

ASPECTOS BÁSICOS DE REFRIGERACIÓN PARA LA AGROINDUSTRIA

BASIC ASPECTS OF REFRIGERATION FOR THE AGROINDUSTRY

GERARDO CABRERA CIFUENTES¹, DEYANIRA MUÑOZ MUÑOZ²

PALABRAS CLAVES:

Refrigeración solar, radiación solar, transferencia de calor, refrigerador

KEY WORDS:

Solar refrigeration, solar radiation, heat transfer, refrigerator

RESUMEN

El presente trabajo expone los fundamentos más comunes en que se basan los sistemas de refrigeración solar para las aplicaciones agroindustriales.

ABSTRACT

The present work exposes the most common principles that the systems of solar refrigeration are based for agroindustrials applications.

INTRODUCCIÓN

Dos de las necesidades más relevantes de los países en desarrollo son el agua y la refrigeración porque se relacionan con la disposición de comida. Se estima que más de la mitad de la población mundial carece de suministro adecuado de agua y de alimentos. El problema continúa en aumento cuando extensos terrenos de cultivos se destinan al desarrollo de biocombustibles y en otros casos a surtir de combustibles.

Actividades como la producción de alimentos, la irrigación y la conservación de los alimentos son vitales en muchas regiones que tienen suficiente capacidad de producción pero los pierden por no aplicar soluciones sencillas, de fácil aplicación o por desconocer los principios del secado y la refrigeración solar.

Recibido para evaluación: Abril 7 de 2008. Aprobado para publicación: Julio 10 de 2008

1 Msc., Universidad del Valle

2 Msc., Universidad del Cauca. Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Depto. de Agroindustria.

La preservación de alimentos ha sido una práctica muy importante a lo largo de toda la historia humana, permite proveer en épocas de escasez y guardar en épocas de bonanza. Un contenido de humedad mínimo evita el desarrollo de microorganismos, la invasión de insectos y la germinación [1].

Bajas temperaturas inhibe el crecimiento y suspende los procesos vitales de los microorganismos. [2]. Secarlos es muy fácil pues solo precisa de pocos grados de temperatura por encima de la atmosférica al igual que enfriarlos. Es difícil cuantificar las pérdidas pero de acuerdo con la FAO (Cuadro 1) se estima que entre 35- 40% de la producción agrícola se pierde. [3].

Tanto el secado como la refrigeración consumen energía, en el primer caso en forma de calor y en el segundo caso puede ser: trabajo o calor.

La demanda va aumentando con el crecimiento de la población que necesita más comida. Las fuentes más tradicionales de energía se están agotando y su uso impacta a la naturaleza; se deben sustituir y ahorrar. (Cuadro 1).

El Sol es la principal fuente de energía y sostén de la vida terrestre, su radiación es intensa en las zonas tropicales donde es particularmente generosa la biodiversidad y por ende la posibilidad de producir alimentos.

El uso energético del sol aparece como una buena alternativa sobre todo cuando: la energía convencional no está disponible y/o es muy cara, la densidad de consumo de energía es muy baja y cuando la energía solar está muy distribuida. Por lo tanto el propósito del documento es presentar los aspectos teóricos relacionados a la refrigeración que pueden ser aplicados en la agroindustria.

Cuadro 1. Pérdidas de alimentos en post cosecha

OPERACIONES	%
Cosecha	5-8
Pre almacenamiento	15-20
Almacenamiento	5-10
Transporte	10-12
Total teórico	35 - 40

Fuente: Grolleoud. FAO 2002

ENERGIA SOLAR

El sol es una estrella entre las cientos de billones que existen en el Universo. Tiene alrededor de 10 billones de años de existencia y es la responsable de todos los procesos sobre la tierra. En la figura 1 se muestra la radiación típica del sol como cuerpo negro $e_{b\lambda}$ en

$w/m^2 \mu m$ a 600 K. Continuamente está irradiando

al espacio unos 3.8×10^{23} kwatt originados por la conversión de su masa en energía a una rata de 4.7 millones de toneladas por segundo.

De esta energía irradiada le llegan a la superficie que limita nuestra atmósfera exterior perpendicular al

rayo, una cantidad de $1.353 \frac{Kwatt}{m^2}$ denominada constante solar I_{sc} . En la atmósfera sufre fenómenos de difracción, absorción y refracción y llegan a

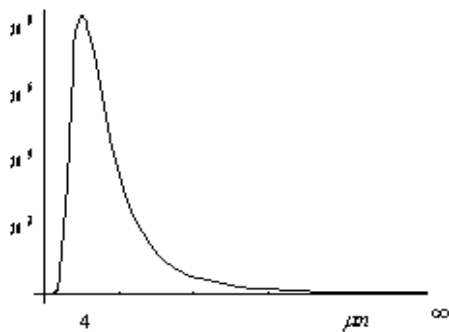
la superficie terrestre unos $1.0 \frac{Kwatt}{m^2}$ que varían dependiendo de la geografía y el clima. (Figura 1)

La radiación solar sale con longitudes de onda λ (μm) que van desde cero hasta infinito, pero las que llegan a la tierra están comprendidas entre $0.3 \mu m$ y $3 \mu m$ (figura2) que son aprovechadas por los seres vivos y mueven los procesos físicos de la tierra. Artificialmente se usa en la generación directa de electricidad (efecto Fotoeléctrico) y en proceso que necesiten calentamiento (radiación térmica). [4] (Figura 2)

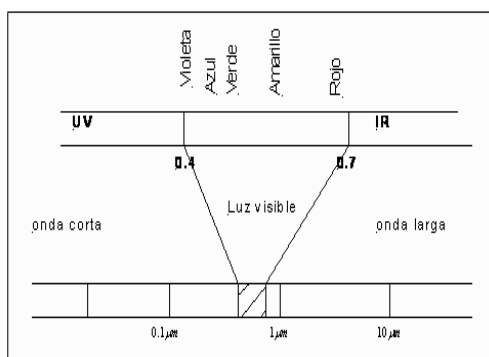
REFRIGERACIÓN

La refrigeración es de interés en la conservación de productos biológicos, en el confort de seres vivos y en la climatización de ambientes [5]. Es conocido su aplicación en la industria lechera y en los bancos de crecimiento de vegetales. [6]

El concepto de refrigeración está asociado con el de enfriamiento. Un cuerpo mas caliente tiene una temperatura mayor que otro mas frío como índice del mayor contenido de energía mecánica de las moléculas. De acuerdo con la segunda ley de la

Figura 1 Radiación del sol a 600 °K

Fuente: Incropera F. & De Witt D., 1996

Figura 2. Clasificación de radiación visible

Fuente: Incropera F. & De Witt D., 1996

termodinámica los de más energía cederán calor espontáneamente a los fríos. En el proceso de calentamiento el caliente se enfría y el frío se calienta hasta que sus temperaturas se hacen iguales.

El problema del enfriamiento se resolverá contando con un cuerpo mas frío que el que se quiera enfriar. Se puede crear artificialmente un cuerpo a menor temperatura para el enfriamiento del otro y si la temperatura del receptor de calor es lo suficientemente baja entonces el que cede calor llegará al congelamiento.

Cuerpos fríos se pueden crear de varias maneras implicando siempre intercambio de energías. Para saber de que manera se puede obtener un cuerpo frío es importante conocer el comportamiento de las sustancias al intercambiar energía. Se puede conseguir cuerpos fríos por cambio de fase y expansión, reacciones químicas y disoluciones de sustancias y mediante el Efecto Peltier.

En el **cambio de fase y expansión**, las sustancias que forman los cuerpos se encuentran fundamentalmente en tres estados: sólido, líquido o gas. Una sustancia en cualquier fase pasa a otra recibiendo o donando energía y la manera más fácil es cuando la energía intercambiada es calor.

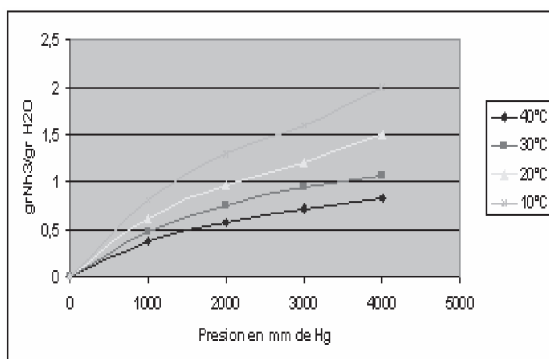
Un líquido puede evaporarse (pasar de líquido a gas) absorbiendo calor, en el proceso inverso descargando calor. Un sólido puede licuarse (pasar de sólido a líquido) absorbiendo calor y de lo contrario descargando. La separación entre las moléculas es menor en los sólidos y aumenta en los gases. De manera que evaporar y licuar es suministrar energía para separar moléculas, mientras condensar y solidificar es suministrarla para juntarlas lo que muestra que también se puede licuar, evaporar mediante trabajo mecánico para separar o juntar moléculas. El proceso de evaporar un líquido y el de licuar un sólido dan la posibilidad de tener un cuerpo frío que absorberá calor de los cuerpos en sus alrededores. Los líquidos son mas utilizados debido a que ellos se evaporan al disminuirles la presión y recibiendo calor. De igual manera cuando a un gas se le disminuye la presión (se expande) y baja su temperatura y podrá ser usado como cuerpo frío.

Enfriar ambientes a muy bajas temperaturas (refrigeración) necesita sustancias que se evaporen a bajas temperaturas. Las sustancias usadas para esto son llamadas refrigerantes. Se tendrá el cuerpo frío artificial con un refrigerante adecuado que puede ser evaporado y comprimado, absorbiendo calor y recibiendo trabajo.

Existen **reacciones químicas** endotérmicas y exotérmicas y **disoluciones de sustancias** que al disolverse unas en otras pueden absorber o descargar calor. Ejemplo son las soluciones de cloruro de calcio, amoníaco [7], Una disolución importante en la refrigeración por absorción es la de agua y amoníaco (H_2O y NH_3) cuya concentración depende de la temperatura y presión (Figura 3).

Siendo el amoníaco una sustancia que se evapora fácil por lo tanto absorbe calor estando a baja presión y temperatura y podrá enfriar a sus alrededores en consonancia.

Figura 3: Solubilidad del amoniaco en agua



Fuente: Refrigeration an water pumping, 1982

REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN

Si al evaporar una sustancia y ésta absorbe calor, existirá la posibilidad de enfriar un ambiente mas caliente, entonces el calor fluirá desde los alrededores hacia la sustancia que se está evaporando. Si se necesita enfriar a una temperatura mas baja se debe evaporar a una presión y temperatura más baja.

La temperatura de evaporación de todas las sustancias, incluyendo los refrigerantes, depende de su presión. El problema de conseguir ambientes a temperaturas bajas radica en tener refrigerantes evaporando a presiones bajas, como en el caso del refrigerante 12 (difluor, dicloro metano CF_2Cl_2).

En el cuadro 2 se observa la dependencia de la temperatura y la presión de evaporación, la cantidad de calor a retirar o agregar de acuerdo a las entalpías de líquido y vapor saturado para esta sustancia [8]

Cuadro 2: Propiedades termodinámicas de Freón 12.

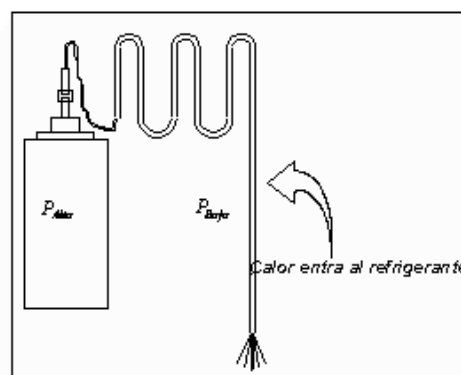
T (°C)	P (MPa)	h_l (KJ/ Kg)	h_g (KJ/Kg)
-20	0.15093	17.82	178.74
-10	0.219	31.45	185.37
20	0.567	54.87	195,78
40	0.96	74.59	203.20

Fuente: Cengel Y, 1996.

La refrigeración por evaporación de un refrigerante es ineficiente (figura 4) cuando hay escape de refrigerante y se debe comprimir previamente. La solución mas adecuada es someter el refrigerante a ciclos con procesos que lo comprima (consume trabajo), licue (descarga calor) y expanda y lo evapore (absorbe calor). (Figura 4).

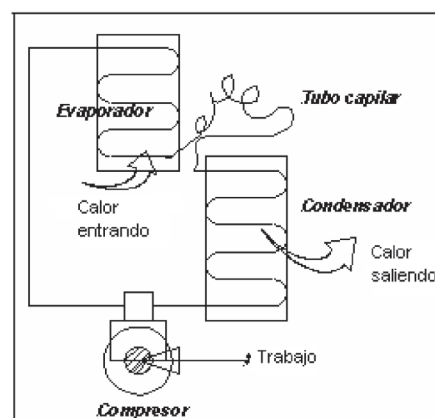
Un refrigerador cuyo refrigerante desarrolle un ciclo como el anterior se llama refrigerador por compresión (figura 5) y esta conformado por un compresor que aumenta la presión al gas refrigerante, un condensador que descarga calor al medio ambiente y lo condensa, un dispositivo (válvula de expansión o tubo capilar) que le disminuye la presión al líquido refrigerante y un evaporador donde el líquido a baja presión se evapora absorbiendo calor desde el espacio a refrigerar. (Figura 5).

Figura 4: Enfriamiento por evaporación



Fuente: Refrigeration an water pumping, 1982

Figura 5: Refrigerador por compresión



Fuente: Refrigeration an water pumping, 1982

El trabajo es suministrado por un motor. Éste puede ser de combustión interna, hidráulico o uno eléctrico. En el caso de ser eléctrico la corriente puede ser de la red o auto generada en la misma instalación por ejemplo por el efecto foto-voltaico en una celda solar.

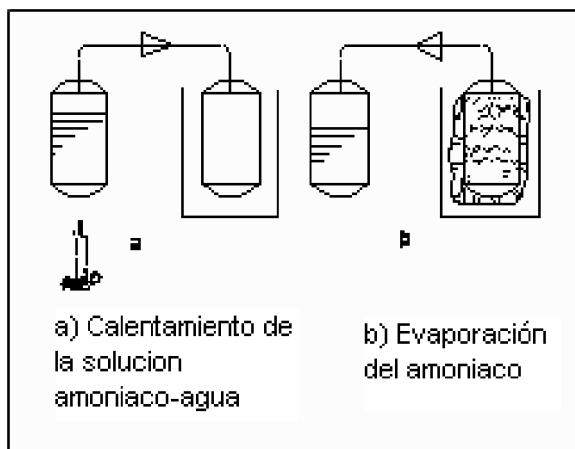
REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN

La refrigeración solar utiliza con gran frecuencia el principio de la refrigeración por absorción. Este fue descubierto accidentalmente por Faraday en 1824, cuando intentaba fabricar amoníaco líquido. La refrigeración por absorción se basa en la variabilidad de la solubilidad de algunas sustancias con respecto a la presión y la temperatura.

En el caso del NH_3 en H_2O a menos temperatura más solubilidad y mayor presión más solubilidad, este comportamiento que se puede aprovechar para enfriar debido a las excelentes características que presenta el amoníaco como refrigerante y que ha hecho que la comunidad científica lo considere como uno de los refrigerantes más ecológicos a emplear. Generalmente se realiza por ciclo intermitente o continuo. [8].

La refrigeración por **absorción ciclo intermitente**, se lleva a cabo en dispositivos que consta de dos recipientes conectados por un tubo. En uno de ellos

Figura 6: Procesos de refrigeración intermitente por absorción:



Fuente: Refrigeration an water pumping, 1982

hay solución agua amoníaco con una concentración dada por la temperatura y presión del montaje. Se calienta la solución haciendo variar la concentración y evaporado y caliente pasa al segundo recipiente. En éste se condensa enfriado con un baño exterior de agua.

En la segunda operación (por ejemplo en la noche) el primer recipiente baja su temperatura aumentando la solubilidad del amoníaco para lo cual se toma NH_3 del recipiente donde se había condensado. Al evaporarse absorbe calor del baño de agua exterior y la congela. Éste tipo de refrigeración recibe calor desde el exterior para funcionar al hacer variar el valor de la concentraciones. Su rendimiento es muy bajo y se estima por

$$\text{Re nd} = \frac{Q_2}{Q_1} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde

Q_2 = calor que se transfiere reversible-mente desde una fuente a temperatura baja, kJ/kg

Q_1 = calor que se transfiere reversible-mente a un sumidero a temperatura alta, kJ/kg

La refrigeración por **absorción ciclo continuo**, integra las dos fases anteriores en un solo aparato. El generador contiene agua y el refrigerante NH_3 . Recibe calor se calienta y desprende así el refrigerante hacia el condensador. El condensador recibe el NH_3 lo enfría con un agente enfriador que por el circula se convierte en líquido y pasa al evaporador. [8].

SISTEMAS DE ADSORCIÓN

En este sistema el adsorbedor es un sólido (Zeolitas) en vez de agua, por ejemplo Zeolita – Metanol y es bastante aplicable en refrigeración solar. [9]

REFRIGERACIÓN SOLAR

La refrigeración solar recibe su denominación de la fuente solar que le da la energía para su funcionamiento. Un refrigerador solar puede ser de compre-

sión o de absorción. En el primero el suministro de trabajo viene de un motor eléctrico cuya corriente es provista por una instalación fotovoltaica que suministre la energía eléctrica para el motor. En el segundo el suministro de calor viene de una instalación solar térmica. Lo que equivale a sustituir en el esquema simple de mostrado anteriormente en la figura 4 la vela por un calentador solar.

La radiación solar es estacional, variable y además depende del clima (figura 7) por lo que las instalaciones solares de refrigeración, si quieren continuar funcionando cuando el sol no aparece, deberán contar con sistemas de acumulación. Para el caso del refrigerador por compresión, un banco de baterías y en el de absorción, aunque es mas difícil, un banco acumulador de calor.

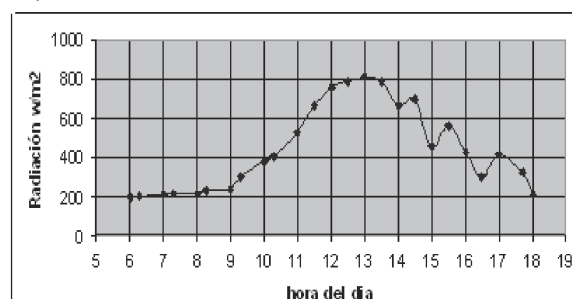
ESQUEMAS DE REFRIGERADORES SOLARES

La energía solar en la refrigeración (figura 8) puede usarse en dos rutas que se pueden combinar entre si [10]: La termodinámica solar y la Conversión fotovoltaica.

La primera utiliza la radiación térmica y la convierte ya sea en trabajo para mover un ciclo de compresión o se usa en calentar para una disolución para cambiar su concentración

La figura 9 muestra un sistema de refrigeración continuo con absorción y bomba con energía fotovoltaica. El refrigerador funciona con el principio de absorción y el motor de la bomba accionada con electricidad mediante

Figura 7. Comportamiento de la radiación solar típica del trópico



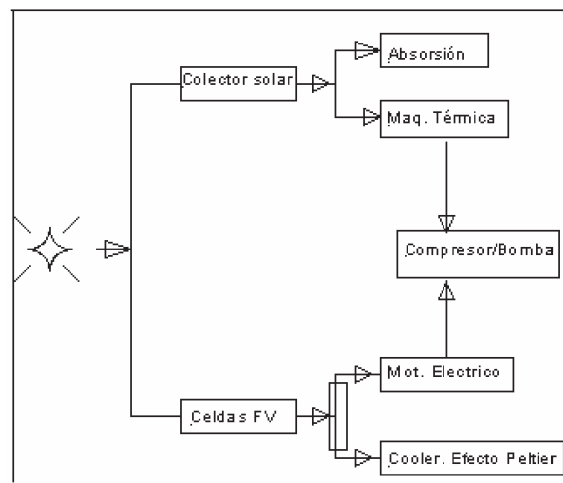
Fuente: Scientia et Técnica, 2005

un arreglo de paneles fotovoltaicos. En ella, se observa el sistema de acumulación y regulación de la parte de electricidad fotovoltaica.

En la figura 10 se ilustra un proyecto que podría funcionar sin suministro de trabajo ni electricidad. La carga de re-frigeración está constituida por el calor que se debe remover para mantener el espacio refrigerado.

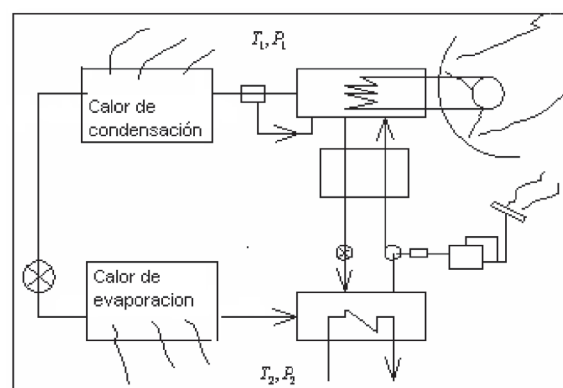
Una parte muy importante es el que se filtra por las paredes por lo que deberán ser construidos con materiales cuya conductividad térmica sea baja de forma que constituyan una barrera térmica suficientemente alta (Resistencia térmica alta) [11] [12]..

Figura 8: Sistemas de refrigeración solar

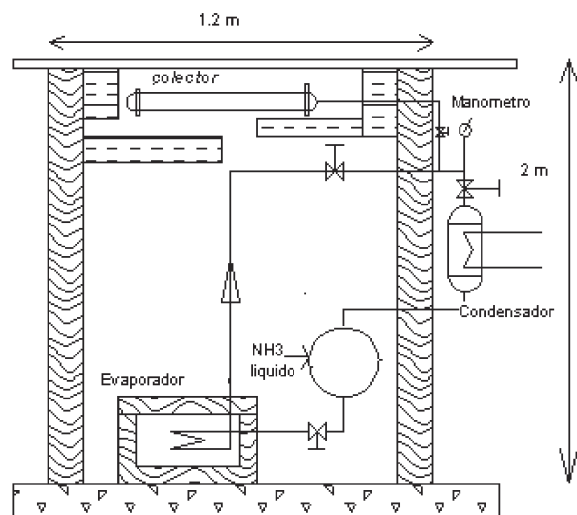


Fuente: Refrigeration an water pumping, 1983

Figura 9: Refrigerador continuo



Fuente: Renewable energy reviews., 2003

Figura 10 Refrigerador solar rural

Fuente Renewable energy reviews, 2003.

El índice de desempeño de un sistema de refrigeración es la relación entre la carga de refrigeración (cantidad de calor removido) y la cantidad de energía invertida desde el exterior para que funcione.

FUENTES DE ENERGIA

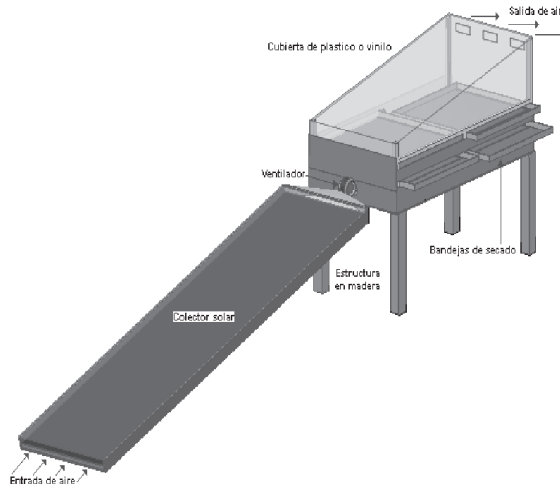
La energía es vital para el sostenimiento y desarrollo de la sociedad, es por ello que se investiga en el desarrollo de fuentes de energía alternativas como la energía solar, biogás, nuclear, eólica, biomasa, con un manejo eficiente de ellas. [13].

Los sistemas de refrigeración requieren para operar una cantidad mínima de energía, es decir, el trabajo mínimo para una refrigeración determinada entre dos regiones de temperatura determinada.

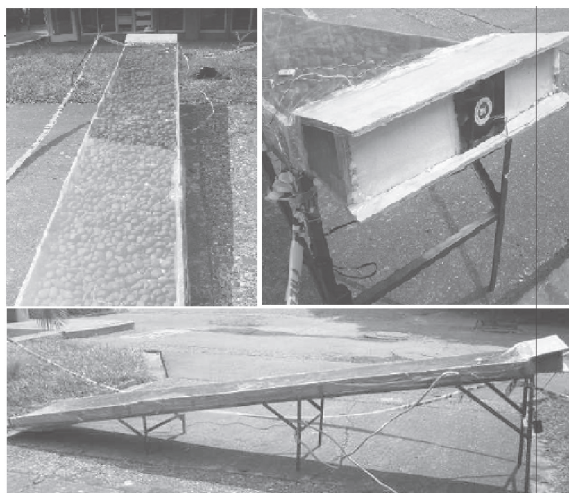
Esto significaría que los requerimientos energéticos a partir de una fuente solar garantizan eficiencia de cualquier dispositivo de refrigeración que puede mejor de acuerdo al tipo de configuración que sean construidas las fuentes externas.

Cualquier refrigerador por absorción necesita una fuente externa de calor para la generación del vapor refrigerante. Fuentes que aprovechan la radiación solar a diferentes horas para accionar refrigeradores son los colectores solares construidos en diversas

configuraciones (figura 11) y los acumuladores generalmente de lecho de rocas (figura 12).

Figura 12. Configuración de colector solar

Fuente: Tecnología química, 2002 *Tecnología química* 22 (2)59-64.

Figura 13. Colector solar de lecho de rocas

Fuente: Grolleaud, M., 2002

CONCLUSIONES

El conocimiento de los fundamentos teóricos de la refrigeración solar, las construcciones experimentales y el modelamiento teórico permitirán el desarrollo de mejores y mas eficientes aparatos

La refrigeración solar tiene todas las facilidades de ser implementada en la geografía nacional colombiana pues

es sencilla y suficientemente conocida con la posibilidad de ser muy barata porque se pueden construir instalaciones con materiales autóctonos [12] con propiedades de transferencia de calor adecuados.

Los sistemas solares de refrigeración pueden ser usados en la climatización de ambientes potenciando el cultivo y crianza de especies, aclimatadas al frío en ambientes cálidos y ampliar la frontera agrícola.

Colombia con radiación solar generosa y constante en el año y una inmensa riqueza biológica y zonas de producción apartadas de las redes de suministro de energía y además de los centros de desarrollo tecnológico, es una alternativa ecológica no solo viable sino urgente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Restrepo, A. H., & Burbano, J. C. (2005). Disponibilidad térmica solar y su aplicación en el secado de granos. *Scientia et Técnica* (27)127 – 132.
- [2] Fonseca, S. & Bergues, C. (2002). Estudio del la cinética del secado de granos en el prototipo de secador solar. Análisis de los resultados. *Tecnología química*22 (2)59-64.
- [3] Grolleaud, M.(2002). Pérdidas post cosecha: un concepto mal definido o mal utilizado. *Documento de la FAO. N°115230*.
- [4] Rodríguez, H., & Gonzalez, F., (1992). Manual de radiación solar en Colombia. *Departamento de física Uni-versidad Nacional de Colombia*.
- [5] Papadopoulos, A. M. & Oxidisis, S, & Kiriakis N. (2003). Perspectives of solar cooling in view of the developments in the air conditioning sector. *Renewable and sustainable energy reviews*. (7) 419- 438.
- [6] The American Society of Heating (1986.), Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc, Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors. The American Society of Heating.
- [7] Worsoe P. (1982). Calcium chloride/ Ammonia solar absorption refrigeration. Solar energy for developing countries. Refrigeration and water pumping. 26--35.
- [8] Cengel Y. A. & Boles A. M.. (1996). Termodinámica. 2da Edición. *Mc Graw Hill*.
- [9] Tchernev.D. I. (1979). Solar refrigeration utilizing zeolites. Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 14th, Boston, Mass., August 5-10, 1979-(2). (A79-51726 23-44) Washington, D.C., American Chemical Society, 1979, p. 2070-2073 .
- [10] Tomkins, R. & Wereko, C. Y. (1982). Solar Refrigeration for developing countries: The prospects. Solar energy for developing countries. Refrigeration and water pumping. 14-25.
- [11] Incropera F. & De Witt D. (1996). Fundamentos de Transferencia de Calor. *Pearson*.
- [12] Cabrera, G., & Muñoz, D., (2007). El fique como aislante térmico. *Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial*5 (1), 9-16.
- [13] Muñoz, D. & Otros, (2004). Termodinámica en la Agroindustria. 1er Edición. Universidad del Cauca.

Copyright of *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* is the property of Universidad del Cauca and its content may not be copied or emailed to multiple sites or posted to a listserv without the copyright holder's express written permission. However, users may print, download, or email articles for individual use.