:2, 1971.
- Lawand, T. A. A description of two simple solar agricultural dryers. Coopération méditerranéenne pour l'énergie solaire, diciembre de 1965 (Bulletin No. 9).
- A solar-cabinet dryer. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 10:4:158-164, octubre de 1966.
- Löf, G. O. G. Solar energy for the drying of solids. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 6:4, 1962.
- Lukes, T. Research on the application of solar energy to the food drying industry. San Luis Obispo, Calif., California Polytechnic State University, octubre de 1974 (NSF/RANN/SE/GI 42944/PR/74/3).
- Maldonado, E. D. y Peck, E. C. Drying lumber by solar radiation in Puerto Rico. *Forest products journal* (Madison, Wisc.), octubre de 1962, 487-488.
- McLean, K. Principles of sun drying with special references to a see-saw dryer. Rome, Food and Agricultural Organization, 1972. 40 págs. (Report AGS, SF/GHA7).
- Peterson, W. H. Harness the sun to dry grain. World farming (Kansas City, Mo.), 1968, 36-37.
- Solar heat for drying shelled corn. ASAE transactions (St. Joseph, Mich.), 73:302, 1973.
- Phillips, A. L. A solar energy method for reducing coffee drying costs. *Journal of agriculture* (Universidad de Puerto Rico), 17:4:226-235, octubre de 1963.
- Drying coffee with solar heated air. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 9:4:213-216, 1965.
- Evaluation of a "mylar" plastic film as a surface for a solar heat collector. *Journal of agriculture* (Universidad de Puerto Rico) 49:4:484-486, octubre de 1965.
- Further observations on the use of solar energy for reducing coffee drying costs. *Journal of agriculture* (Universidad de Puerto Rico), 49:2:272, abril de 1965.
- Read, W. R., Choda, A. y Cooper, P. I. A solar timber kiln. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 15:4, 1974.
- Roa, G. Natural drying of cassava. Ph.D. thesis. East Lansing, Michigan State University, Agricultural Engineering Department.
- Roa, G. y Cock, H. J. Natural drying of cassava. Proceedings of the Third Symposium of Tropical Root Crops. Ibadan, Nigeria, diciembre de 1973.
- Satcunanathan, A. S. y colaboradores. A two-pass solar air heater. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 15:1, 1973.
- See-saw sun dryer perfected by ITIPAT. Institute for Tropical Agricultural Products. Ivory Coast. Ministry of Planning. Abidjan, 1966. 20 págs.
- Selcuk, M. K., Ersay, O. y Akyurt, M. Development, theoretical analysis and performance evaluation of shelf type solar dryers. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 2:81-88, 1974.
- Shove, G. Low temperature drying of shelled corn. *Electricity on the farm magazine* (New York), 47:4:16-17, abril de 1974.

- Soloron air heater. Solar Energy Products Co. Avon Lake, Ohio, 1974 (folleto distribuido en la International Solar Energy Society Meeting, 1974).
- Thomas, I. E. y Zilles, M. How to build a solar herb dryer. Community Environmental Council. Santa Barbara, Calif. 10 págs.
- Un nouveau type de séchoir expérimentée en Côte d'Ivoire. Café, cacao, thé (Paris), 13:1-57-64, 1969.
- Whillier, A. Black painted solar air heaters of conventional design. *Solar Energy* (Elmsford, N.Y.), 8:1, 1963-64.
- Wilson, B. W. The role of solar energy in the drying of vine fruit. Conferencia de las Naciones Unidas sobre nuevas fuentes de energía. Roma 21-31 de agosto de 1961 (*Solar Energy*: II, vol. 5, pág. 296 (S/4)). Número de venta: 63.1.39.
- Publicaciones del Brace Research Institute,
Macdonald College de la Universidad McGill,
Ste. Anne de Bellevue, Quebec (Canadá)*
- A survey of solar agricultural dryers. Diciembre de 1975. 151 págs.
- Goldstein, O. Production drawing for solar cabinet dryer. Junio de 1973.
- Lawand, T. A. Description and construction cost analysis of a solar agricultural maize drying system in Barbados. Diciembre de 1966. 65 págs.
- How to make a solar cabinet dryer for agricultural produce. Marzo de 1966. 9 págs.
- Solar driers for farm produce. Progress report. Abril de 1963. 59 págs.
- The drying of maize in a solar cabinet dryer. Enero de 1966. 8 págs.
- The evaluation of solar agricultural dryers for the processing of surplus crops. Proposal No. 3, abril de 1969. 3 págs.
- The operation of a large-scale solar agricultural dryer. Febrero de 1967. 11 págs.
- Nahlawi, N. The drying of yams with solar energy. Julio de 1966. 16 págs.
- Nevot, M. A. Proyecto de un colector solar para desecar cereales. Agosto de 1966. 53 págs.
- Ward, G. T. Suggestions for corn harvesting, drying and storage trials in Barbados. Septiembre de 1965.

Posibilidades de aprovechamiento de la energía solar para cocinar en las zonas en desarrollo

T. A. Lawand

Brace Research Institute, Macdonald College de la Universidad MacGill, Quebec (Canadá)

En las zonas en desarrollo se han venido utilizando varios combustibles tradicionales para cocinar. Figuran entre ellos:

	Valor calorífico aproximado	
	(MJ/kg)	(Mcal/kg)
Estiércol animal seco	9	22
Leña	20	48
Carbón vegetal	33	80
Coque	30	72
Queroseno, petróleo	42	10

Cada uno de los combustibles tiene un grado diverso de eficiencia para la cocción. Se ha calculado en la India que la eficacia del estiércol animal seco como combustible para cocinar es muy baja, alrededor de 1,4 MJ/kg (0,34 Mcal/kg). No todos los combustibles son tan ineficientes. En el Senegal, por ejemplo, se ha calculado que un kilogramo de gas butano tiene el mismo efecto calorífico que 24 kg de carbón de leña.

Hay otro factor que se debe tener en cuenta. El método tradicional de preparar la comida, que consiste en hervirla en una gran olla sobre fuego abierto, un fogón de gas o una plancha calentada eléctricamente es, de por sí, muy ineficiente.

Dado su alto contenido de agua, la mayor parte de los alimentos tienen un elevado calor específico, cercano al del agua ($4 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Cuanto más alta es la tasa de calentamiento, tanto más rápidamente se calentará el alimento hasta llegar a la temperatura de cocción (ebullición). Después, salvo cuando la evaporación del agua sea esencial para el proceso de cocción, como al hornear el pan, la velocidad de la cocción es prácticamente independiente de la tasa de calentamiento en la medida que la temperatura se mantenga a una tasa de calentamiento igual a la tasa de pérdida térmica. Así pues, las diferencias en los tiempos requeridos para la cocción de iguales cantidades de alimento sobre cocinas con diferentes capacidades de calentamiento se deben principalmente a las diferentes longitudes de los períodos de calentamiento.

La mayor de las pérdidas térmicas en la cocción consiste por lo común en el calor consumido por la evaporación del agua presente en el alimento o añadida para cocer, casi 2,5 MJ/kg. Le siguen en importancia las pérdidas por convección de los utensilios y las paredes del horno. Estas pérdidas pueden limitarse utilizando tapaderas sobre los utensilios, y aislamientos sobre las paredes del horno. Si se calcula una pérdida por convección (a la intemperie), a la temperatura de ebullición del agua, de unos 6,8 MJ por metro cuadrado de utensilio, y una superficie de 0,1 m² por kg de contenido de la vasija, el insumo de energía por una hora de hervir la comida, si se evapora la cuarta parte del agua presente, se distribuiría aproximadamente como sigue:

	Porcentaje
Calentamiento del alimento hasta la temperatura de ebullición	20
Pérdidas por convección del recipiente	45
Evaporación del agua	35

Aunque la variación en las condiciones supuestas modificaría sustancialmente esa distribución, las cifras seguirían mostrando que la mayor parte del calor suministrado en la cocción prolongada se disipa.

Toda la cuestión de la transferencia de energía de la fuente de calor a la vasija de cocina debe reexaminarse a fin de mejorar la eficiencia de esta operación. Hasta que se produce la ebullición, el coeficiente de transferencia de calor a la vasija es bajo porque el líquido es relativamente inmóvil. La comida muchas veces se quema, de ahí la necesidad de revolverla no sólo para aumentar la transferencia de calor sino para evitar su concentración localizada. El mecanismo de la transferencia de calor a la vasija de cocción, inclusive la forma de ésta, tiene efectos importantes sobre el diseño de enseres solares para cocinar. Al desarrollar tecnologías para la cocción con energía solar, no deben repetirse las ineficiencias clásicas que se encuentran en los sistemas existentes, especialmente en los países en desarrollo, donde la cocción de alimentos puede representar hasta un 80% de toda la energía utilizada.

Se necesitan cocinas solares de capacidad y tamaño semejantes a los sistemas clásicos de cocinar. La tasa de suministro de energía en los sistemas convencionales es bastante elevada, a pesar de su ineficiencia. Cuando se cocina con electricidad o a gas, el quemador normal proporciona energía a razón de 1 kW y puede hacer hervir dos litros de agua en aproximadamente 10 minutos. Los hornos automáticos para asar u hornear pueden tener una capacidad instalada de aproximadamente el doble. Por lo tanto, una cocina solar deberá tener una tasa de suministro de energía de aproximadamente 1 kW para que pueda compararse con los sistemas existentes. La otra salida sería aceptar períodos de cocción más prolongados y posiblemente de menores cantidades de alimento cada vez. Se necesitaría una superficie de colector solar de unos 2 m² (con una eficiencia de colección del 50%) para producir ritmos de cocción normales comparables.

Hasta la fecha se han desarrollado varios tipos básicos de cocinas solares. Un breve examen de la bibliografía pondrá de manifiesto hasta qué grado los investigadores de las zonas en desarrollo se han consagrado a este tema. En los países desarrollados, fuera de los grupos interesados en sistemas tecnológicos apropiados, se ha dedicado la mayor atención a pequeñas unidades de producción para uso de excursionistas y viajeros de fin de semana. Estas unidades, bien sean reflectores plegables en forma de sombrilla o cajas calientes, están diseñadas para que sean portátiles y ocupen poco espacio.

Existen tres tipos de colectores solares:

a) La caja caliente solar, es una cocina solar aislada con doble encristalado, generalmente en forma de caja que se pone al sol y se orienta manualmente (figura 1). Para aumentar la eficiencia, se añaden a menudo reflectores que permiten obtener temperaturas más elevadas en el interior de la cámara de cocción. Uno de los inconvenientes intrínsecos de este tipo de cocinas es que la cocción debe hacerse al

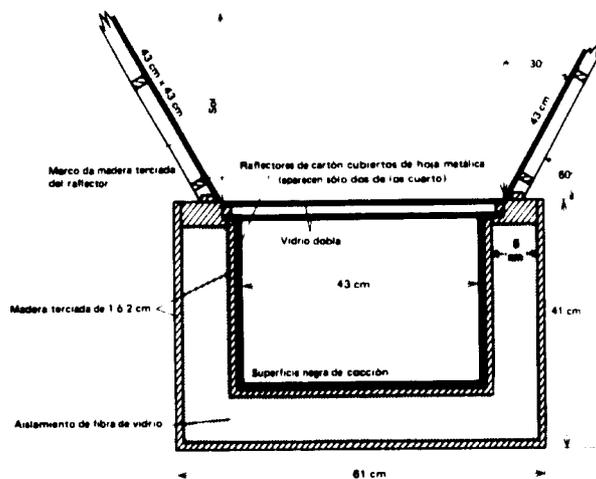


Figura 1. Caja caliente solar utilizada como cocina económica

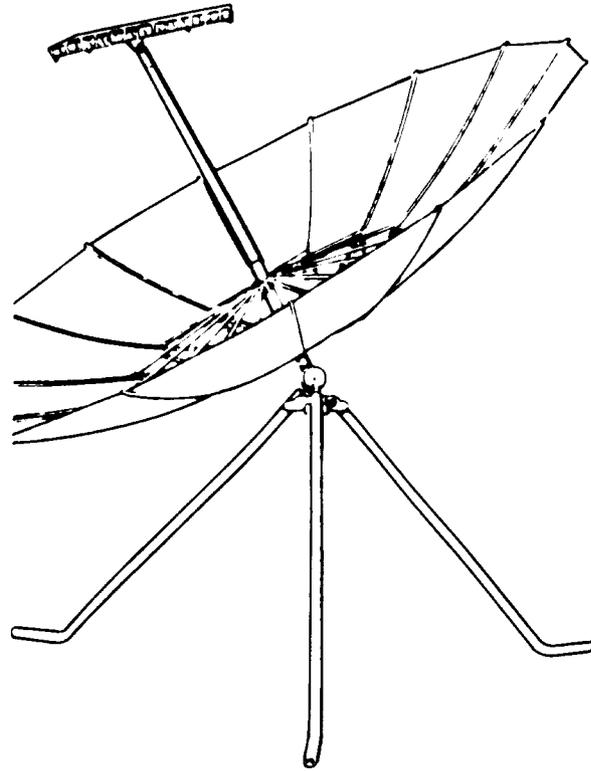


Figura 2. Cocina solar con reflector parabólico adaptable, tipo sombrilla

aire libre, característica que muchas veces es socialmente inaceptable, particularmente durante los períodos de tiempo más calurosos;

b) Cocina solar con reflector parabólico que concentra los rayos para la cocción en un punto focal o zona sobre la que se coloca una olla o una sartén (figura 2). También este proceso exige que se cocine a la intemperie. Existe una pérdida de calor aún mayor que en las cocinas de caja caliente, debido a la convección del viento. Los reflectores pueden concentrar con eficacia sólo la radiación directa, con el resultado de que estas unidades son menos eficientes en las zonas donde hay porcentajes elevados de radiación difusa;

c) Unidad con colección solar separada y cámara de cocción. En estas unidades el fluido de transferencia de calor, ya sea agua convertida en vapor o aceite para la transferencia de calor, se calienta en un colector separado, del tipo de placa plana, como ocurre con la cocina solar de vapor, o del tipo concentrante, como en algunos de los calentadores de aceite. El fluido calentado se traslada a una cámara de cocción separada y aislada que puede estar ubicada en el interior de la casa donde se cocina. De esta manera se puede reducir la incomodidad social de cocinar a la intemperie (figura 3).

Estos sistemas no han sido hasta el momento muy ensayados sobre el terreno. Muchas veces el factor técnico limitante es la transferencia de calor a

COSTOS COMPARATIVOS DE COCINAR CON DIVERSAS FUENTES DE ENERGIA EN EL SENEGAL

	Butano (depósitos recargables con quemadores de gas)	Electricidad (zonas urbanas)	Carbón vegetal (zonas urbanas)	Carbón vegetal (zona rural)	Radiación solar (cocina solar con quemador de butano auxiliar)	
					Modelo 1	Modelo 2
Inversión de capital (dólares)	19	15	10	10	150	200
Vida estimada del equipo (años)	15	15	15	15	15	15
Partida anual por recuperación de capital ^a (dólares)	2,64	2,09	1,39	1,39	20,86	27,81
Precio del combustible (dólares/kg)	0,44	0,32 ^b	0,10	0,06	0,44	0,44
Consumo anual estimado de combustible (kg)	220	2 700 ^c	1 750	1 750	44	44
Costo anual total del combustible (dólares)	97,80	865	175	105	19,40	19,40
Costo de mantenimiento anual (dólares)	1,90				22,88	30,28
Costo total anual (dólares)	101	867	176	106	66	81
Costo total anual si se duplica el precio del combustible (dólares)	198	1 732	351	211	85	100
Costo total anual si se triplica el precio del combustible (dólares)	295	2 597	526	316	105	119

Nota: Todos los costos han sido reducidos al equivalente de su costo anual.

^aSuponiendo un 11% de interés.

^bEn dólares por kilovatio hora.

^cEn kilovatios hora.

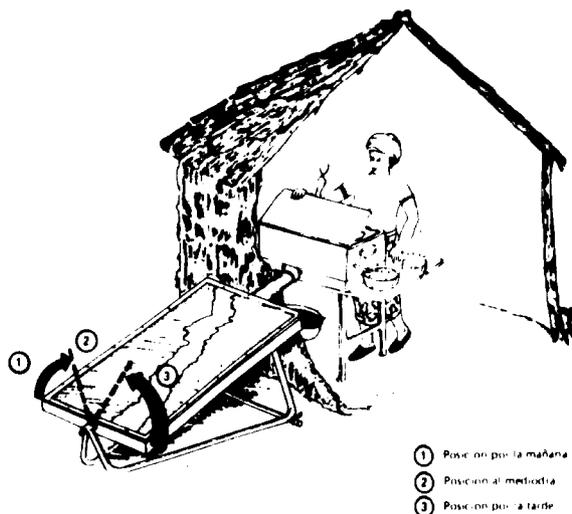


Figura 3. Cocina solar de vapor

la vasija de cocina, aunque este factor es menos importante en la cocción mediante reflector, debido a las temperaturas más elevadas que se producen.

Todavía no se ha hecho un estudio completo de la tecnología de la cocción solar. Sería útil comparar toda la información existente sobre las necesidades en esa materia, las energías disponibles y problemas de tipo semejante, de manera que fuera posible determinar qué papel puede desempeñar la cocción solar en la satisfacción de las necesidades energéticas de sociedades con escasez de combustibles. Se han desarrollado tantas técnicas, que es preciso compendiarlas para que puedan ayudar a las sociedades de las zonas en desarrollo, o bien a utilizar estas tecnologías, o a modificarlas y adaptarlas a las situaciones existentes.

Programas tales como la conversión de biogás, que se prosiguen activamente en países tales como la India, deben acompañarse de una inversión en la tecnología de la cocción solar, ya que el biogás generado tiene un potencial demasiado alto para desperdiciarlo en cocinar. Sería mejor dedicarlo a generar energía mecánica para árboles de transmisión o electricidad, como se ha demostrado en la India. Actualmente debe usarse para cocinar, ya que son pocas las posibilidades que se presentan.

Finalmente, por lo que hace a los aspectos económicos, en el Senegal se ha demostrado que la cocción solar con un fogón de leña sin humo, como apoyo (para el 10% ó 15% del tiempo cuando las condiciones climáticas no permiten utilizar la energía solar), es mucho menos costosa que la utilización de gas butano o carbón vegetal. En el cuadro anterior se da un ejemplo relativo al Senegal, utilizando dos modelos de cocina solar con un quemador auxiliar de butano. De él se desprende que la inversión de capital que se haga en estas unidades será beneficiosa a largo plazo para los usuarios.

BIBLIOGRAFIA

- Abou-Hussein, M. Temperature-decay curves in the box-type solar cooker. Conferencia de las Naciones Unidas sobre nuevas fuentes de energía, Roma 21-31 de agosto de 1961 (*Solar Energy*: II, vol. 5, pág. 335 (S/75)). Número de venta: 63.1.39.
- Alward, R., Lawand, T. A. y Hopley, P. Description of a large scale solar steam cooker in Haiti. *Proceedings of the International Congress: The Sun in the Service of Mankind*, París, 2-6 de julio de 1973. Pág. 10.

- _____ Une cuisinière solaire en Haïti. *Architecture concept* (Montreal), 28:312:2, marzo de 1973.
- Aprovechamiento de la energía solar en el altiplano peruano. *Agronomía* (Monterrey, N. L., México), 30:4, 1963.
- Beason, R. G. Solar cooking turns practical. *Mechanix illustrated* (New York), julio de 1976.
- Duffie, J. A. *Reflective solar cooker designs*. University of Wisconsin, Engineering Experiment Station. Pág. 9.
- Duffie, J. A., Löf, G. O. G. y Beck, B. Laboratory and field studies of plastic reflector solar cookers. *Solar Energy* (Elmsford, N. Y.), 6:94-98, julio de 1962.
- Duffie, J. A., Lappala, R. P. y Löf, G. O. G. *Plastics for focusing collectors*. University of Wisconsin, Engineering Experiment Station. Págs. 9-13. (Reprint 327)
- _____ Plastics in solar stoves. *Modern plastics* (New York), noviembre de 1957.
- Food and Agricultural Organization, Nutrition Division. Report on tests conducted using the Telkes solar oven and the Wisconsin solar stove over the period July to September 1959. Conferencia de las Naciones Unidas sobre nuevas fuentes de energía, Roma, 21-31 de agosto de 1961 (*Solar Energy*: II, vol. 5, pág. 353 (S/116)). Número de venta: 63.1.39.
- Ghai, M. L. Design of reflector-type direct solar cookers. *Journal of scientific and industrial research* (Nueva Delhi), 12A:4:165-175, 1953.
- _____ Solar heat for cooking. *Journal of scientific and industrial research* (Nueva Delhi), 12A:3:117-124, 1953.
- _____ y colaboradores. Performance of reflector-type direct solar cookers. *Journal of scientific and industrial research* (Nueva Delhi), 12A:12:540-551, 1953.
- _____ y Phandher, B. S. Manufacture of reflector-type direct solar cooker. *Journal of scientific and industrial research* (Nueva Delhi), 13A:5:212-216, 1954.
- Ghosh, M. K. Sun cookers for villages. Paper presented for the All India Solar Energy Working Group and Conference, Indian Institute of Technology, Madrás, noviembre de 1973.
- Gupta, J. P. Studies on solar hot box. Paper prepared for the All India Solar Energy Working Group and Conference, Indian Institute of Technology, Madrás, noviembre de 1973.
- Jenness, J. R. Recommendations and suggested techniques for the manufacture of inexpensive solar cookers. *Solar Energy* (Elmsford, N. Y.), 4:3, julio de 1960.
- Khan, E. U. The utilization of solar energy. *Solar Energy* (Elmsford, N. Y.), 8:1, 1964.
- Khanna, M. L. Solar heating of vegetable oil. *Solar Energy* (Elmsford, N. Y.), 6:2, 1962.
- Löf, G. O. G. Recent investigations in the use of solar energy for cooking. *Solar Energy* (Elmsford, N. Y.), 7:3, 1963.
- _____ Use of solar energy for heating purposes: solar cooking. Conferencia de las Naciones Unidas sobre nuevas fuentes de energía, Roma, 21-31 de agosto de 1961 (*Solar Energy*: II, vol. 5, pág. 304 (GR/16/(S))). Número de venta: 63.1.39.
- Löf, G. O. G. y Fester, D. A. Design and performance of folding umbrella-type solar cooker. Conferencia de las Naciones Unidas sobre nuevas fuentes de energía, Roma, 21-31 de agosto de 1961 (*Solar Energy*: II, vol. 5, pág. 347 (S/100)). Número de venta: 63.1.39.
- Neubauer, L. y Williams, G. Solar oven economy for farm homes. Paper presented to the annual meeting of the American Society of Agricultural Engineers, University of Nebraska, Lincoln, 1976, 12 págs. (76-4021).
- Salgado, P. A cylindro-parabolic solar cooker. Conferencia de las Naciones Unidas sobre nuevas fuentes de energía, Roma, 21-31 de agosto de 1961 (*Solar Energy*: II, vol. 5, pág. 370 (S/110)). Número de venta: 63.1.39.
- Sakr, I. A. Elliptical paraboloid solar cooker. Paper prepared for the international Congress: The Sun in the Service of Mankind, Paris, 2-6 de julio de 1973.
- Solar cooker construction manual. Vita Union College Campus, Schenectady, N. Y., junio de 1967.
- Solar cooking turns practical. University of Florida. *Mechanix illustrated* (New York), julio de 1976.
- Stam, H. Cheap but practical solar kitchens. Conferencia de las Naciones Unidas sobre nuevas fuentes de energía, Roma, 21-31 de agosto de 1961 (*Solar Energy*: II, vol. 5, pág. 38 (S/24)). Número de venta: 63.1.39.
- Swet, C. J. A universal solar kitchen. Baltimore, Johns Hopkins University, Applied Physics Laboratory, julio de 1972, pág. 23.
- Tabor, H. Solar cooker for developing countries. Paper prepared at the annual meeting of the Solar Energy Society, Boston, Mass., marzo de 1966.
- Telkes, M. *The solar cooking oven*. New York University, College of Engineering, Research Division, enero de 1958.
- _____ y Andrassy, S. Practical solar cooking ovens. Conferencia de las Naciones Unidas sobre nuevas fuentes de energía, Roma, 21-31 de agosto de 1961. *Solar Energy*: II, vol. 5, pág. 394 (S/101)). Número de venta: 63.1.39.
- Whillier, A. A stove for boiling foods using solar energy. *Sun at work*. 10:1:9-12, enero de 1965.
- Publicaciones del Brace Research Institute,
Macdonald College de la Universidad McGill,
Ste. Anne de Bellevue, Quebec (Canadá).**
- Alward, R. y Goldstein, O. Assembly drawings for the construction of solar steam cookers: 3 drawings, febrero de 1972.

- A study of the feasibility of establishing a rural energy centre for demonstration purposes in Senegal, agosto de 1976. 380 págs.
- Cheng, K., Wong, H. y Tanaka, O. Experimental study of a solar steam cooker. Project for the Department of Mechanical Engineering. Course No. 305-463A-464B, mayo de 1973, 47 págs.
- Greenwood, C. Effect of heat input from solar cookers on the ascorbic acid content of peas. Final year project for the Department of Food Science. Course No. 344-490D, marzo de 1974. 56 págs.
- Pons, M. F. y Ward, G. T. La cocina solar construida en Chucuito, Puno, Perú, diciembre de 1963. 22 págs.
- Sinson, D. A. Design and performance evaluation of a 6 ft x 4 ft parabolic solar steam generator and its application to pressure cooking, abril de 1964. 67 págs.
- Vickery, S. The effect of the sunbroiler on the ascorbic acid content of sweet peas. Final year project for the Department of Food Science. Course No. 377-490D, marzo de 1974, 57 págs.
- Whillier, A. A stove for boiling of foods using solar energy, abril de 1964. 13 págs.
- _____ How to make a solar steam cooker. Rev., febrero de 1973. 2 págs.
- _____ Preliminary report on solar stove for cooking by boiling, septiembre de 1963. 10 págs.

Evaluación de modalidades de aprovechamiento de la energía solar desde el punto de vista de la transferencia de tecnología

Jyoti K. Parikh

Instituto Internacional de Análisis Aplicado de Sistemas (IIASA), Laxenburg, Austria

Introducción

Como la intensidad de la radiación solar es baja, se precisa una cantidad considerable de terreno para aprovechar su energía. Por lo tanto, el medio rural, en el que se dispone de mucho terreno, es más adecuado para el uso de la misma que las zonas urbanas. En muchos países en desarrollo los sistemas tradicionales centralizados de energía todavía no han llegado a las grandes masas de población rural. Las aplicaciones de la tecnología solar que contribuyan al desarrollo de un sistema energético descentralizado pueden conducir a considerables mejoras de la productividad económica de las zonas rurales.

Según estimaciones de las Naciones Unidas¹, en

¹ Naciones Unidas, Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, "Selected world demographic indicators", 1975 (ESA/P/WP.55).

1970 la población rural de todo el mundo ascendía a 2.260 millones de personas, de las que 1.890 millones vivían en países en desarrollo. Se prevé que el porcentaje de la población que vive en zonas rurales de países en desarrollo disminuirá desde el 75% en 1970 al 59% en el año 2000. Sin embargo, su número absoluto será de unos 2.920 millones, lo cual representa un considerable aumento respecto de la cifra actual. En la figura 1 se indican las tendencias regionales de crecimiento de la población rural, según las proyecciones efectuadas por las Naciones Unidas².

Actualmente las necesidades energéticas de la población rural, que por lo demás son sumamente bajas, se satisfacen en su mayor parte mediante recursos no comerciales disponibles localmente, como leña, desechos agrícolas y estiércol. No obstante, los

² *Ibid.*

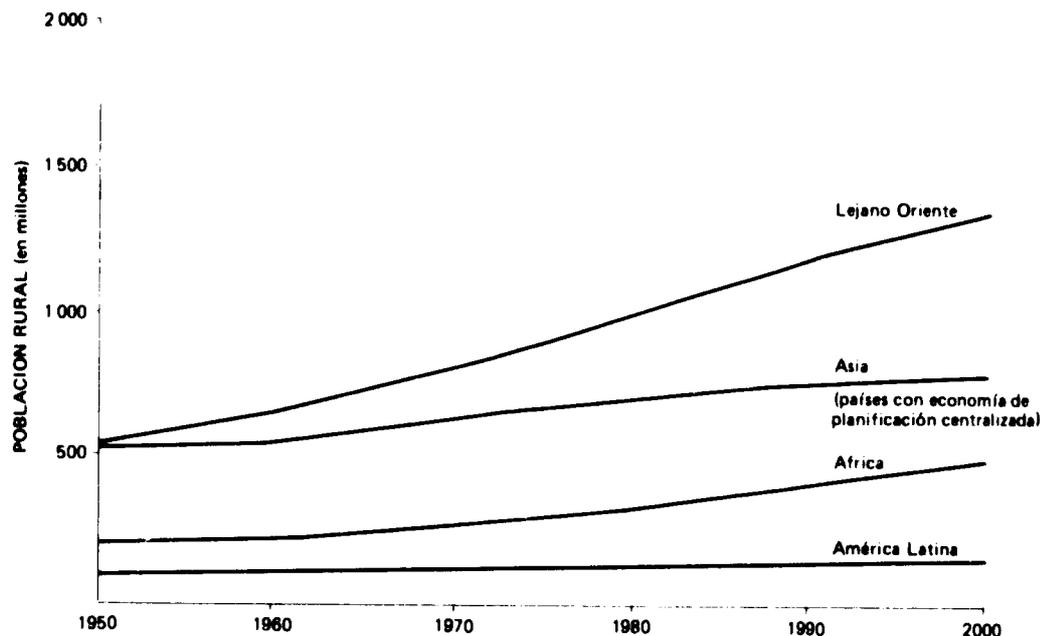


Figura 1. Población rural, en el pasado y proyectada al futuro, de regiones en desarrollo

planificadores gubernamentales de programas energéticos de la mayor parte de los países en desarrollo se ocupan principalmente de desarrollar grandes sistemas, adecuados para fines urbanos e industriales. Aunque en la mayoría de esos países se están desplegando esfuerzos por extender la electrificación rural, ésta progresa lentamente por tener un alto coeficiente de capital, sobre todo cuando se trata de conectar a la red aldeas lejanas. Se verá, pues, que es necesario poner a punto sistemas energéticos descentralizados para zonas rurales.

Los hombres de ciencia y los tecnólogos encuentran a veces soluciones aplicables a estos sistemas energéticos descentralizados. Cuando no se hace uso de ellas, suelen quejarse de las dificultades que entraña la transferencia de tecnología, de la resistencia que ofrecen los intereses creados, etc. Es cierto que no se debe restar importancia a esos obstáculos, pero muchas veces ocurre que lo que estas personas afirman de la pertinencia de su labor de investigación y desarrollo no es cierto cuando se llega a las aplicaciones prácticas, en las condiciones del terreno, una vez tenidos en cuenta todos los factores. Por consiguiente, es imprescindible evaluar con cuidado las dificultades de la transferencia de tecnología.

En el presente trabajo consideramos en primer lugar los factores que revisten importancia al evaluar tecnología. Luego se evalúan algunas tecnologías solares teniendo presentes dichos factores. Como por el momento las células fotovoltaicas son muy caras, para este análisis sólo hemos considerado máquinas térmicas descentralizadas de baja potencia. Como estudio de un caso concreto se evalúa en detalle de manera particular el bombeo solar.

Las expresiones algebraicas que aquí se introducen pueden utilizarse con respecto a cualquier país; los resultados numéricos se refieren al caso concreto de la India.

Factores que intervienen en la transferencia de tecnología

En el presente trabajo "transferencia de tecnología" significa la transferencia de un invento desde el laboratorio al terreno para su uso práctico. Hay que reconocer que los usuarios no pueden hacer funcionar un sistema energético experimental. Debe concederse la importancia debida al perfeccionamiento del invento y al desarrollo de las instituciones necesarias, por ejemplo establecimientos que se ocupen de los problemas del usuario. El punto de vista de este último puede clasificarse en dos categorías: tecnológica y social, refiriéndose la última al medio ambiente operacional en el que ha de emplearse la tecnología. En general, es preciso considerar los siguientes aspectos.

Beneficios particulares y sociales

Los beneficios, ahorros, etc., suelen calcularse a nivel nacional, estatal o de aldea y no a nivel del consumidor que va a utilizar la tecnología. Si bien los beneficios a nivel nacional, como el ahorro de divisas, una menor degradación del medio ambiente, efectos sanitarios generales, etc., son importantes, solamente tienen sentido si la nueva tecnología le resulta aceptable al usuario. Si éste no recibe ningún beneficio cuando un invento ha de ser promovido con fines nacionales o sociales, hay que darle alguna compensación para inducirle a utilizarlo. Esto quiere decir que se ha de implantar una política nacional en materia de subsidios, facilidades de financiación, desgravaciones fiscales, etc., a fin de promover una tecnología mejor.

Así pues, se debe hacer el análisis de costos-beneficios desde el punto de vista del usuario al mismo tiempo que desde el punto de vista social. Se identifican las pérdidas, si las hubiere, en que incurrirá el usuario y la medida en que la sociedad puede subvencionarle en vista de los costos indirectos que tendría que soportar si no se promoviera la nueva tecnología.

Comparación con otras opciones

Los beneficios económicos para el usuario se deben calcular teniendo presente las mejores opciones de que dispone. Por ejemplo, si se calculan las ventajas de las plantas de biogás comparándolas con plantas de petróleo o incluso de carbón, se obtendrá un resultado muy favorable a las primeras. En realidad debe tomarse como término de comparación la opción más barata posible, es decir, quemar estiércol y comprar abonos, si es necesario. Por supuesto deben ponderarse cuidadosamente los aspectos positivos y negativos de ambas opciones. Sólo cuando se ha hecho esto se comprende por qué hay ciertas innovaciones que no llegan a aceptarse. Además, también se debe considerar la posible evolución futura de las opciones existentes.

Escala de tecnología

Algunas tecnologías pueden resultar inadecuadas desde el punto de vista económico y administrativo si no se elige la escala correcta. Por ejemplo, hay situaciones en las que muchas bombas solares pequeñas pueden resultar más caras que una estación de bombeo grande. En cambio, pueden ser preferibles las bombas pequeñas cuando se consideran los problemas de gestión inherentes a las distintas escalas. Volviendo de nuevo a un ejemplo de tecnología de

biogás, un análisis realizado hace algún tiempo³ demuestra que una planta comunal de biogás puede resultar más económica y más conveniente desde los puntos de vista social y económico que plantas familiares del mismo tipo.

Introducción de la tecnología

La manera en que se introduce una tecnología determina el éxito de la misma. Por ejemplo, puede tropezarse con la resistencia de grupos que se benefician menos de ella o que resulten perjudicados. Además, ya en la etapa de planificación es necesario ocuparse de los problemas de cooperación, mantenimiento y reparaciones.

Compatibilidad con el medio ambiente

Si un invento requiere una modificación del modo de vida tradicional o supone un conflicto con el entorno, su adopción tropezará con dificultades. En tal caso, deben evaluarse cuidadosamente las posibilidades de la tecnología más antigua ya afianzada, y debe considerarse si la sociedad está ya preparada para el cambio.

Aceptación de la tecnología

Todo invento ha de ser adecuado para el tipo de utilización a que se lo destina. Por ejemplo, según se

³J. K. Parikh y K. S. Parikh, "The potencial of bio-gas plants and how to realize it", *Proceedings of UNITAR Symposium on Microbiol Energy Conversion*, Göttingen, República Federal de Alemania, 1976.

ilustrará más adelante en el presente trabajo, cuando se diseña una bomba solar para usos agrícolas es necesario estudiar cómo se utilizan las bombas en ese momento.

Por lo tanto, es menester que los gobiernos con recursos limitados evalúen cuidadosamente nuevas tecnologías a fin de que sólo se estimulen las ideas verdaderamente aprovechables. El desarrollo técnico de inventos inadecuados puede suponer un derroche de personal científico muy valioso y de fondos para la investigación muy limitados, y también traducirse en una pérdida de confianza en las nuevas tecnologías en general. Pese a ser muy razonables, han fracasado muchas tecnologías nuevas por haberse descuidado sencillas consideraciones de orden práctico. Por lo tanto, se intentará analizar las dificultades de la transferencia de tecnología en lo referente a una de las aplicaciones de la energía solar dentro del contexto de los criterios hasta ahora mencionados. Aunque el marco general del análisis se pueda aplicar a cualquier país, se expone en el presente trabajo el estudio de un caso concreto en la India.

Bombas solares

El uso de bombas solares para el riego podría ser una modalidad importante de aprovechamiento de la energía solar en los países en desarrollo, en los que del 40% al 50% del PNB se origina en el sector agrícola, para el cual se precisa de agua como insumo imprescindible. En el cuadro 1 se dan datos sobre unidades de bombeo motorizadas y su consumo de energía eléctrica en la India. Alrededor del 9% del consumo total de electricidad de la India corresponde

CUADRO 1. UNIDADES DE BOMBEO Y CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA INDIA
Tendencias pasadas y proyectadas

Año o fecha	Número de unidades en funcionamiento	De las unidades de bombeo (10 ⁹ kWh)	Consumo		
			Total (10 ⁹ kWh)	Por unidad de bombeo (kWh)	Por unidad de carga conectada (kWh por kW)
1966/67	649 182	2,107	33,26	3 245	842
1967/68	847 357	2,585	36,76	3 050	814
1968/69	1 088 774	3,466	41,46	3 183	834
1969/70	1 342 006	3,770	45,02	2 809	738
1970/71	1 642 006	4,110	48,65	2 503	657
31 marzo 1974	2 444 599				
31 marzo 1979	4 022 790 ^a				
Proyecciones ^b					
1983	6,5 × 10 ⁶				
1990	12,0 × 10 ⁶				
2000	20,0 × 10 ⁶				

Fuentes: Ministerio de Riego y Energía de la India, *Ninth Annual Power Committee Report*, Nueva Delhi, 1972; K. S. Parikh, *Second India Studies: Energy* (Nueva Dethi, MacMillan Press, 1976), pág. 55.

^aCifra objetivo.

^bTeniendo en cuenta el crecimiento demográfico y la necesidad de una mayor producción de alimentos compatible con las posibilidades que ofrecen las capas freáticas.

CUADRO 2. ELECTRIFICACION DE ALDEAS EN LA INDIA, 1961-1973

Población de la aldea (censo de 1961)	Número de aldeas	Número de aldeas electrificadas al 31 de marzo				
		1961	1966	1971	1972	1973
< 499	351 653	3 986	10 265	31 518	39 730	46 665
500-999	119 086	4 306	9 787	26 436	32 602	37 880
1 000-1 999	65 377	5 918	11 567	25 715	27 971	31 586
2 000-4 999	26 565	5 458	9 441	17 036	18 326	19 922
5 000-9 999	3 421	1 319	1 963	2 674	2 753	2 913
> 10 000	776	560	647	702	712	729
Total	566 878	21 547	43 670	104 081	122 094	139 695

Fuente: Central Electric Authority, Nueva Delhi, 1974.

al bombeo, a pesar de que en 1967 apenas un 20% de las aldeas estaban electrificadas, según se indica en el cuadro 2. El número de bombas que se precisarán en los dos o tres decenios próximos puede ascender a más de 10 millones. El cuadro 2 también pone de manifiesto que el ritmo de electrificación de las aldeas pequeñas, de unos 500 habitantes, es mucho más lento que el de las grandes ciudades. En vista de la lenta electrificación de las zonas rurales, la importancia del sector agrícola y las elevadas necesidades proyectadas de bombeo, las bombas solares podrían desempeñar un papel sumamente útil.

Consideraciones tecnoeconómicas

Para que las bombas solares resulten aceptables han de bombear cantidades adecuadas de agua y ser, o más baratas que las otras opciones existentes, o lo bastante convenientes para que los agricultores estén dispuestos a pagar un precio más alto.

A continuación se desarrolla un marco general para hacer una comparación tecnoeconómica entre dos opciones cualesquiera. En los cálculos se utilizan los siguientes símbolos:

Costo de capital	K
Tasa de actualización	d
Costo actualizado	C
Vida útil de la bomba	l
Número de bombas necesarias para un período T de servicio	n
Costo anual de mantenimiento	m
Precio del combustible	p
Distancia	s
Tiempo	t
Consumo anual de combustible	q
Costo anual de funcionamiento (= $m + pq$)	O
Rendimiento	η
Tiempo de funcionamiento (horas al día)	h
Capacidad instalada	c
Superficie de los colectores	A
Radiación solar diaria media por unidad de superficie	S
Trabajo realizado	W

Cuando sea necesario se añadirán a los símbolos los subíndices s , e y d para hacer referencia concreta a bombas solares, eléctricas y diesel, respectivamente.

Son muchas las maneras posibles de calcular los costos, y algunas de ellas se ilustran más adelante. Si se dispone de electricidad, la bomba solar tendrá que competir con bombas accionadas por motores eléctricos; de lo contrario, sus competidoras serán las bombas accionadas por motores diesel.

Costo anual medio por unidad de capacidad instalada

Se supone que el costo anual de los préstamos concedidos para financiar la instalación será igual a la mitad de la tasa de interés d (actualización) más los costos de funcionamiento. Si se pasa por alto la inflación pero se tiene en cuenta la depreciación, se obtiene la ecuación siguiente:

$$K_s \left(\frac{d}{2} + \frac{1}{l_s} \right) + m_s = K_d \left(\frac{d}{2} + \frac{1}{l_d} \right) + q_d p_d(s, t) + m_d \quad (1)$$

Takla⁴ ha llegado a una expresión semejante. Sin embargo, en ella no se consideran las diferentes disponibilidades nocturnas de las dos opciones que se comparan. Antes de abordar este problema se dará una fórmula exacta para el costo actualizado, en lugar de la forma aproximada (1).

Costo actualizado para un período de servicio determinado

El costo actualizado de instalar capacidad en el período inicial sería el siguiente para cualquiera de las opciones:

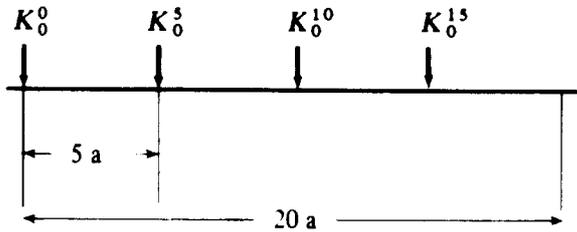
$$C = K + \sum_{i=1}^l \frac{O^i}{(1+d)^i} \quad (2)$$

Para comparar las bombas solares y las bombas diesel, ambas deben prestar servicios durante el mismo período T , ya que las vidas útiles de las distintas opciones pueden ser diferentes. Se elige el período T de manera que

$$n_s l_s = n_d l_d = T \quad (3)$$

⁴ Véase el artículo de Assad Takla, pág. 7.

Así pues, si las vidas útiles de las bombas solares y diesel son 20 años y 5 años, respectivamente, se necesitarán cuatro bombas diesel para obtener el mismo servicio que preste una solar, habiéndose de hacer una nueva inversión cada cinco años que tendría que actualizarse respecto del periodo inicial:



Como fórmula general para actualizar una inversión cada l años durante el periodo $T = nl$ puede utilizarse

$$C = \sum_{j=1}^{T/l} \left(K + \sum_{i=1}^j \frac{O_i}{(1+d)^i} \right) \frac{1}{(1+d)^{(j-1)l}} \quad (4)$$

Por otra parte, sin capacidad de almacenamiento, la bomba solar no puede funcionar cada día durante tanto tiempo como la bomba diesel. Al utilizar la fórmula se ha de tener presente el trabajo que realizaría cada una de las bombas en un día. Se consideran los dos casos siguientes.

Velocidad lenta de bombeo. En algunas zonas el agua de las capas freáticas puede tardar en reponerse, por lo cual puede existir un límite efectivo a la velocidad a que se pueda bombear agua. En este caso tenemos que comparar dos bombas de la misma capacidad. Como la bomba solar solamente puede funcionar unas seis horas al día, y la bomba diesel unas 18 ó 20 horas, es evidente que no pueden compararse estas bombas entre sí. En realidad, si la bomba solar no dispone de suficiente almacenamiento no se la puede considerar como opción viable en este caso.

Comparación de trabajo equivalente. Una bomba solar funciona con un rendimiento medio de η_s durante h_s horas equivalentes a plena capacidad (figura 2) donde se dispone de una radiación solar diaria media S por unidad de superficie de colector.

La superficie de colector necesaria para la capacidad instalada c_s es A . El trabajo realizado diariamente es

$$W_s = \eta S A \quad (5)$$

Por otra parte, la bomba diesel puede funcionar durante mucho más tiempo, por ejemplo h_d horas. Esto puede suponer un mayor consumo de combustible pero también un mejor aprovechamiento de la capacidad instalada, a la que se designa por c_d . El trabajo realizado cada día en este caso es

$$W_d = h_d c_d \quad (6)$$

Si se estipula que

$$W_s = W_d \quad (7)$$

tenemos

$$\eta_s S A = h_s c_s = h_d c_d \quad (8)$$

En este caso $\eta_s = \eta_c \eta_p$, siendo η_c y η_p los rendimientos respectivos de colector y de la bomba. La ecuación (8) permite determinar el valor de c_s para un trabajo equivalente y la superficie de colector necesaria

Comparación numérica entre opciones

Una vez expuesto el marco general para una comparación tecnoeconómica, se compararán las opciones de que dispone el usuario. Al hacerlo se deben considerar diversos elementos de incertidumbre, como posibles mejoras del rendimiento, costo de las bombas solares, rápido aumento de los precios del combustible diesel, etc.

Diseño actual y perfeccionamientos técnicos viables

No se considerarán las bombas de baja temperatura que funcionan solamente en base a gradientes térmicos porque la tecnología todavía no

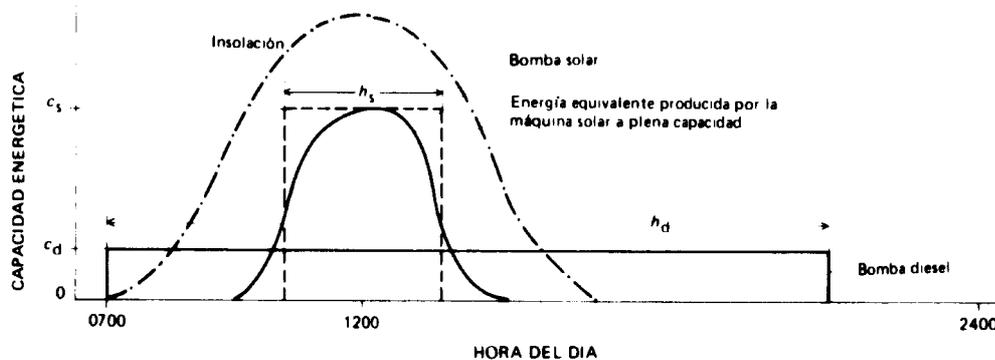


Figura 2. Variación diaria de la insulación y de la energía producida por bombas solares y diesel

está lo bastante avanzada para dar la producción necesaria y porque lo que más interesa es una bomba para usos agrícolas. En cambio, se prestará atención a una bomba accionada a motor, como la que aparece en la figura 3.

Si se pone a punto un sistema de rastreo manual que funcione con concentradores a base de lentes de Fresnel lo cual es un objetivo alcanzable y se introducen otras mejoras en el diseño de máquinas y colectores solares, cabe esperar un rendimiento del 10% en un futuro próximo.

Valores numéricos

Para favorecer a la bomba solar, se supondrá que no se dispone de electricidad en la región y que la otra opción consiste en recurrir a una bomba diesel. A juzgar por los datos del cuadro 1 parecería que, por término medio, las necesidades de un agricultor quedan satisfechas con una bomba de $c_d = 4$ kW que funcione 1.000 horas al año. Se comparará un motor solar con uno diesel necesario para accionar dicha bomba. Las vidas útiles l_s y l_d son de 20 años y 5 años respectivamente. El costo de capital K_d es de unas 6.000 rupias (600 dólares) en el caso de un motor diesel de 4 kW ($K_d/c_d = 150$ \$/kW). Se supone también que: $O_s = m_s = \$50$; $m_d = \$50$ más el costo del lubricante ($\$20$) = $\$70$, y $p_d q_d = \$150$, con lo cual se obtiene un valor de $O_d = \$220$.

Las condiciones de funcionamiento en el terreno son tales que las bombas han de funcionar 18 a 20 o incluso 24 horas al día. El motor diesel puede funcionar constantemente, en tanto que un motor solar sin almacenamiento sólo puede funcionar de 6 a 9 horas diarias. Aplicando la ecuación (7) se observa que la capacidad del motor solar tendría que ser 2 a 3 veces mayor que la del motor diesel. Por lo tanto se consideraron estas dos capacidades posibles, con tres hipótesis distintas respecto del aumento del precio del combustible, concretamente aumentos anuales del 0%, 5% y 10%.

Se utilizó la ecuación (4), con $d = 10\%$, para calcular los costos actualizados a dólares constantes (corrientes); sólo se tuvieron en cuenta los aumentos de precio por encima de la inflación. En el cuadro 3 se resumen los resultados del análisis.

El precio de mercado por unidad de capacidad de una bomba solar es de 15.000-20.000 \$/kW. Del cuadro 3 se desprende que, para que un motor solar resulte aceptable económicamente para accionar una bomba de riego, su precio debe disminuir en un factor de 25 a 70. Si la bomba sólo fuera a utilizarse para obtener agua potable, podría tener la misma capacidad que la accionada con un motor diesel y funcionar sólo 4 a 6 horas al día. En el cuadro se observa que en tal caso bastaría con que el precio disminuyera en un factor de 10 a 20 nada más.

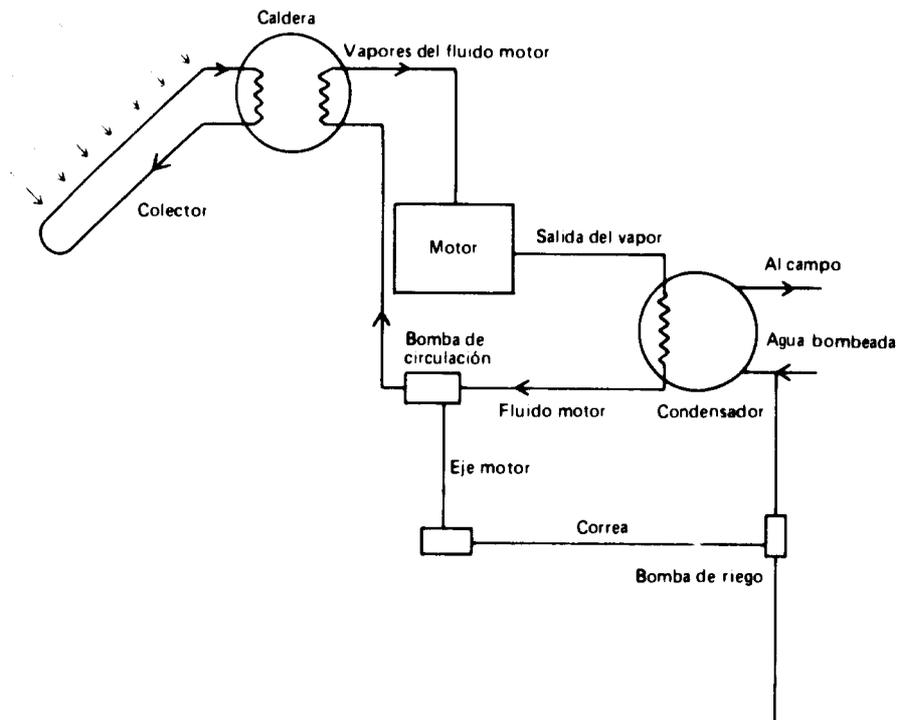


Figura 3. Diagrama esquemático de una bomba solar

CUADRO 3. COMPARACION DE COSTOS DE MOTORES SOLARES Y DIESEL PARA ACCIONAR BOMBAS

Concepto	Aumento anual del precio del combustible diesel		
	0%	5%	10%
Costos actualizados del motor diesel, $T = 20$ a	\$		
Costo de capital	1 348	1 346	1 348
Costo de funcionamiento	1 872	2 543	3 825
Total C_d	3 220	3 891	5 173
Menos costo actualizado de funcionamiento del motor solar	(425)	(425)	(425)
Costo de capital actualizado competitivo total del motor solar	2 795	3 466	4 748
Costo competitivo por unidad de capacidad	(\$ kW)		
Para el riego			
$C_s = 2C_d = 8$ kW	349	433	593
$C_s = 3C_d = 12$ kW	233	289	395
Sólo para extraer agua potable			
$C_s = C_d = 4$ kW	698	866	1 186

Validez de las hipótesis

La mayor parte de las hipótesis formuladas en el análisis anterior son muy generosas con el motor solar, según se desprende de las consideraciones siguientes.

Hipótesis técnicas. Todavía no se dispone de una máquina solar con una vida útil de $l_s = 20$ años. Además, un motor solar con una capacidad doble de la del motor diesel requeriría también una bomba hidráulica, accionada por el motor solar, con una capacidad doble de la utilizada por el motor diesel. En el cálculo no se ha considerado el costo adicional de la bomba hidráulica para el motor solar.

En el presente análisis se supone un tiempo de funcionamiento de $h_s = 6$ a 8 horas sin almacenamiento. Hasta la fecha ningún motor solar ha conseguido funcionar $h_s = 8$ horas incluso con almacenamiento. El motor diseñado por el National Physical Laboratory (India) tiene un valor de $h_s = 4$ h con almacenamiento. Para éste se requiere una superficie adicional de colector, según se indica en la ecuación (5), cuyo costo también debiera incluirse.

Si se proporciona el almacenamiento adecuado para que el motor solar pueda funcionar con $h_s = 18$ h, la capacidad de éste no precisa ser mayor que la del motor diesel. El costo competitivo por unidad de capacidad de semejante motor solar, con inclusión de los costos de los colectores y del almacenamiento, puede llegar a 1.180 \$/kW.

Hipótesis económicas. Aunque la bomba accionada por motor eléctrico es una opción más barata, se ha tomado como término de comparación el costo de una bomba accionada por motor diesel. Como el análisis se refiere a una solución que pudiera adoptarse en todo el país, no se ha considerado la cuestión de la no disponibilidad de combustible diesel

en determinadas zonas alejadas. En ellas la bomba solar pudiera resultar útil en un futuro próximo, especialmente para el abastecimiento de agua potable, puesto que puede ser la única tecnología viable. Sin embargo, consideramos el caso de que los precios del combustible se multipliquen por 8 (aumento anual del 10%) durante 20 años en relación con otros precios, que se mantienen constantes en el análisis.

Sin embargo, si las bombas solares se fabrican en países en desarrollo su precio puede ser inferior a los que se mencionan actualmente. Por ejemplo, el costo de los materiales de la bomba puesta a punto en el laboratorio de la India⁵ es de 1.200 \$/kW. No obstante, hay que esperar que se logren muchos progresos; y todavía queda por ver cuáles serán los costos de las bombas solares comerciales en los países en desarrollo.

Problemas operacionales de las bombas solares

Una vez que se tiene una bomba solar cuyo costo es comparable al de las otras opciones, cabe preguntar qué otros factores es menester considerar. Entre los que se han pasado por alto en el análisis antes efectuado figuran las variaciones climáticas, la modalidad de bombeo deseada y la disponibilidad de terreno para instalar los colectores.

Variaciones climáticas y locales

La intensidad de la radiación solar varía de un mes a otro. La eficiencia del aprovechamiento depende de la intensidad de la radiación, la temperatura, la nubosidad, etc. En el cuadro 4 se dan

⁵ Véase el artículo de V. G. Bhide, pág. 59.

CUADRO 4. VARIACION ANUAL DE LA RADIACION SOLAR Y EFICIENCIAS TIPICAS EN DOS CIUDADES DE LA INDIA

Mes	Número de días	Nagpur			Jodhpur		
		Radiación diaria media (MJ/m ²)	Eficiencia del aprovechamiento (%)	Disponibilidad total de energía (MJ/m ²)	Radiación diaria media (MJ/m ²)	Eficiencia del aprovechamiento (%)	Disponibilidad total de energía (MJ/m ²)
Enero	31	19,3	88	530	17,2	84	450
Febrero	28	21,3	83	500	20,1	84	470
Marzo	31	23,9	76	560	23,4	77	560
Abril	30	25,5	72	550	26,4	78	620
Mayo	31	26,4	70	570	28,5	83	730
Junio	30	20,1	40	240	28,5	73	620
Julio	31	16,7	23	120	22,2	48	330
Agosto	31	15,9	23	110	20,1	43	270
Septiembre	30	20,1	51	310	22,6	54	370
Octubre	31	20,9	69	450	21,3	84	550
Noviembre	30	20,1	87	520	18,4	91	500
Diciembre	31	17,6	84	460	15,9	88	430
TOTAL	365			4 920			5 000

Fuente: Los datos sobre radiación y eficiencia del aprovechamiento están adaptados de G. O. G. Lof, J. A. Duffie y C. O. Smith, *World Distribution of Solar Radiation* (University of Wisconsin, Solar Energy Laboratory, julio de 1966).

variaciones mensuales de la radiación solar, la eficiencia del aprovechamiento, y la energía solar utilizable en dos lugares, a saber Nagpur, Madhya Pradesh (India central), y Jodhpur, que se encuentra en la región occidental próxima al desierto de Rajasthan. En el cuadro se observa que la energía utilizable en Nagpur disminuye en un factor de 5 entre los meses de mayo y agosto. En la práctica, estos son los meses en que se necesita agua para el cultivo. La razón de que disminuya la radiación solar es que este es un período de lluvias. Pero si éstas se retrasan y el cielo está cubierto de todas maneras, la bomba solar instalada puede tener poca utilidad, a no ser que los colectores también capten la radiación difusa y se satisfagan las necesidades de agua.

Modalidad de bombeo

En regiones cálidas, es posible que algunos agricultores prefieran bombear al final de la tarde o durante la noche, para evitar pérdidas de agua por evaporación. En tales casos puede resultar imprescindible el almacenamiento.

Disponibilidad de terreno para los colectores solares

La superficie de colector que requiere una bomba de determinada capacidad que funcione cierto número de horas al día viene dada por la ecuación (8):

$$A = h_s c_s / \eta_s S$$

Esto podría suponer una superficie colectora de 100 m² en el caso de una bomba de 4 kW.

En los países en desarrollo, las explotaciones agrícolas suelen ser pequeñas y es posible que el agricultor medio no esté dispuesto a dedicar ni siquiera una pequeña fracción del terreno cultivable a los colectores cuando la superficie necesaria sea mayor que la que se precisaría para bombas de otro tipo. Si los colectores se colocan de tal manera que quiten luz del sol a las plantas, es posible que la bomba solar no sea la opción preferida, a menos que el agricultor esté dispuesto a cultivar ciertos tipos de plantas que puedan crecer en la sombra, bajo el colector, y otras plantas en el terreno restante.

Otros factores

Al desarrollar técnicamente una bomba solar hay otros factores a considerar, entre los cuales figuran los siguientes:

a) Compatibilidad de la carga máxima posible con la cantidad de agua necesaria, es decir, la cantidad de agua bombeada en comparación con las necesidades durante un día;

b) Disponibilidad de piezas de repuesto y servicios necesarios, y disponibilidad de personal capacitado para hacer reparaciones;

c) Compatibilidad de las capas freáticas con la posible capacidad de la bomba disponible en el momento (sin embargo, si la velocidad de relleno de las capas es pequeña, la bomba tendrá que funcionar a baja velocidad y en régimen continuo).

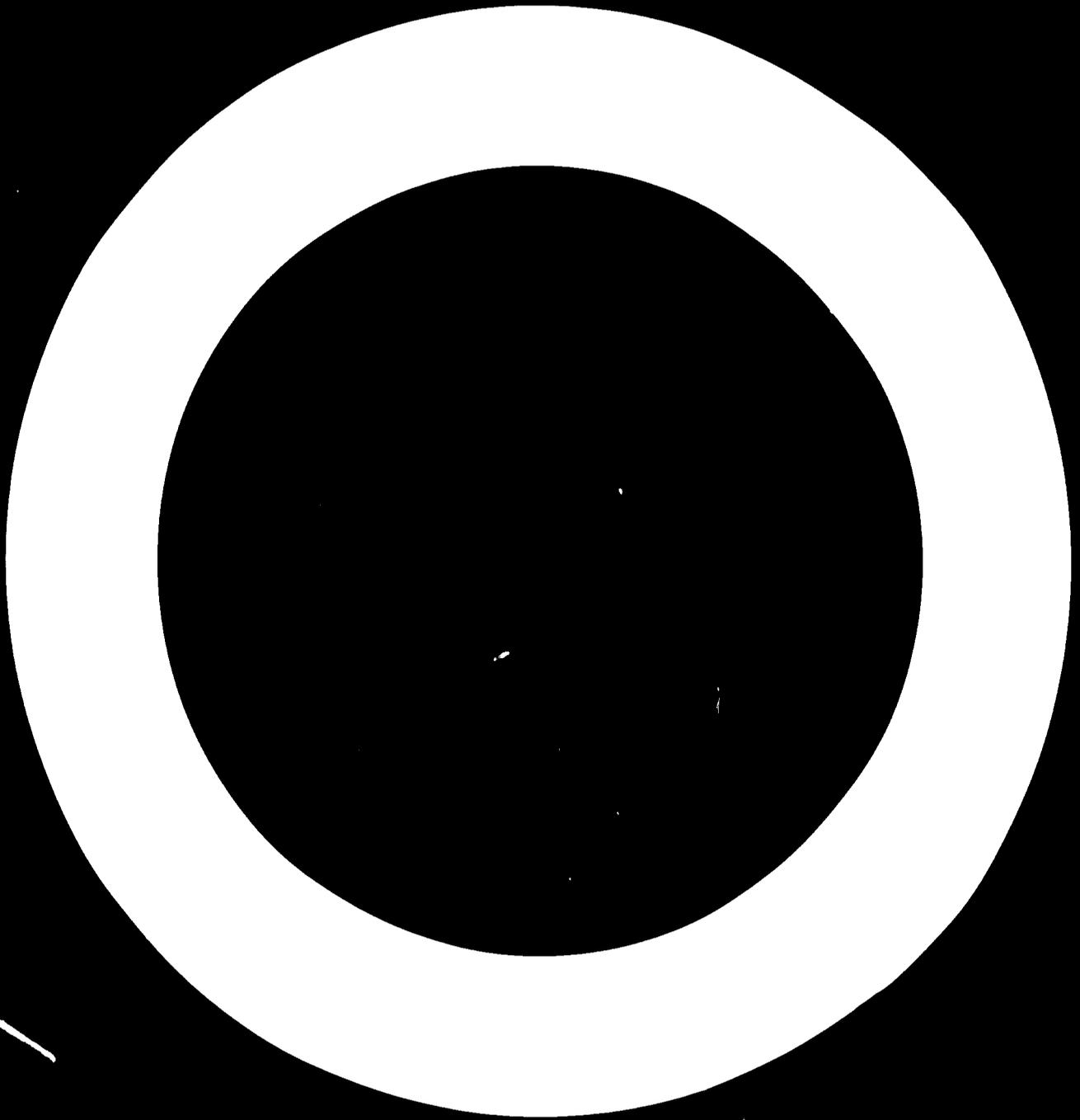
Resumen

El aprovechamiento de la energía solar de manera descentralizada sería perfectamente apropiado para la población rural grande y en crecimiento, de los países en desarrollo. En vista de los alimentos adicionales que se necesitan para las crecientes poblaciones, una aplicación de especial importancia podría ser el bombeo por energía solar. En la India, el número de bombas motorizadas puede aumentar en los próximos decenios de 2 millones a 20 millones.

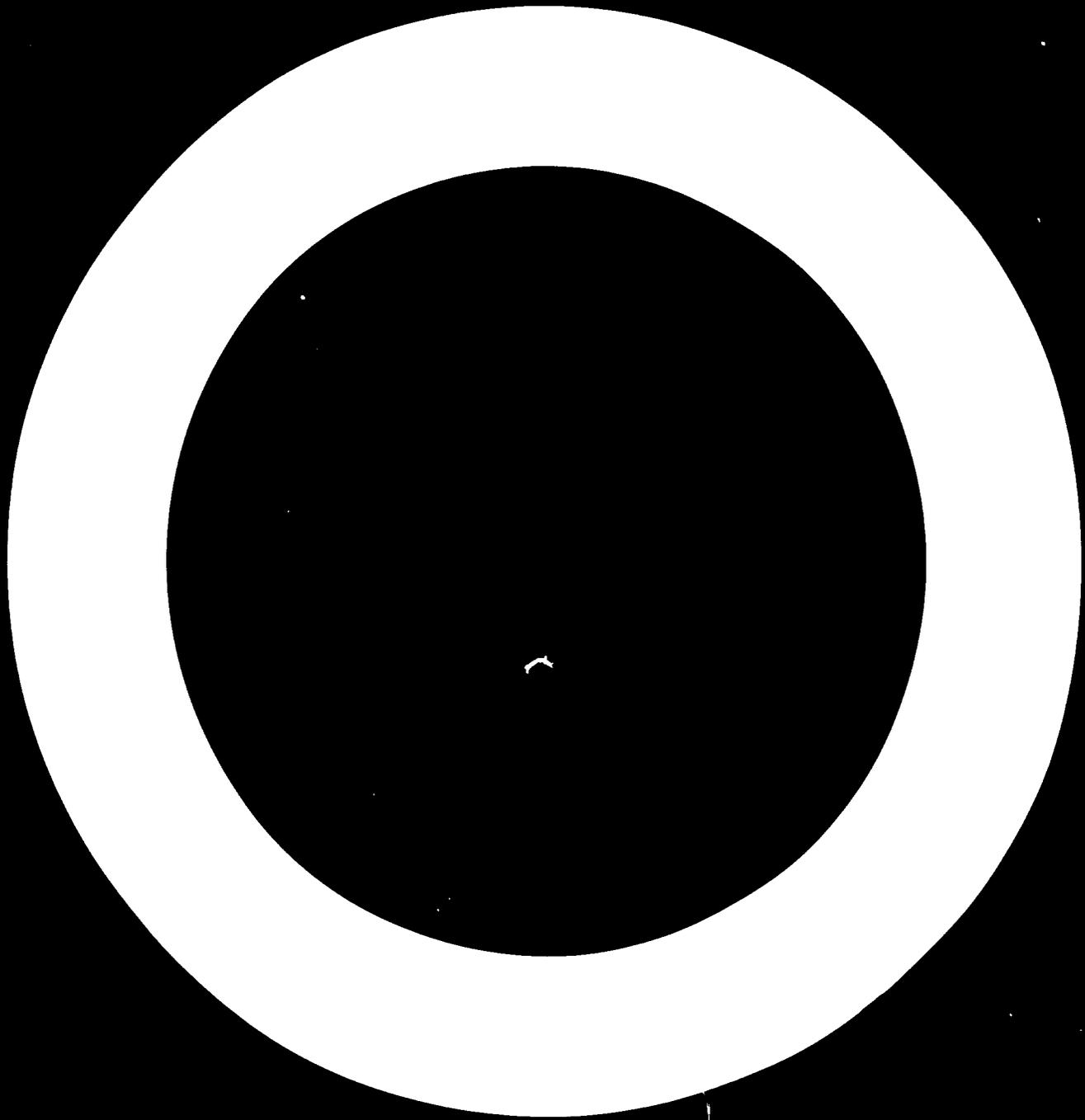
El rendimiento de los cultivos depende primordialmente de la disponibilidad de agua en ciertos períodos del año. Por lo tanto, la bomba solar habría de diseñarse de tal manera que satisficiera las necesidades de riego en todas las condiciones posibles del terreno. Esto significa que, para realizar el mismo trabajo que una bomba diesel, la bomba solar debe tener una capacidad superior. El análisis precedente, en el que se tiene en cuenta el aumento del precio del

combustible, muestra que el costo competitivo de la bomba solar se encuentra en el intervalo de 250 a 600 \$/kW. El costo actual de un motor solar es más de 20 veces mayor. Sin embargo, este costo podría disminuir si se fabricaran los motores en países en desarrollo. Si se instala la bomba solar para sacar agua potable, puede bastar con 6 a 8 horas de funcionamiento al día, por lo cual puede tener la misma capacidad que una bomba con motor diesel. En este caso, el costo competitivo podría ser de 1.200 \$/kW. (Por supuesto, si en alguna zona alejada no se dispone de combustible diesel ni de electricidad, la bomba solar podría ser la única solución.)

Además, incluso si se ponen a punto bombas solares económicas, es necesario considerar también otros factores basados en el clima, la geografía y el medio local, social e institucional. Para que la transferencia de tecnología tenga éxito, todo aquello que es objeto de desarrollo técnico debe ser adecuado a los fines a que se destina.



Anexos



I. RECOMENDACIONES DE LA REUNION DE EXPERTOS SOBRE LA TECNOLOGIA SOLAR EXISTENTE Y LAS POSIBILIDADES DE FABRICAR EQUIPO SOLAR EN LOS PAISES EN DESARROLLO*

Un plan de acción para la ONUDI

I. Preámbulo: El Grupo de Expertos reconoció que la tecnología solar es una esfera de actividad multidisciplinaria, con posibilidades permanentes de aplicación económica provechosa tanto en los países industrializados como en los países en desarrollo. Por lo tanto, teniendo debidamente en cuenta las actividades de la ONUDI dirigidas a estimular la investigación y el desarrollo aplicados, la promoción de la fabricación y la transferencia de tecnología en la esfera de la tecnología solar para su aplicación a las necesidades de los países en desarrollo, el Grupo de Expertos reconoció también los rápidos adelantos tecnológicos en esta esfera en los países industrializados y en algunos países en desarrollo; el Grupo de Expertos asigna, además, gran importancia a la capacidad de la ONUDI para prestar asistencia a los países en desarrollo mediante fuentes permanentes y actualizadas de conocimientos y la eficaz evaluación de una tecnología que crece con rapidez.

Recomendación 1: Por consiguiente, el Grupo de Expertos recomienda que la ONUDI establezca un "grupo asesor sobre tecnología solar" de carácter honorario. Ese grupo asesor honorario estará integrado por técnicos seleccionados eminentes en la esfera de la tecnología solar, tanto de países industrializados como de países en desarrollo, y actuará como "punto focal de referencia y contacto técnico" de la ONUDI. Cada miembro del grupo asesor deberá asesorar a la ONUDI a título personal y honorario respecto de un sistema de difusión de la información tecnológica. El grupo asesor se reunirá expresamente, a solicitud de la ONUDI, para examinar problemas técnicos concretos, prestará asistencia a la Secretaría de la ONUDI, y estará además a disposición para brindar servicios de consultoría a corto plazo mediante el envío de expertos sobre el terreno cuando la ONUDI lo solicite. Esos servicios sobre el terreno serán remunerados fuera de los criterios normales aplicables, únicamente con un honorario simbólico.

II. Preámbulo: El Grupo de Expertos es de la firme opinión de que la tecnología solar, en términos de principios científicos y teóricos, está suficientemente establecida. La transformación de los principios científicos en instrumental tecnológico, sin embargo, es todavía objeto de intensa labor en los países industrializados y en unos pocos países en desarrollo. Por ejemplo: *a)* sólo se hallan en el comercio colectores (de placa plana y de tipo concentrado de tamaño pequeño) y calentadores de agua; *b)* se han fabricado con buen éxito alambiques para destilación de agua, secadores y cocinas sencillos, pero aún no han sido fabricados en escala industrial,

*Como figuran en el informe de la reunión (UNIDO/IOD.73), excepto en cuanto a la corrección de errores evidentes de ortografía y gramática; el informe no pasó por los servicios de edición de la Secretaría.

debido principalmente a la necesidad de desarrollar y ampliar el mercado; *c)* algunos fabricantes e instituciones han diseñado y fabricado con buenos resultados sistemas de bombeo, calentadores de ambiente (domésticos, industriales, recreacionales, etc.), secadores, cocinas compactas, generadores solares, destiladores múltiples y sistemas de refrigeración intermitentes por absorción a baja temperatura (todo juicio acerca de posibilidades de fabricación/promoción de inversiones se podrá formular sólo después de efectuar ensayos sobre el terreno en los que se dedique especial importancia al análisis de la fiabilidad y el comportamiento); *d)* el sistema de refrigeración (absorbentes sólidos cloruro de calcio y otros) y acondicionadores de aire se hallan aún en la etapa de prototipo y se necesitan nuevos trabajos de investigación y desarrollo y de ensayo de prototipos sobre el terreno; *e)* el sistema de planta eléctrica central se halla en la etapa de concepción y encierra grandes posibilidades para el futuro; *f)* se han diseñado, fabricado y utilizado con buenos resultados, en determinados países industrializados, células solares para usos especiales. Sin embargo la transformación de las mismas para uso terrestre en gran escala requiere una ulterior labor tecnológica para reducir los costos. Sin embargo, las células solares encierran una gran promesa para todos los países.

Por lo tanto, la labor de la ONUDI en la promoción de la tecnología solar y, en último término, de los programas de fabricación debe adaptarse a los diferentes niveles de desarrollo de la tecnología y a las posibilidades futuras.

Recomendación 2: A fin de promover el concepto de tecnología solar y sus posibilidades para los países en desarrollo, la ONUDI debe reunir la información existente y ponerla a disposición de todos los países en desarrollo e instituciones de países industrializados. Además, la ONUDI debe iniciar un programa para la preparación de los manuales técnicos correspondientes (fuentes de información, estado de desarrollo de la tecnología, etc.), así como también organizar cursos prácticos y establecer becas (de capacitación) en beneficio de los países en desarrollo.

Recomendación 3: La ONUDI debe prestar asistencia a los países en desarrollo, cuando éstos la soliciten, en las negociaciones con empresas manufactureras extranjeras para la fabricación local de productos comerciales bien establecidos, dando especial importancia a la evaluación de la tecnología, aplicabilidad local, evaluación del rendimiento mediante ensayos locales, y negociaciones comerciales/técnicoeconómicas relativas a la fabricación. Se recomienda que la ONUDI, a pedido del país en desarrollo, se convierta en el asesor activo en todas esas negociaciones, con miras a lograr el acuerdo más satisfactorio que tenga en cuenta los intereses de los países en desarrollo.

Recomendación 4: La ONUDI debe asociarse activamente a los programas de desarrollo de instituciones de investigación y desarrollo seleccionadas de países industrializados y también de determinados países en desarrollo, con referencia a productos que ya se han fabricado pero que deben ser sometidos a nuevos ensayos. A este respecto, la ONUDI debe actuar como partícipe activo en el hermanamiento de instituciones de países industrializados y países en desarrollo y prestar asistencia en la instalación de esos prototipos en los países en desarrollo mediante el ensayo y la evaluación técnicoeconómica. También es necesaria la asistencia para transformar los prototipos de ensayo en "prototipos de fabricación comercial". La ONUDI ayudará igualmente a las instituciones de los países en desarrollo en la obtención de esa tecnología y en la promoción de la fabricación. En relación con esto, la ONUDI debe, a pedido de los países en desarrollo, asignar expertos apropiados que presten su asistencia a los Gobiernos en la formulación de un programa integrado de esa naturaleza, como también asistir en la efectiva realización del mismo.

Recomendación 5: La ONUDI, mediante una activa asociación con determinadas instituciones de investigación y desarrollo de países industrializados, debe ayudar a sus homólogos de países en desarrollo a mantenerse informadas de las actividades que se hallan en la etapa de concepción y de aquellas que ofrecen mayores posibilidades para el futuro.

III. Preámbulo: El Grupo de Expertos teniendo presente el nivel necesario de infraestructura tecnológica, los continuos cambios tecnológicos que se verifican y la necesidad de adaptar las tecnologías y los prototipos mediante su ensayo sobre el terreno, así como con el análisis de laboratorio, la adaptación, la negociación para la fabricación local y el desarrollo de las aptitudes empresariales locales asigna una gran importancia a la transferencia de tecnología desde los países industrializados así como a la cooperación entre países en desarrollo.

Recomendación 6: El Grupo de Expertos recomienda que la ONUDI preste asistencia a todos los países en desarrollo interesados, a pedido de los mismos, en el establecimiento o reforzamiento de sus instituciones nacionales apropiadas, poniendo el acento en la investigación y el desarrollo aplicados, la evaluación de tecnologías, las negociaciones sobre fabricación y el desarrollo de las aptitudes empresariales locales. Los programas de trabajo deben tener en cuenta las necesidades locales, el nivel de la tecnología, así como la prioridad y posibilidades del producto, y funcionar sobre la base de la transferencia de tecnología desde instituciones de países industrializados, dando especial importancia a la cooperación entre países en desarrollo, con miras a desarrollar capacidades locales. A este respecto, la ONUDI debe ayudar a los países en desarrollo a adoptar decisiones prudentes respecto de los programas de desarrollo de la tecnología solar:

instituciones de investigación y desarrollo, promoción de inversiones y promoción de la fabricación.

Recomendación 7: A fin de: a) promover la cooperación entre países en desarrollo, b) movilizar recursos tecnológicos y financieros, c) promover el concepto de autosuficiencia, y d) utilizar con eficacia los logros y capacidades tecnológicos de determinados países en desarrollo en beneficio de otros, se recomienda que la ONUDI refuerce las instituciones apropiadas existentes en determinados países en desarrollo (que tienen capacidades tecnológicas, industriales e infraestructurales) y las transforme en "centros de excelencia en materia de energía solar" con el objetivo de establecer un programa de investigación y desarrollo aplicados en beneficio de otros países interesados. Por lo tanto, el Grupo de Expertos recomienda que la ONUDI averigüe el interés de determinados países en desarrollo por participar en este programa, para convertirse en parte del núcleo de las actividades comprendidas dentro del marco de la cooperación entre países en desarrollo, y asistir a las instituciones locales en el desarrollo de un programa de trabajo integrado de investigación y desarrollo aplicados, evaluación de tecnología y evaluación de prototipos y productos, difundir información tecnológica y técnicas, capacitar personal técnico de otros países en desarrollo y promover el desarrollo de las aptitudes empresariales. Esos "centros de excelencia" deben proporcionar también prototipos y diseños y tecnologías a otros países en desarrollo, dedicarse a la evaluación cooperativa y desarrollar un programa que tenga como objetivo final la fabricación local de productos apropiados, con la debida atención a la tecnología pertinente. A este respecto, la ONUDI debe también desarrollar un programa cooperativo entre esos "centros de excelencia". Se recomienda también encarecidamente que las actividades de la ONUDI promuevan la cooperación y la transferencia de tecnología a esos "centros de excelencia" por parte de instituciones y fabricantes de los países industrializados.

IV. Preámbulo: El Grupo de Expertos está firmemente convencido de que la utilización práctica de la energía solar ha llegado a ser una realidad y que el mundo ha pasado hoy este umbral. Se trata de una tecnología que ofrece grandes posibilidades y es muy beneficiosa para las necesidades de los países en desarrollo. La labor exigirá investigación y desarrollo aplicados, evaluación de la tecnología, análisis de prototipos sobre el terreno, evaluación de la fiabilidad del producto, inclusive análisis técnicoeconómico y de costos, desarrollo de la tecnología de fabricación, promoción de las aptitudes empresariales y, finalmente, fabricación local. Por consiguiente, el Grupo de Expertos opina que la ONUDI debe tomar la dirección y la iniciativa y desarrollar un programa de acción integrado.

Recomendación 8: Se recomienda que la ONUDI desarrolle un programa de acción integrado de corto y mediano plazo en beneficio de los países en desarrollo. A este respecto, se recomienda que la ONUDI desarrolle un programa cooperativo con

instituciones y fabricantes de países industrializados, así como en países en desarrollo. Debe prestarse especial atención a la cooperación de otras organizaciones y organismos de las Naciones Unidas, así como de organizaciones intergubernamentales y no gubernamentales apropiadas.

Recomendación 9: Se recomienda que los Gobiernos de los países en desarrollo asignen una prioridad suficiente a la iniciación de un programa de acción en la esfera de la tecnología solar. Esto puede exigir la asignación de un programa de tecnología solar a una institución apropiada existente y el suministro de los correspondientes fondos y personal técnico, así como el desarrollo de un plan de trabajo práctico. Además, se recomienda igualmente que los Gobiernos, por conducto de las instituciones meteorológicas existentes, inicien las medidas necesarias para la reunión de datos apropiados, con miras a prestar asistencia y orientación a un programa de tecnología solar.

Recomendación 10: Se recomienda que la ONUDI desempeñe un papel activo ante los Gobiernos de los países industrializados para que se inicien, por conducto de la ONUDI, actividades integradas apropiadas en beneficio de los países en desarrollo. A este respecto, el Grupo de Expertos insta encarecidamente a la ONUDI a iniciar un programa para obtener aportaciones financieras de países industrializados para proyectos integrados de energía solar y dar comienzo a planes de acción concretos y eficaces.

Recomendación 11: Dada la gran importancia de la financiación para la iniciación de todo programa de tecnología solar, se recomienda que los Gobiernos de los países en desarrollo asignen recursos suficientes para esa actividad. Además, se recomienda también que la ONUDI inicie un programa dirigido a obtener contribuciones apropiadas (financieras y en especie (instalaciones, tecnología, etc.)) dentro del marco de la cooperación entre países en desarrollo.

II. PROYECTOS DE LA AIE. EN CURSO. EN MATERIA DE ENERGIA SOLAR

En noviembre de 1974 se creó la Agencia Internacional de Energía (AIE), la cual está integrada por Alemania (República Federal de), Austria, Bélgica, Canadá, Dinamarca, España, Estados Unidos de América, Irlanda, Italia, Japón, Luxemburgo, Nueva Zelanda, Países Bajos, Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte, Suecia, Suiza y Turquía. Noruega y la Comisión de las Comunidades Europeas participan como observadores.

La AIE cuenta con varios comités, uno de los cuales es el Comité de Investigación y Desarrollo de la Energía. El Grupo de Expertos sobre Energía Solar, comprendido en este Comité, ha elaborado cinco proyectos cooperativos en materia de calefacción y refrigeración del aire de edificios mediante energía solar, y la medición y análisis de la radiación solar. En noviembre de 1975, el Consejo de Administración de la AIE aprobó proyectos en siete nuevas esferas tecnológicas, inclusive sistemas de aprovechamiento de energía solar, energía eólica, energía térmica oceánica y transformación de la biomasa. A continuación se describen cinco de los proyectos iniciados.

Proyecto 1. *Desarrollo de sistemas de calefacción, refrigeración y suministro de agua caliente por medio de la energía solar*

El objetivo del proyecto 1 es organizar la cooperación entre los países participantes en dos esferas: la primera abarca la construcción de modelos y la simulación de sistemas solares de calefacción, refrigeración y suministro de agua caliente a fin de calcular su rendimiento térmico. La segunda comprende la medición del rendimiento térmico de sistemas, así como la información acerca de tal rendimiento y de la durabilidad y costo de aquéllos. Se espera que este proyecto proporcione una base para la optimización de la relación costo-beneficio de esos sistemas.

La terminación con buen éxito de este proyecto tendrá los siguientes resultados:

- Información sobre una evaluación de programas de computadora existentes para el cálculo del rendimiento térmico de sistemas;
- Un procedimiento internacional uniforme para medir el rendimiento térmico de sistemas;
- Información sobre el rendimiento térmico, durabilidad y costo de los sistemas existentes y, especialmente, de nuevos sistemas;
- Un procedimiento para diseñar los sistemas más económicos.

Proyecto 2: *Desarrollo de componentes de sistemas solares de calefacción, refrigeración y suministro de agua caliente*

El objetivo del proyecto 2 es acelerar el desarrollo de los componentes de sistemas solares de calefacción, refrigeración y suministro de agua

caliente mediante el examen y el intercambio de información sobre programas de desarrollo, permanentes y nuevos, en los países participantes.

La viabilidad de los sistemas de calefacción, refrigeración y suministro de agua corriente para la aplicación comercial depende de la eficacia de los componentes clave. Por lo tanto, se están haciendo grandes esfuerzos de investigación y desarrollo en países participantes, con el fin de mejorar su rendimiento y durabilidad y reducir los costos de los componentes clave.

Los componentes clave del sistema de calefacción y refrigeración solares que se incluirán en este proyecto son:

- Coletores solares.
- Almacenamiento de energía térmica.
- Acondicionamiento de aire mediante la energía solar.
- Otros componentes importantes, según corresponda.

Proyecto 3 *Ensayo del rendimiento de colectores solares*

El objetivo del proyecto 3 es desarrollar y utilizar procedimientos de ensayo uniformes para evaluar el rendimiento de una amplia clase de colectores destinados a la calefacción y la refrigeración.

El colector es un componente clave de todo sistema de energía solar. Se conocen muchos diseños de colector con una amplia gama de diferencias cualitativas. Es urgente ensayar su rendimiento para determinar las posibilidades técnicas y económicas de este componente. Por lo tanto, deben utilizarse métodos uniformes para determinar el rendimiento o la producción de energía de un colector y predecir su fiabilidad y durabilidad. Se prevé que se pueda evaluar el rendimiento concretando unas cuantas propiedades características, como las ópticas, térmicas y mecánicas. Los procedimientos de ensayo del rendimiento deben permitir medir o expresar estas propiedades. El procedimiento del ensayo provisional (NBSIR-74-365), propuesto por la Oficina Nacional de Normas (NBS) de los Estados Unidos de América, es un primer paso en esta dirección. Este procedimiento está ya en uso o en estudio en muchos países miembros como base para un desarrollo ulterior. Las dificultades inherentes al procedimiento de la NBS se deben a una limitación en las condiciones ambientales que permite el ensayo en regiones climáticas tales como Europa central sólo durante unas pocas semanas del año. Estos problemas pueden resolverse mediante la aplicación de simuladores, es decir, aplicando soles artificiales y condiciones climáticas reproducibles en cámaras climáticas. La aplicabilidad de la simulación es una de las principales metas de este proyecto.

La favorable conclusión de todas las tareas: a) suministrará datos fidedignos para el diseño de sistemas; b) proporcionará asesoramiento de ingeniería en el diseño de colectores; y c) proporcionará

una base para las normas de calidad. Los procedimientos de ensayo deben, pues, ser científicamente correctos, suficientemente precisos y lo más simples posible.

La meta de la labor de investigación es reducir el ensayo del rendimiento a la evaluación de un juego de parámetros característicos que definan propiedades ópticas, técnicas y mecánicas. Para llegar a esta meta, deben individualizarse cuatro tareas:

Desarrollo de procedimientos de ensayo recomendados para determinar el rendimiento térmico a la intemperie;

Desarrollo de procedimientos de ensayo recomendados para determinar el rendimiento térmico en ambiente cerrado;

Desarrollo de procedimientos de ensayo recomendados, a largo plazo, a la intemperie y acelerados, en ambiente cerrado, para determinar el rendimiento mecánico;

Documentación concisa respecto a los resultados en una obra de consulta sobre colectores.

Proyecto 4: Desarrollo de un manual sobre insolación y un paquete de instrumentación

Los objetivos del proyecto 4 son: *a)* compilar y distribuir un manual sobre insolación y mediciones meteorológicas conexas para aplicaciones de la energía solar y *b)* diseñar, construir, ensayar, evaluar y recomendar un paquete de instrumentación, portátil y de bajo costo, para medir la insolación y obtener información meteorológica conexas, destinado a efectuar mediciones en el lugar de ubicación de un sistema de energía solar, tanto antes de su explotación como durante la misma. Este paquete de instrumentación suministrará datos esenciales en una forma adecuada para muchos estudios sobre aplicación de la energía solar y diseños de sistemas. También se utilizará para reunir datos destinados a las evaluaciones del rendimiento de sistemas y subsistemas.

En los centros meteorológicos nacionales de todo el mundo existe un considerable y bien desarrollado acervo de conocimientos y experiencias en materia de insolación y mediciones meteorológicas conexas. Sin embargo, estos conocimientos deben ser resumidos y utilizados en los numerosos programas nacionales de aprovechamiento de la energía solar. El manual que se

ha de elaborar como parte de este proyecto está concebido para satisfacer esa necesidad.

En previsión de una futura utilización importante de la energía solar, todos los países deben disponer de los medios para medir la radiación solar y parámetros conexos en todas sus regiones climáticas y en zonas donde se prevé un crecimiento de la población o de la industria o en las posibles ubicaciones donde se utilice la energía solar. Además, el diseño y evaluación de sistemas de energía solar y sus componentes requiere ciertos datos sobre la radiación solar y el estado atmosférico. El paquete de instrumentación, que es uno de los objetos del proyecto, será diseñado de manera que proporcione esos datos, dentro de las limitaciones de que sea de bajo costo y portátil.

El buen éxito de este proyecto: *a)* proporcionará un valioso recurso informativo el *Manual de insolación y mediciones meteorológicas conexas*, compilado por expertos internacionales y difundido entre los países miembros de la AIE, *b)* facilitará considerablemente la comprensión de aquellos aspectos relacionados con la insolación y el estado atmosférico en los ensayos y demostraciones de sistemas de los países participantes y *c)* dará ocasión a un intercambio más eficaz y utilizable de información sobre el rendimiento de estos sistemas, lo que permitirá a cada país participante llenar los huecos de su propio programa nacional con la experiencia y los resultados de actividades desplegadas en otros países.

Proyecto 5: Utilización de la información meteorológica existente para la aplicación de la energía solar

Los objetivos del proyecto 5 son: *a)* determinar la relación cuantitativa entre las mediciones de la radiación solar y otros parámetros meteorológicos y *b)* desarrollar un sistema internacionalmente uniforme de presentación de datos sobre la radiación solar a fin de facilitar los cálculos para la utilización de la energía solar.

El proyecto se concentrará en dos grandes tareas: *a)* asesorar sobre métodos para calcular la radiación solar incidente sobre una superficie horizontal o inclinada mediante mediciones de la radiación solar u otros datos meteorológicos y *b)* mejorar la calidad de los registros actuales y pasados de la radiación solar y hacerlos utilizables en forma normalizada.

III. SISTEMAS DE INFORMACION SOBRE ENERGIA SOLAR*

Generalidades

En principio, un sistema de información en la esfera de la energía solar debe desempeñar las siguientes funciones:

Apoyo a la investigación y el desarrollo, mediante la difusión ordenada de información sobre los resultados de la investigación pasada y en curso;

Transferencia de tecnología, a través del suministro de resultados de investigación y desarrollo reordenados en una forma adecuada para su aplicación directa;

Datos para la planificación, por ejemplo, sobre parámetros climáticos, pero también información sobre costos y otros datos económicos, normas, aspectos legislativos y reglamentarios, etc.

El estudio se ha concentrado hasta el momento en la función de apoyo a la investigación y el desarrollo, dado que es probablemente la más importante en esta primera etapa, cuando varios países se hallan todavía en la etapa de planificación de programas. No obstante, las demás funciones de un sistema de información tienen, a largo plazo, por lo menos la misma importancia. Actualmente, la mayoría de los países de los que se han obtenido datos no se hallan aún en condiciones de llevar a la práctica sistemas de información en materia de transferencia de tecnología y de datos para la planificación en la esfera de la energía solar, aunque existen planes para esas actividades y en un único caso (los Estados Unidos de América) estos planes se hallan en las primeras etapas de ejecución.

Se está examinando asimismo el concepto de un programa de información total, particularmente en los Estados Unidos de América; este sistema está concebido para desempeñar múltiples funciones que van desde el apoyo tradicional a la investigación y el desarrollo, pasando por la transferencia de tecnología hasta la información dirigida a las autoridades locales, las organizaciones de servicios públicos e incluso al público en general, a fin de promover la utilización de la energía solar como medio para conservar o reemplazar otras fuentes de energía.

Sin embargo, incluso en la esfera del apoyo a la investigación y desarrollo, los resultados del estudio hasta ahora obtenidos demuestran que, en la mayoría de los países, la situación no ha cristalizado aún hasta el punto de que se hayan determinado las necesidades especiales de los científicos e ingenieros que trabajan en esa esfera y se haya construido una base de datos para satisfacer esas necesidades. La información en general se halla dispersa en una amplia variedad de revistas e informes de laboratorio, y, excepto en los Estados Unidos y posiblemente en la República Federal de Alemania, aún no ha sido organizada para su fácil consulta.

*Extractado de *Small Solar Power Systems* (apéndice, pág. 175 y siguientes).

Alcance y ámbito – la fuente de información

Desde el punto de vista de la información científica y técnica, la energía solar es una subdivisión de la energía en su conjunto y, como ocurre con la información sobre energía en general, es "transdisciplinaria", es decir que la información necesaria para un equipo dedicado a un proyecto de investigación y desarrollo se halla en muchas de las subdisciplinas de la física, la ingeniería y otras ciencias. Para la planificación del proyecto se deberá tener acceso a la información meteorológica y posiblemente a la geológica, y para la labor de planificación y evaluación, se necesitará también información sobre recursos y economía.

Por consiguiente, aunque las subdivisiones de esta esfera pueden ser útiles para clasificar documentos, el acervo total de información no puede ni debe dividirse en bloques aislados, uno relativo a sistemas de energía, otro a aplicaciones a la calefacción y a la refrigeración, un tercero y cuarto a los métodos solares de conversión térmica y fotovoltaica, etc. Una base de datos pertinentes a la generación de energía eléctrica solar no puede identificarse únicamente como una entidad separada, distinta de las de cualquier otra esfera de investigación, desarrollo o aplicación. En realidad, para muchos estudios analíticos y de evaluación de la utilización de la energía solar, por ejemplo, en análisis de sistemas o técnicas de previsión de la tecnología, puede ser necesario, además, recurrir a otras esferas de información sobre la energía.

El alcance y el ámbito de la información científica y técnica en materia de energía solar quedan claramente expuestos en la siguiente definición de la categoría de energía solar, dada en la actual enumeración de categorías de temas de la Base de Datos de Información sobre la Energía de la ERDA.

"Información sobre la conversión de la radiación solar en cantidades útiles de energía eléctrica, la utilización de energía solar para calefacción y refrigeración, o cualquier otra utilización de la energía solar que pueda hacer una aportación al presupuesto energético total. Está incluida la información relativa a todos los aspectos técnicos del diseño, investigación y desarrollo, fabricación, ensayo y explotación de células y colectores solares. Comprende también la información sobre materiales de reconocida utilidad para células o conversores solares."

Tamaño y características de la base de datos

Partiendo de la anterior definición del alcance y el ámbito, existen probablemente unos 10.000 artículos, informes y monografías pertinentes, sobre todo en inglés, que constituyen la base de información. Con ello se prescinde probablemente de mucho material de Europa oriental y la URSS, y posiblemente también de la bibliografía editada en japonés. Puede también haber una cantidad (descono-

cida) de material producido por empresas, pero inédito o, por otras razones, no disponible para su difusión: la estimación incluye ciertamente una elevada proporción de resultados de trabajos realizados por la industria bajo contrato con organismos gubernamentales, en el caso de material procedente de los Estados Unidos. Cabe esperar que la proporción de bibliografía "no convencional" (es decir, informes de laboratorio y contratistas, que no aparecen en las publicaciones oficiales) sea elevado, como ocurre por lo común en las esferas de la investigación y desarrollo orientadas hacia misiones o hacia la aplicación. Por ejemplo, respecto a la energía atómica, la proporción entre literatura no tradicional y tradicional es de 1:5. La literatura científica y técnica pertinente a la energía solar sigue creciendo: un cálculo fidedigno indica que las adiciones alcanzarán en 1976 una cifra de 200 por mes.

Información sobre investigación y desarrollo en Europa

Fuentes disponibles

El estudio de las actividades de información científica y técnica en los Estados europeos miembros de la AIE está lejos de hallarse completo, pero una fuente de información mencionada con frecuencia era la contenida en los ficheros computadorizados del sistema de información interactiva RECON (Remote Console) operado por el Servicio de Documentación sobre el Espacio Ultraterrestre de la Oficina Europea de Investigaciones Espaciales, a la que se puede llegar por conducto de una red de datos, ESANET. Los nodos de esta red están situados en la República Federal de Alemania, Dinamarca, España, Francia, Italia, los Países Bajos, el Reino Unido y Suecia. Sin embargo, se puede tener acceso a ella desde otros países, utilizando conexiones normales que se pueden marcar por teléfono. Se pueden interrogar unas doce bases de datos con información computadorizada, de las cuales se han individualizado las siguientes como las de mayor contenido en lo relativo a la energía solar:

- NASA (tecnologías aeroespaciales y conexas);
- INSPEC (física aplicada);
- METADES (metalurgia, etc.);
- ENGINEERING INDEX (ingeniería general);
- Government Research Abstracts (NTIS-technology).

Todas las mencionadas, excepto INSPEC, son productos de los Estados Unidos; pueden también hallarse ocasionalmente referencias útiles en otros ficheros que se pueden consultar a través de la red, por ejemplo, World Aluminium Abstracts, Nuclear Science Abstracts y Chemical Abstracts Condensates.

Dado que este recurso informativo se halla a disposición de los usuarios en la mayor parte de los países europeos miembros de la AIE, reviste cierta importancia calcular la probable cobertura relativa del tema en estos ficheros, en comparación con la base de datos total sobre energía solar en los países.

Aunque cabe sostener que todavía no existe la base de datos total, lo que más se aproxima a ella es el contenido de la bibliografía sobre energía solar producida por la ERDA, que contiene aproximadamente 10.000 entradas. El contenido total pertinente de las bases de datos ESANET alcanza probablemente más de la mitad de este número, pero no se puede hacer un cálculo exacto sin una detallada comprobación de las superposiciones, operación costosa y que requiere mucho tiempo. Ello no obstante, la existencia del recurso ESANET y su disponibilidad general dentro de Europa occidental es muy valiosa para la labor de investigación y desarrollo en esa esfera. Sin embargo, no contiene información sobre la investigación en curso. Respecto del crecimiento futuro puede ocurrir que la cobertura del tema por estas bases de datos tienda en parte a deteriorarse, en razón de que, a medida que el programa de energía solar de los Estados Unidos crezca, gran parte del material resultante aparecerá en la base de datos de la ERDA (informes de los contratistas de ERDA, etc.), con preferencia a otras bases de datos. Aunque el material sobre energía solar no procedente de ERDA aparecerá, cuando corresponda, en la base de datos del Engineering Index, y el NTIS mantendrá presumiblemente su cobertura actual, la mejor solución del problema sería que la nueva base de datos ERDA pudiese ser interrogada a través de ESANET.

En relación con las fuentes no computadorizadas, se pidió a los contactos en los Estados miembros de la AIE que indicaran qué revistas u otras publicaciones creían de utilidad. Las respuestas recibidas hasta el momento son insuficientes para permitir extraer conclusiones. La impresión general, sin embargo, es que la información útil está dispersa entre tantas publicaciones, que las investigaciones bibliográficas clásicas que rindan un porcentaje satisfactorio del material pertinente presentan graves dificultades, incluso para los usuarios que tienen acceso a las grandes bibliotecas.

Hasta el momento sólo han aparecido durante el estudio dos intentos de crear una base de datos especializada con un contenido importante relativo a la energía solar, ambos en la República Federal de Alemania, uno en Jülich y el otro en Karlsruhe. Este último centro es el foco en Alemania para la entrada de datos al INIS y es, por lo tanto, el centro de los servicios de información alemanes en la esfera de la energía atómica. Se supone que se está ampliando esta actividad hasta que abarque toda la esfera de la energía. El banco de datos sobre energía solar de Jülich se halla en la etapa de planificación.

Información sobre investigación y desarrollo en los Estados Unidos de América

Introducción

Buena ilustración de la situación actual es el desarrollo de la Base de Datos de Información sobre la Energía de la ERDA (EEDB). Se trata de una base de datos computadorizada compuesta por todas las

entradas que figuran en los ERDA Research Abstracts, que abarcan todas las publicaciones que suministran información a las investigaciones patrocinadas por la ERDA, Energy Abstracts for Policy Analysis (igualmente publicación de ERDA), la entrada de datos de ERDA al INIS en materia de ciencia e ingeniería nucleares, y material no nuclear ajeno a ERDA que aparece en la publicación Energy Abstracts. Este último es una subcolección del Engineering Index especializada en todas las disciplinas de la ingeniería relacionadas con la energía. En consecuencia, el material referente a la energía solar, perteneciente o no a ERDA, figura en la EEDB. El material que no procede de los Estados Unidos se obtiene mediante acuerdos de canje. Se cree que la EEDB sustituirá en julio de 1976 a los Nuclear Science Abstracts. La información sobre la energía solar anterior a la creación de la EEDB procedía de muchas fuentes, aparte de la bibliografía publicada (programas de NASA y de NSF, por ejemplo), pero se cree que todo este material figura en una Bibliografía de la energía solar publicada por el Centro de Información Técnica de ERDA.

Organización

La ejecución del programa de información científica y técnica de la ERDA es de la competencia de la Oficina de Asuntos Públicos. El Technical Information Center de Oak Ridge (Tennessee) se encarga de todas las publicaciones técnicas de la ERDA y de la creación de la base de datos. La base de datos de la ERDA puede ser interrogada dentro de los Estados Unidos de América a través de la red ERDA (anteriormente AEC) RECON, que sirve a los centros de ERDA y a los principales usuarios. El nodo central de la red se halla también en Oak Ridge en el Oak Ridge National Laboratory.

Contenido de la EEDB relativo a la energía solar

Las subcategorías de la energía solar que figuran en la EEDB son las siguientes:

Recursos y su disponibilidad	Plantas eléctricas focales en torre
------------------------------	-------------------------------------

Almacenamiento y eliminación de calor	Plantas eléctricas parabólicas lineales
Aspectos geológicos y meteorológicos de la ubicación	Plantas eléctricas basadas en el gradiente térmico oceánico
Aspectos económicos	Utilización de la radiación solar
Aspectos ambientales	Calefacción de ambientes y acondicionamiento del aire
Conversión de la energía solar	Cocina
Conversión fotovoltaica	Hornos
Conversión termiónica	Destilación
Conversión termoeléctrica	Secado y curado
Conversión fotosintética	Desalación
Plantas eléctricas fotovoltaicas	Calentamiento de agua
Plantas eléctricas solares térmicas	Motores térmicos
Plantas eléctricas orbitales	Colectores y concentradores solares

Otras bases de datos

Entre las bases de datos computadorizadas que contienen materiales pertinentes figuran NASA, NTIS y COMPENDEX (Engineering Index). La categoría de energía solar de la EEDB contendrá, según se cree, material de estos ficheros. La información pertinente de los mismos anterior a 1976 se ha incluido en la bibliografía de la energía solar TIC.

El Technology Applications Center de la Universidad de Nuevo México publica una bibliografía sobre energía térmica solar. Contiene unas 4.000 entradas y se mantiene actualizada. No se sabe con precisión en qué medida su contenido está incluido en la bibliografía TIC, que tiene un alcance más amplio, pero debería ser casi el 100%, dado que las fuentes son poco más o menos las mismas. No existe servicio de cinta de computadora.

IV. INSTITUCIONES QUE PARTICIPAN EN EL DESARROLLO DE LA ENERGIA SOLAR

Alemania. República Federal de

Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für
Luft- und Raumfahrt
Pfaffenwaldring 38-40
D-7000 Stuttgart

Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers
151 Boulevard de l'Hôpital
Paris 13^e

Laboratoires d'Electroniques et de Physique
Appliquée
3 avenue Descartes
94 Limiel-Brévannes

Australia

Committee on Solar Energy Research
Australian Academy of Science
P.O. Box 216, Civic Square
Canberra, ACT 2606

Laboratoire de Physique des Solides
1 Place Aristide Briand
F-92190 Meudon-Bellevue

Austria

Austrian Solar and Space Agency
Garnisongasse 9
A-1090 Vienna

Grecia

National Council for Energy
Athens

Nuclear Atomic Energy Commission
Athens

Physics Laboratory
University of Patras
Patras

Brasil

Universidade de Campinas
Caixa Postal 1170
Campinas, São Paulo

India

Central Salt and Marine Chemicals Research
Institute
Gijubhai Badheka Marg
Bhavnagar 364 002

Birla Institute of Technology and Science
Pirani
Rajasthan

Canada

Brace Research Institute
Macdonald College of McGill University
Ste. Anne de Bellevue HOA ICO, Quebec

Estados Unidos de América

College of Engineering and Applied Sciences
Arizona State University
Tempe, AZ 85281

Solar Energy Application Laboratory
Colorado State University
Fort Collins, CO 80523

Solar Energy and Energy Conversion Laboratory
College of Engineering
University of Florida
Gainesville, FL 32611

Mali

Laboratoire de l'Energie Solaire du Mali
B.P. 134
Bamako

Niger

L'Office de l'Energie Solaire
B.P. 621
Niamey

Francia

Centre National de la Recherche Scientifique
15 quai Anatole France
Paris

Centre National de la Recherche Scientifique
Laboratoire de l'Energie Solaire
B.P. 5
F-66120 Odeillo-Fonto-Roma

Países Bajos

Institute of Applied Physics
1 Stieltjesweg
Delft

Stichting TOOL
P.O. Box 525
Eindhoven

University of Technology
Delft

La serie "Desarrollo y transferencia de tecnología" de la ONUDI

Número

- *1. Experiencias nacionales en la adquisición de tecnología (ID/187), núm. de venta: S.78.II.B.7. Precio: \$8,00 (EE.UU.)
2. UNIDO Abstracts on Technology Transfer (ID/189)
- *3. La fabricación de vehículos económicos en los países en desarrollo (ID/193), núm. de venta: S.78.II.B.8. Precio: \$3,00 (EE.UU.)
4. Manual de instrumentación y control de calidad en la industria textil (ID/200)
- *5. Tecnología para aprovechar la energía solar (ID/202), núm. de venta: S.78.II.B.6. Precio: \$10,00 (EE.UU.)

En América del Norte, Europa y Japón pueden obtenerse gratuitamente todas las publicaciones arriba enumeradas excepto las marcadas con un asterisco, que en esas zonas se distribuyen, al precio indicado, en una edición para la venta publicada aparte. En el resto del mundo pueden obtenerse gratuitamente todas las publicaciones arriba enumeradas, sin excepción alguna.

Las solicitudes de ejemplares gratuitos deben enviarse, con indicación del título y la signatura (ID/...) de la publicación, a: Redacción, *Boletín Informativo de la ONUDI*, P.O. Box 707, A-1011 Viena (Austria).

Las publicaciones de venta deben encargarse, por título y número de venta, a los distribuidores autorizados de publicaciones de las Naciones Unidas o a una de las oficinas siguientes:

Para Europa

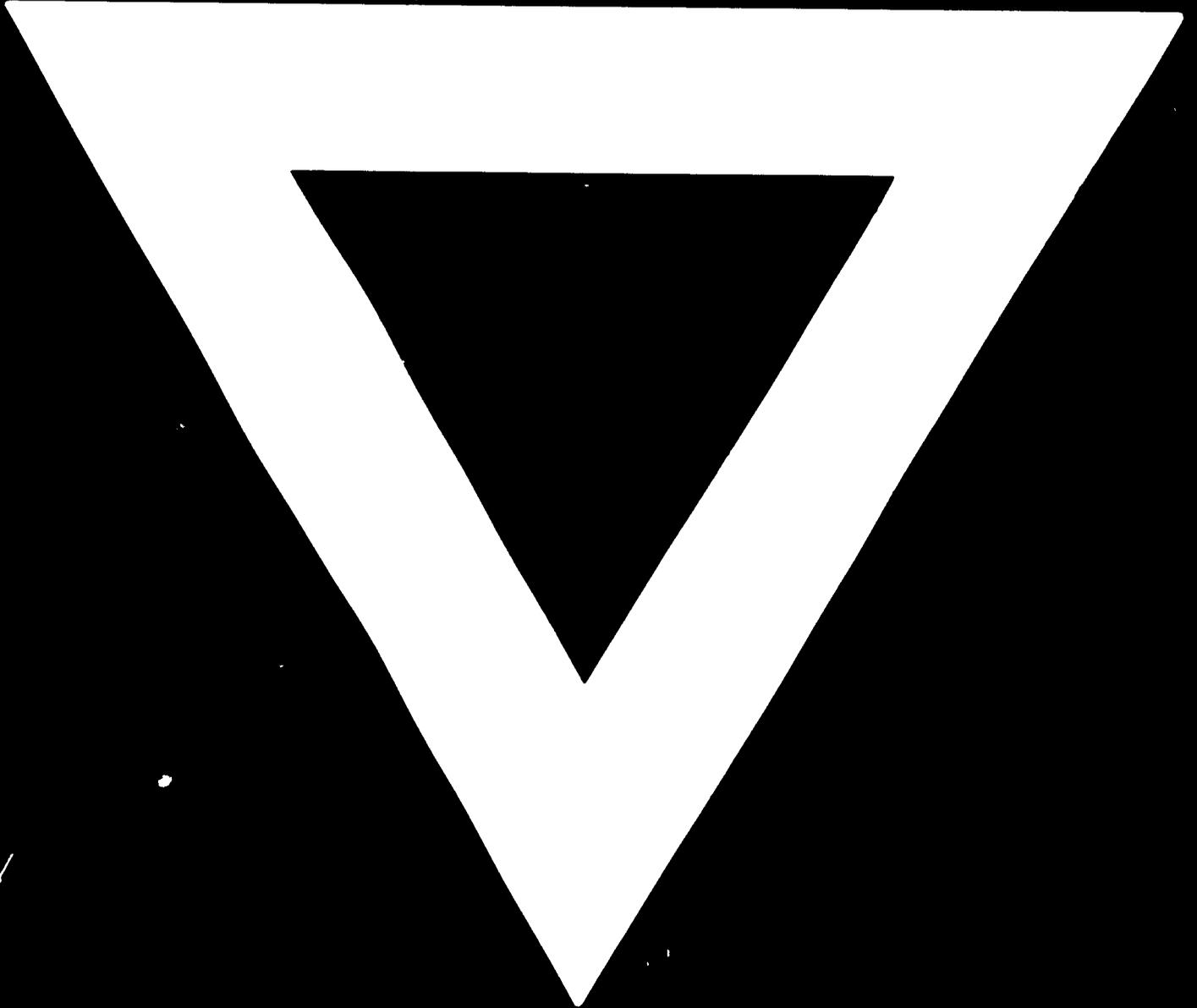
Sección de Ventas
United Nations Office
CH-1211 Ginebra 10
Suiza

Para América del Norte y Japón

Sección de Ventas
United Nations
Nueva York, Nueva York 10017
Estados Unidos de América



B-107



80.02.21