

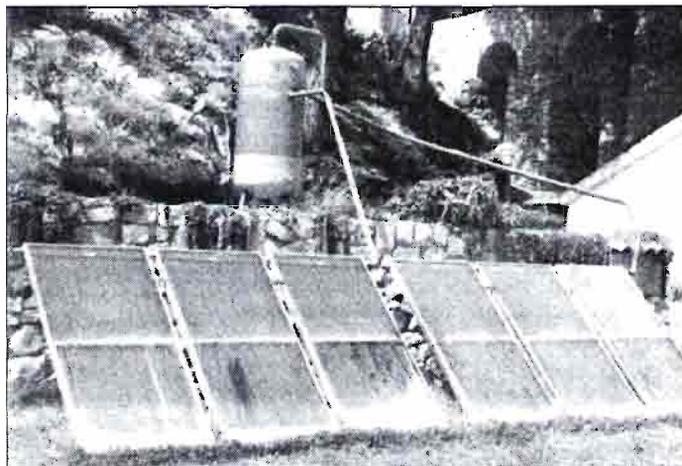
Climatización de edificios agroindustriales por energía solar

por: Miguel Cervantes Villamuelas*
José Manuel Casasbuenas López**

La producción de frío por medio de energía solar es técnicamente posible

“

Estas técnicas se encuentran actualmente en fase de investigación



Area de Energías Alternativas. Paneles solares

Cuanto mayor sea la temperatura exterior, más se puede disminuir la temperatura interior

INTRODUCCION

Siguiendo la línea de actuaciones propuestas en el Plan Energético Nacional que tiene como principal reto el desarrollo de las energías renovables, se quiere hacer una aportación a la diversificación de la energía solar en España, dando a conocer las posibilidades de aplicación de esta energía en la climatización de edificios agroindustriales. El uso de la energía solar para la refrigeración puede parecer en principio una aplicación en contradicción con el aprovechamiento fundamental del sol: el efecto térmico que se utiliza para el calentamiento de agua sanitaria, la calefacción (aplicaciones de baja temperatura) o la generación de electricidad mediante la producción de vapor (aplicaciones de media y alta temperatura). Sin embargo la producción de frío por medio de energía solar es técnicamente posible y por lo tan-

to aplicable en la climatización de edificios.

La aplicación más inmediata del enfriamiento solar es la conservación y almacenamiento de productos perecederos en edificios agroindustriales, en vagones de trenes o en barcos. Una refrigeración no muy intensa, por ejemplo a 5-10°C puede ampliar el tiempo de almacenamiento de frutas y verduras durante semanas e incluso meses. En algunos casos favorables es posible almacenar alimentos de una cosecha hasta la siguiente. Como aspecto que puede retardar la aplicación comercial de estas técnicas, que actualmente se encuentran en fase de investigación, se ha de destacar la situación actual de precios energéticos que sitúa a estas tecnologías por encima del umbral de rentabilidad, ya que como se verá posteriormente, en los meses del invierno la energía solar de baja temperatura no garantiza la refrigeración

(*) Doctor Ingeniero Agrónomo. Departamento de Construcción y Vías Rurales. E.T.S. de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid.

(**) Ingeniero Agrónomo. Departamento de Ingeniería Rural. E.T.S. de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid.

MEDIO AMBIENTE: OTRAS ALTERNATIVAS

del local, debiéndose utilizar un sistema auxiliar convencional o bien recurrir a colectores de vacío o colectores de concentración que son excesivamente costosos y de los que se tienen escasas experiencias en procesos de producción de frío. Estas tecnologías sí pueden ser económicamente rentables en países en vías de desarrollo con clima tropical en los que aún existen zonas aisladas en las que no se dispone de electricidad ni combustibles fósiles. En estos casos particulares el enfriamiento solar podría solucionar graves problemas de conservación de alimentos así como mejorar la calidad de vida de muchos miles de personas.

PRINCIPIOS TERMODINAMICOS DEL ENFRIAMIENTO

La técnica de enfriamiento consiste en la transferencia de una cantidad de calor (Q_1) de un sistema denominado «espacio frío», que está a una temperatura T_1 , a otro sistema denominado «espacio caliente», que está a una temperatura T_2 , mediante la aportación de un trabajo W . Una consecuencia de este proceso es la eliminación de energía en forma de calor (Q_2), hacia el espacio caliente.

Este proceso es el inverso al que se da en las máquinas térmicas, por lo que los aparatos que lo realizan se denominan máquinas inversas y los ciclos que se producen ciclos inversos.

Para evaluar energéticamente una máquina inversa se define el coeficiente de eficiencia (ϵ) como:

$$\epsilon = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_2}{Q_2 - Q_1}$$

ya que por el 1^{er} principio de la termodinámica de cumplirse que $Q_1 + W = Q_2$

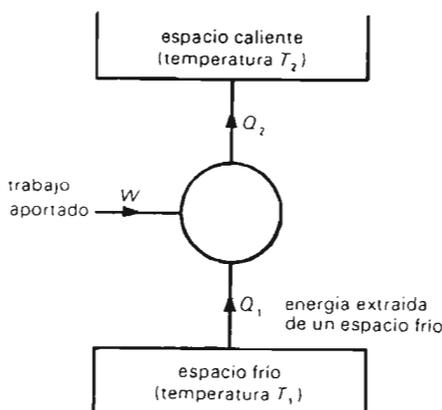


Figura 1: Flujos de calor en una máquina inversa. Tomado de [BRIN-81]

El proceso de refrigeración puede realizarse por cualquier ciclo termodinámico clásico (Carnot, Rankine, etc.) recorrido en sentido inverso.

Mediante razonamientos termodinámicos se puede demostrar que no puede existir una máquina inversa que tenga una eficiencia superior a la que se obtendría en un ciclo inverso de Carnot; en este caso:

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

En un caso normal en que la temperatura del espacio frío estuviera a 5°C y la del espacio caliente a 27°C la eficacia de Carnot sería de 12,6.

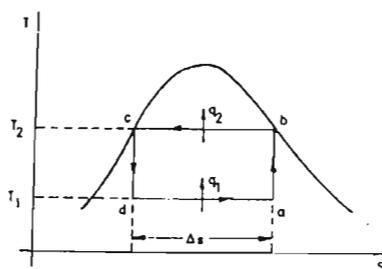


Figura 2: Ciclo inverso de Carnot. Diagrama Temperatura-Entropía.

En la práctica la realización del ciclo inverso de Carnot tiene muchos inconvenientes por la irreversibilidad de los procesos, el rozamiento y la transferencia de calor en distintas partes del sistema. Otra limitación práctica del ciclo inverso de Carnot es que, para que el tamaño de los intercambiadores de calor sea razonable, es necesario que funcionen con una diferencia de temperaturas de 278-283°C por encima o por debajo de las temperaturas de los espacios caliente o frío respectivamente. El resultado de estas limitaciones es que el coeficiente de eficiencia de las mejores máquinas inversas rara vez es mayor de 4.

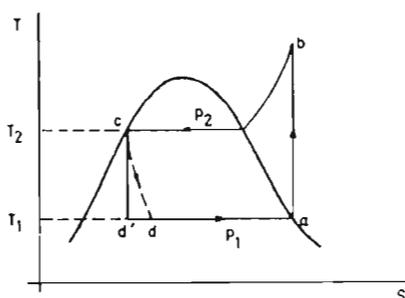


Figura 3a: Ciclo inverso de Rankine. Diagrama Temperatura Entropía.

Los refrigeradores reales funcionan según el ciclo inverso de Rankine utilizando como fluido de trabajo amoníaco (NH_3) o refrigerantes halogenados (los llamados cloro-fluorocarbonados o CFC's). En un refrigerador que funciona según el ciclo inverso de Rankine se dan los siguientes procesos:

1. Compresión isoentrópica del vapor saturado hasta alcanzar la presión de condensación.
2. Condensación isóbara por intercambio de calor con un fluido a temperatura ambiente.
3. Expansión isoentálpica por laminado a través de una válvula de expansión o de un tubo capilar.
4. Vaporización del fluido al producirse la transferencia de calor de la zona a refrigerar.

FUNCIONAMIENTO DE UN CLIMATIZADOR POR MEDIO DE CALOR

Existen máquinas frigoríficas en las que, en lugar de aportar el trabajo para enfriar por medio de un compresor se aporta el valor producido en un generador. Estas máquinas son apropiadas para funcionar por energía solar, ya que se puede utilizar directamente el efecto térmico del sol sin tener que transformar la energía solar en mecánica, para mover un motor que a su vez debería accionar el compresor. Las máquinas inversas que funcionan con calor se conocen como máquinas frigoríficas de gas y funcionan según un ciclo denominado de absorción-vaporización.

El enfriamiento producido por la absorción de vapores y la vaporización de un líquido lo produjo Faraday en 1824 utilizando amoníaco líquido y cloruro de plata.

El funcionamiento de un sistema de absorción-vaporización es el siguiente: en el generador se calienta una disolución que contiene fluido refrigerante (amoníaco u otros) y fluido portador (agua u otros),

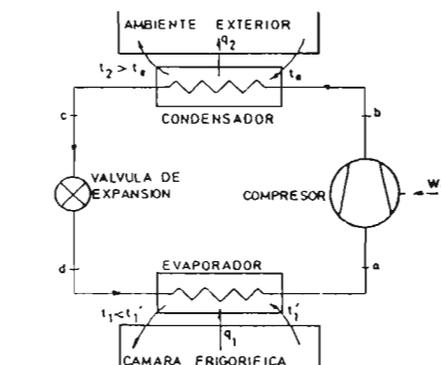


Figura 3b: Refrigerador que realiza el ciclo inverso de Rankine.

separándose el fluido refrigerante en forma de vapor que se licúa en un condensador. Este amoníaco líquido se evapora a baja temperatura tomando calor del espacio a enfriar y los vapores pasan a la cámara de absorción donde se disuelven en agua, pasando esta solución de agua-fluido refrigerante al generador repitiéndose el ciclo. El proceso es posible porque la solubilidad del refrigerante es muy superior a baja temperatura que a alta temperatura.

El coeficiente de eficiencia de estas máquinas se define como:

$$\epsilon = \frac{Q_1}{Q_3} = \frac{\text{Calor absorbido por el fluido refrigerante}}{\text{Calor incidente en el colector}}$$

aplicado a un climatizador de absorción-vaporizador funcionando con energía solar.

Un inconveniente del sistema amoníaco-agua es que necesita para regenerarse una temperatura superior a los 100°C, por lo que parte del agua se evapora con el amoníaco, y cada cierto tiempo se debe volver a introducir agua en la cámara de absorción.

Para evitar estos inconvenientes, se utiliza bromuro de litio que es muy apropiado para funcionar como refrigerante en sistemas de absorción-vaporización. La absorción de vapor de agua con bromuro

de litio puede utilizarse para enfriar el aire de un edificio con el mismo sistema que el descrito anteriormente. La solución de bromuro de litio, diluida en agua se regenera con agua caliente a una temperatura superior a los 77°C pero por debajo del punto de ebullición del agua, a una temperatura suficientemente baja para ser obtenida con un colector de placa plana.

En este punto se debe hacer una consideración sobre el funcionamiento del colector de placa plana: en estos colectores la energía es extraída por medio de un fluido llamado fluido caloportador que recoge el calor producido en el colector y lo transfiere a otro lugar donde se utiliza (en este caso en el generador). Cuanto mayor sea la temperatura de utilización, mayores serán también las pérdidas térmicas y, por tanto, menor la energía útil que el fluido caloportador puede extraer. Puesto que el rendimiento del colector es la relación entre la energía útil y la energía solar incidente, este disminuye a medida que aumenta la temperatura de utilización. De esto se deduce una regla fundamental desde el punto de vista del aprovechamiento energético: la temperatura de trabajo del colector debe ser la más baja que permita la utilización que se le está dando. Esta es la razón de que sea más apropiada la utilización de bromuro de litio que se regenera a 77°C que el de amoníaco que necesita 100°C para su regeneración en el ciclo de

absorción-vaporización, temperaturas que hacen que los colectores de placa plana no sean prácticos y se deban utilizar colectores de concentración o focales que encarecerían considerablemente el precio de la instalación.

CALCULO DE LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE FRIO DE UN EDIFICIO

Supongamos que se desea climatizar un almacén de productos hortofrutícolas en la provincia de Almería. El edificio se puede asimilar a un paralelepípedo de longitud L, altura L/5 y anchura L/3. El almacén se va a climatizar por medio de un refrigerador de absorción-vaporización funcionando con bromuro de litio que va a obtener el calor de una instalación de captación de energía solar formada por colectores solares de placa plana ocupando toda la cubierta del edificio. Para hacer el cálculo supondremos que la energía que se transmite por unidad de superficie de muro exterior es igual a la energía que el sistema de refrigeración puede extraer del edificio. Por lo tanto deberemos calcular en primer lugar la cantidad de calor que se puede transferir a través de los muros del edificio y en segundo lugar la cantidad de calor que el sistema de refrigeración puede extraer por día y m² de colector.

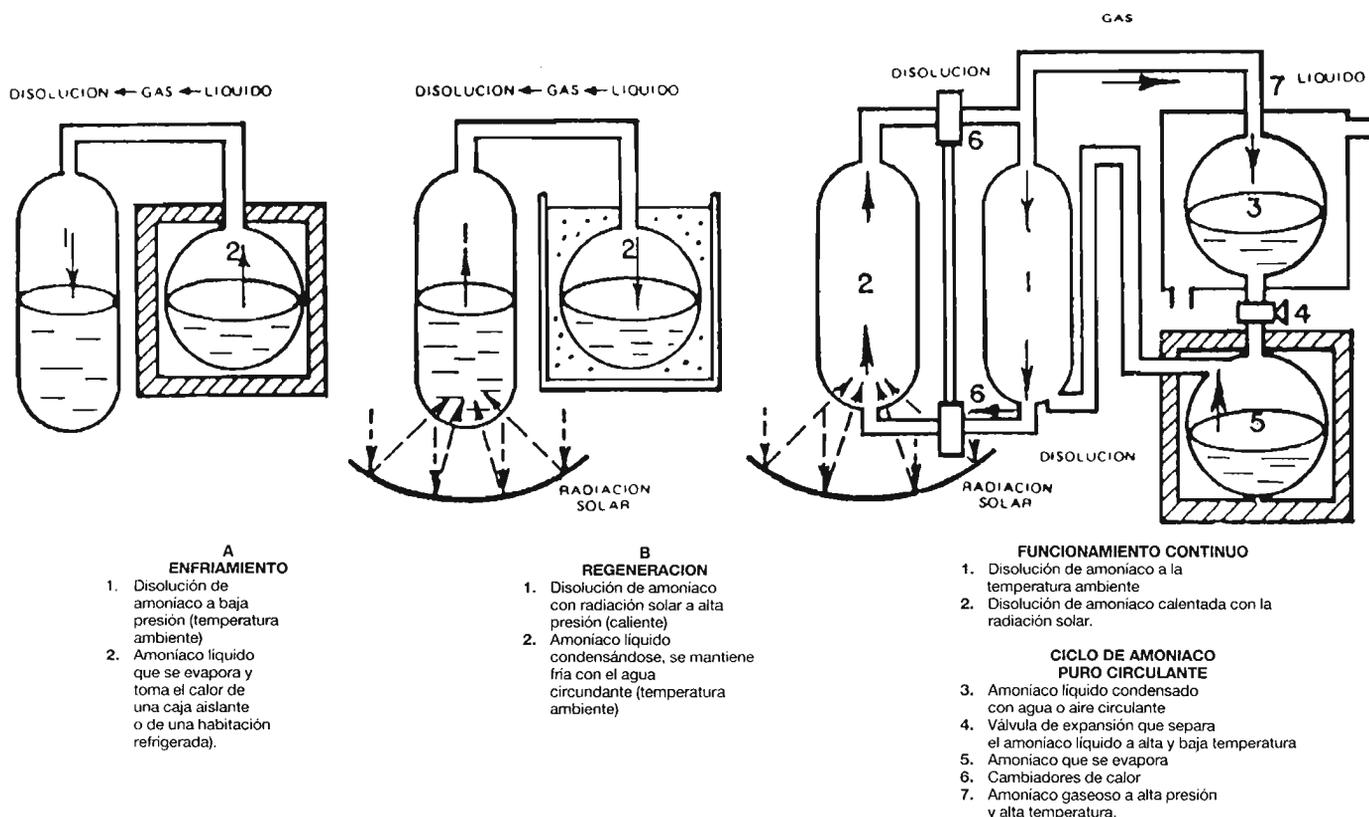


Figura 4: Enfriamiento por un ciclo de absorción-vaporización. Tomado de [FARR-77].

MEDIO AMBIENTE: OTRAS ALTERNATIVAS

Cálculo de la energía que se transmite por unidad de superficie de muro

La cantidad de calor que se transfiere a través de los muros de un edificio depende de la diferencia entre las temperaturas del aire en el exterior y en el interior, de la conductividad térmica de los muros y del carácter de la convección del aire que se produce en cada lado. Si agrupamos estos efectos en un coeficiente global de transferencia de calor U tendremos que la expresión que da la cantidad de energía que se transmite por unidad de superficie de muro es:

$$q = k\Delta T \text{ (W/m}^2\text{)}$$

donde ΔT es la diferencia entre las temperaturas exterior y la interior. Un valor razonable que se puede dar a U es $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$, por lo que la transferencia diaria de energía total en el edificio será:

$$q = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot \Delta T \text{ (K)} \cdot 8/15 \text{ L}^2 \text{ (m}^2\text{)} \cdot 24 \text{ h/día} \\ = 12,8 \cdot \Delta T \cdot \text{L}^2 \text{ (Wh/día)}$$

donde $8/15 \text{ L}^2$ es la superficie exterior de los muros ($2 \cdot L \cdot 5 + 2 \cdot L \cdot 3 \cdot L/5$)

Cálculo de la cantidad de calor que se puede extraer por día y m^2 de colector

Dado que la energía incidente por m^2 de superficie horizontal varía mes a mes, este cálculo se debe hacer para cada mes del año procediendo de la siguiente forma:

1. En primer lugar se calcula la energía incidente por m^2 de superficie horizontal (E_i) en un día medio del mes. A partir de (E_i) calcularemos la energía disponible (E_d) teniendo en cuenta que las pérdidas entre E_i y E_d son de un 6% aproximadamente. Si se supone que la superficie de captación tiene una inclinación de 47° (Latitud + 10°), también se corregirá la E_i por inclinación en un factor k; siendo: $E_d = 0,96 E_i k$.

2. A continuación se calcula intensidad útil de energía $1 \text{ (W/m}^2\text{)}$ como el cociente entre E_d y el número medio de horas de sol por día (n). Este valor forma parte de la ecuación del rendimiento del colector.

3. A partir de la curva de rendimiento teórico, suministrada por el fabricante del colector, se calculará el rendimiento real teniendo en cuenta que:

- Existe una corrección por la inclinación de los rayos solares que hace disminuir la absorptancia (α) de la placa absorbente, tomándose un factor experimental de 0,97.
- El efecto de la suciedad y el envejeci-

miento de la cubierta hace que la transmitancia (τ) también disminuya por término medio en un factor de 0,97.

Como los coeficientes τ y α se engloban en el primer término de la ecuación de rendimiento, para calcular el rendimiento real se multiplicará este primer término por $0,97 \times 0,97 = 0,94$. En este caso se ha elegido un colector con la siguiente curva de rendimiento teórico:

$$\eta_t (\%) = 100 \cdot [0,85 - 5,89 (t_m^0 - t_a^0) / I]$$

y el rendimiento real será:

$$\eta_r (\%) = 100 \cdot [0,799 - 5,89 (t_m^0 - t_a^0) / I]$$

siendo t_m^0 y t_a^0 las temperaturas medias del fluido caloportador y del ambiente diurno respectivamente.

4. Una vez conocidos la energía disponible y el rendimiento real, la energía aportada por m^2 de colector será $E_a = E_d \eta_r$. Esta energía aportada no coincide con la que extrae el sistema de refrigeración debido a las pérdidas que se producen en los elementos que componen la instalación. Experimentalmente se pueden estimar unas pérdidas globales del 25% con lo que la energía extraíble será $E_e = 0,75 E_a$.

Cálculo de la capacidad de enfriamiento del sistema

Se calculará igualando para cada mes

TABLA 1:
Cálculo de la capacidad de refrigeración de un sistema de absorción-vaporización funcionando con energía solar en la ciudad de Almería.

	E_i MJ/m ² día	k (L,i)	E_d MJ/m ² día	n (h)	I W/m ²	t_{uso} °C
Ene	8,9	1,35	11,29	8,0	392,16	80
Feb	12,2	1,25	14,34	9,0	442,44	80
Mar	16,4	1,11	17,11	9,0	528,14	80
Abr	19,6	0,98	18,06	9,5	527,94	80
May	23,1	0,88	19,11	9,5	558,72	80
Jun	24,6	0,85	19,66	9,5	574,72	80
Jul	25,3	0,88	20,93	9,5	611,93	80
Ago	22,5	0,99	20,94	9,5	612,24	80
Sep	18,5	1,15	20,00	9,0	617,24	80
Oct	13,9	1,34	17,51	9,0	540,38	80
Nov	10	1,46	13,72	8,0	476,53	80
Dic	8,0	1,45	10,90	7,5	403,85	80

	$t_{ambiente}$ °C	$\eta_{teórico}$ %	η_{real} %	E_a MJ/m ² día	E_e kJ/m ² día	Δt K
Ene	15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Feb	15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mar	16	13,63	8,53	1,46	1094,09	7,91
Abr	18	15,83	10,73	1,94	1452,90	10,51
May	21	22,80	17,70	3,38	2537,03	18,35
Jun	24	27,61	22,51	4,42	3318,10	24,00
Jul	27	33,99	28,89	6,05	4534,04	32,80
Ago	28	34,97	29,87	6,26	4691,31	33,94
Sep	26	33,47	28,37	5,67	4255,24	30,78
Oct	22	21,78	16,68	2,92	2190,57	15,85
Nov	18	8,37	3,27	0,45	337,55	2,43
Dic	16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

la energía que se transmite por unidad de superficie de muro con la energía que es capaz de extraer el sistema del interior del almacén. Se obtiene una ecuación en la que la única incógnita es Δt , es decir, la diferencia de temperaturas entre el edificio y el medio ambiente exterior.

$$E_e (\text{Wh/m}^2\text{día}) \cdot 1/3 L^2 (\text{m}^2) = 12,8 \cdot \Delta T \cdot L^2 (\text{Wh/día})$$

donde $1/3 L^2$ es la superficie de la cubierta ($L \cdot 1/3 L$)

Los resultados obtenidos para este caso se exponen en la tabla 1. Los valores necesarios para el cálculo han sido extraídos de [INST-92].

De la tabla 1 se sacan las siguientes conclusiones:

1. El enfriamiento con energía solar se puede conseguir durante 8 meses al año, debiendo utilizarse para los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre un sistema de aportación de calor auxiliar que puede proceder de un calentador de gas.
2. Este sistema tiene la ventaja de que

con él la extracción de calor es directamente proporcional a la temperatura ambiente, es decir, cuanto mayor es la temperatura exterior, más se puede disminuir la temperatura del almacén.

3. El enfriamiento por absorción-vaporización no es válido para obtener temperaturas por debajo de 0°C , que permitan la congelación de alimentos. En este caso es necesario utilizar como fluido de trabajo amoníaco o CFC's y cambiar los colectores de placa plana por colectores parabólicos o de concentración que encarecerían notablemente la instalación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[BRIN-81] Brinkworth, B.J. *Energía solar para el hombre*. H. Blume Ediciones. 1981.

[CAMP-83] Camps, M. y Ortiz-Cañavate, J. *Termodinámica para ingenieros*. E.T.S. de Ingenieros Agrónomos. U.P. de Madrid. 1983.

[CAMP-86] Camps, M. y Ortiz-Cañavate, J. *Cien problemas de termodinámica para ingenieros*. E.T.S. de Ingenieros Agrónomos. U.P. de Madrid. 1986.

[FARR-77] Farrington, D. *Uso directo de la energía solar*. H. Blume Ediciones. 1977.

[IDAE-92] Varios autores. *Energía solar térmica*. Instituto para la diversificación y el ahorro de la energía. Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. 1992.

[INST-92] Varios autores. *Instalaciones de energía solar. Tomo II. Energética solar*. Editorial Progenza. 1992.

[INS1-92] Varios autores. *Instalaciones de energía solar. Tomo III. Sistemas de aprove-*

chamiento térmico I. Editorial Progenza. 1992.

[INST-89] Varios autores. *Instalaciones de energía solar. Tomo IV: Sistemas de aprovechamiento térmico II*. Editorial Progenza. 1989.

[KIRI-86] Kirillin, V.A.; Sichev, V.V. y Sheindlin, A.E. *Termodinámica técnica*. Editorial Mir Moscú. 1986.

[STE-78] Steadman, P. *Energía, medio ambiente y edificación*. H. Blume Ediciones. 1978.



PUBLICACIONES SOBRE "MEDIO AMBIENTE"



LIBROS

LIBROS



PLANIFICACIÓN RURAL
Domingo Gómez Orea
400 páginas
3.000 pesetas



EVALUACION DE IMPACTO
(2ª Edición, corregida y aumentada)
Autor: Domingo Gómez Orea
264 páginas
2.800 pesetas



IMPRO: UN MODELO INFORMATIZADO PARA EVALUACION DE IMPACTO AMBIENTAL
D. Gómez, J. Aguado
T. Villarín, G. Escobar,
M. Herrera y C. Bárcenas
200 páginas - 2.500 pesetas



AUDITORIA AMBIENTAL
Un instrumento de gestión de la empresa
Autores:
Domingo Gómez Orea y
Carlos de Miguel



ORDENACION DEL TERRITORIO
Una aproximación desde el medio físico
Autor: Domingo Gómez Orea
(Coedición con el Instituto Tecnológico Geominero de España)
240 páginas - 4.500 pesetas

Agricultura

EDITORIAL AGRÍCOLA ESPAÑOLA, S.A.

Caballero de Gracia, 24, 3.º izqda. - Teléfono 521 16 33 - Fax: 522 48 72 Madrid 28013

**PEDIDOS A NUESTRA EDITORIAL
VENTA AL PUBLICO EN LIBRERIAS**