

# Ahorro y Eficiencia Energética

## en Invernaderos



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO



Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía



*Agricultura*

# Ahorro y Eficiencia Energética

## en Invernaderos

Ahorro y Eficiencia Energética en la Agricultura 



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO



Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

## **TÍTULO**

Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos

## **CONTENIDO**

Esta publicación ha sido redactada por Diego L. Valera, Francisco D. Molina y Antonio J. Álvarez de la Universidad de Almería con la colaboración del Departamento de Biomasa del CENER para el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).

.....  
Esta publicación está incluida en el fondo editorial del IDAE, en la serie “Ahorro y Eficiencia Energética en la Agricultura”.

Cualquier reproducción, total o parcial, de la presente publicación debe contar con la aprobación del IDAE.

Depósito Legal: M-26380-2008

ISBN: 978-84-96680-25-8  
.....

## **IDAE**

**Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía**

**c/ Madera, 8**

**E - 28004 - Madrid**

**comunicacion@idae.es**

**www.idae.es**

Madrid, abril 2008

# Índice

Página

<b>Prólogo</b> . . . . .	<b>5</b>
<b>Introducción</b> . . . . .	<b>7</b>
<b>1 Necesidades energéticas</b> . . . . .	<b>11</b>
1.1 Situación actual . . . . .	11
1.2 Cálculo de las necesidades energéticas. . . . .	11
1.2.1 Condiciones meteorológicas que influyen en las necesidades energéticas . . . . .	12
1.2.2 Condiciones climáticas favorables para los cultivos en invernadero . . . . .	12
1.2.3 Cálculo del balance energético en un invernadero . . . . .	13
1.2.4 Casos prácticos de balance energético . . . . .	13
<b>2 Técnicas de ahorro energético</b> . . . . .	<b>19</b>
2.1 Mejora del aislamiento térmico de los invernaderos. . . . .	19
2.1.1 Pantallas térmicas . . . . .	19
2.1.2 Invernaderos con paredes dobles . . . . .	21
2.1.3 Microtúneles. . . . .	22
2.1.4 Aumento de la hermeticidad del invernadero . . . . .	22
2.1.5 Compartimentación del invernadero . . . . .	23
2.1.6 Cortavientos. . . . .	23
2.2 Mejora de la eficiencia energética en la generación de calor . . . . .	23
2.2.1 Aumento del rendimiento de la combustión . . . . .	24
2.2.2 Quemadores de funcionamiento fraccionado . . . . .	25
2.2.3 Recuperación de calor en los humos de escape . . . . .	25
2.2.4 Instalación de turbuladores . . . . .	26
2.2.5 Aislamiento del sistema de calefacción . . . . .	26
2.2.6 Mantenimiento de los sistemas de calefacción . . . . .	26
2.3 Mejora del control de la emisión del calor y de los sistemas de distribución. . . . .	27

2.3.1	Control de la temperatura de calefacción. . . . .	.27
2.3.2	Ventiladores desestratificadores . . . . .	.27
2.3.3	Bombas de impulsión de caudal variable. . . . .	.28
2.4	Optimización del funcionamiento de las calderas . . . . .	.28
2.4.1	Instalación de dos calderas . . . . .	.28
2.4.2	Depósitos de agua para almacenamiento térmico. . . . .	.29
2.5	Mejora de la eficiencia de los generadores de aire caliente de combustión indirecta . . . . .	.29
2.5.1	Intercambiadores de calor . . . . .	.29
2.5.2	Mangas de polietileno . . . . .	.30
2.6	Aumento de la superficie útil del invernadero mediante la instalación de bancos móviles. . . . .	.30
2.7	Iluminación. . . . .	.30
2.7.1	Tipo de iluminación . . . . .	.31
2.7.2	Gestión de la iluminación . . . . .	.32
2.7.3	Recomendaciones para mejorar la eficiencia en la iluminación . . . . .	.33
2.8	Refrigeración. . . . .	.33
2.8.1	Sistemas de ventilación natural . . . . .	.33
2.8.2	Sistemas de ventilación forzada. . . . .	.34
2.8.3	Sistemas de refrigeración por evaporación de agua. . . . .	.35
2.9	Factores que influyen en las inversiones en tecnologías de ahorro energético . . . . .	.36
<b>3</b>	<b>Aplicación de energías renovables en los invernaderos . . .</b>	<b>37</b>
3.1	Energía solar . . . . .	.37
3.1.1	Energía solar para el precalentamiento del agua de calefacción . . . . .	.37
3.1.2	Energía solar fotovoltaica para invernaderos . . . . .	.39
3.1.3	Ejemplo de instalación de energía solar fotovoltaica para generación de energía eléctrica en el invernadero nº 1 . . . . .	.39
3.2	Uso de calderas de biomasa en invernaderos . . . . .	.39
3.2.1	Biomosas comercializadas como combustible. . . . .	.40
3.2.2	Calderas de biomasa para calefacción . . . . .	.41
3.2.3	Caso práctico . . . . .	.44
3.3	Uso de energía geotérmica para la climatización de invernaderos . . . .	.47
	<b>Reglas Clave . . . . .</b>	<b>48</b>
	<b>Anexo: Cálculo a través de expresiones matemáticas del balance energético en un invernadero . . . . .</b>	<b>49</b>
1.2.4	Análisis del sistema de calefacción . . . . .	.55
1.2.5	Calor eliminado por nebulización . . . . .	.57
	<b>Bibliografía . . . . .</b>	<b>59</b>

# Prólogo

A mediados de los años ochenta diversos científicos comenzaron a detectar un paulatino aumento de la temperatura de la Tierra. La principal causa era la concentración de ciertos gases en la atmósfera, sobre todo de anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ), que estaban produciendo un aumento de la absorción en la atmósfera de las radiaciones infrarrojas emitidas por la superficie terrestre, impidiendo su salida al espacio exterior y aumentando, como consecuencia, la temperatura media del planeta. Este fenómeno fue denominado efecto invernadero por la similitud con el proceso originado dentro de los invernaderos agrícolas, que emplean materiales de cubierta con muy poca transmisividad a la radiación infrarroja.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) ha señalado que este efecto invernadero además de producir un clima global más cálido, también lo hace más inestable, incrementando la frecuencia de los fenómenos meteorológicos más adversos (inundaciones, huracanes, tornados, etc.). Desde un punto de vista medioambiental, las principales consecuencias a largo plazo serían la subida del nivel del mar y el aumento generalizado de las temperaturas, que agravarían aún más los problemas de suministro de agua en muchas zonas del planeta y conllevaría la desaparición de numerosas especies vegetales y animales.

Son muchas las teorías más o menos catastrofistas que reproducen lo que puede ocurrir en los próximos años de seguir con esta tendencia de incremento de acumulación del  $\text{CO}_2$  en la atmósfera.

También son varios los intentos de conseguir acuerdos mundiales con el objeto de atajar este incremento consiguiendo a la vez no frenar el desarrollo económico de los países.

La reducción de emisiones de  $\text{CO}_2$  va asociada generalmente a un menor consumo de combustibles fósiles, combustibles utilizados para la obtención de energía. Por lo tanto, hay que buscar los caminos para disminuir este consumo de combustibles fósiles sin frenar la producción de energía necesaria para el desarrollo económico de un país. Existen a priori dos caminos para frenar esta cadena de incremento de emisiones

de CO<sub>2</sub>: producir la energía mediante fuentes renovables y reducir la demanda energética mediante el uso de equipos, técnicas y desarrollo más eficientes.

El IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) tiene un conjunto de actuaciones encaminadas al ahorro de energía y a la diversificación energética a través de fuentes renovables. Estas medidas están agrupadas en el Plan de Energías Renovables 2005-2010 y en la Estrategia de Eficiencia Energética en España desarrollada mediante sus Planes de Acción 2005-2007 y 2008-2012.



En estos Planes de Acción, como una de las primeras medidas a favor del ahorro y la eficiencia energética, se prevé la realización de medidas de formación e información de técnicas de uso eficiente de la energía en la agricultura, con el fin de introducir y concienciar a los agentes del sector sobre la importancia del concepto de eficiencia energética.

Conscientes de que el agricultor puede tener una incidencia en el ahorro energético consiguiendo paralelamente un ahorro económico para su explotación, el IDAE, siempre contando con la colaboración del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, está realizando una serie de acciones en materia de formación, información y difusión de técnicas y tecnologías de eficiencia energética en el sector. Una de estas acciones es el desarrollo de una línea editorial en materia de eficiencia energética en el sector agrario mediante la realización de diversos documentos técnicos, como el que se presenta, donde se explican los métodos de reducción del consumo de energía en la diferentes tareas agrícolas.

En este sentido, ya se han publicado y están disponibles en nuestra página web ([www.idae.es](http://www.idae.es)), los ocho primeros documentos de esta línea editorial:

- Documento especial (coeditado con el MAPA): “Consumos Energéticos en la Operaciones Agrícolas en España”.
- Tríptico promocional: “Medidas de Ahorro y Eficiencia Energética en la Agricultura”.
- Documento nº 1: “Ahorro de Combustible en el Tractor Agrícola”.
- Documento nº 2: “Ahorro y Eficiencia Energética en Agricultura de Regadío”.
- Documento nº 3: “Ahorro y Eficiencia Energética en Instalaciones Ganaderas”.
- Documento nº 4: “Ahorro, Eficiencia Energética y Sistemas de Laboreo Agrícola”.
- Documento nº 5: “Ahorro, Eficiencia Energética y Estructura de la Explotación Agrícola”.
- Documento nº 6: “Ahorro, Eficiencia Energética y Fertilización Nitrogenada”.

Desde IDAE trabajamos activamente para la mejora de la eficiencia energética, y pensamos que la agricultura debe incorporar en su desarrollo y gestión la eficiencia energética como un criterio básico para su viabilidad. De esta forma, además de reducir la emisión de contaminantes estamos mejorando la competitividad de nuestras instalaciones por el ahorro del combustible realizado.

Es de vital importancia que los programas públicos de apoyo incorporen la eficiencia energética como un elemento prioritario, partiendo de la formación de formadores y agentes, y primando aquellos equipos más eficientes.

# Introducción

Las investigaciones sobre el efecto invernadero concluyen que la principal fuente de emisión de los gases causantes de este fenómeno (vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxidos de nitrógeno, ozono y clorofluorocarburos) es la quema de combustibles fósiles, es decir, carbón, petróleo y gas natural. Sin embargo, estos recursos actualmente son imprescindibles, por lo que es necesario explotarlos y consumirlos de la forma más eficiente posible, para poder seguir manteniendo los actuales niveles productivos.

El IDAE actualmente está aplicando el Plan de Acción 2008-2012 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España, que supone medidas de control en cuanto al consumo de energía no sólo para la industria, sino también para las explotaciones agrícolas, y particularmente en los invernaderos. Se trata de aunar esfuerzos para cumplir el Protocolo de Kioto, que adjudica a nuestro país un margen de crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero del 15% para el periodo 2008-2012 respecto a 1990, porcentaje que España ya ha superado ampliamente.

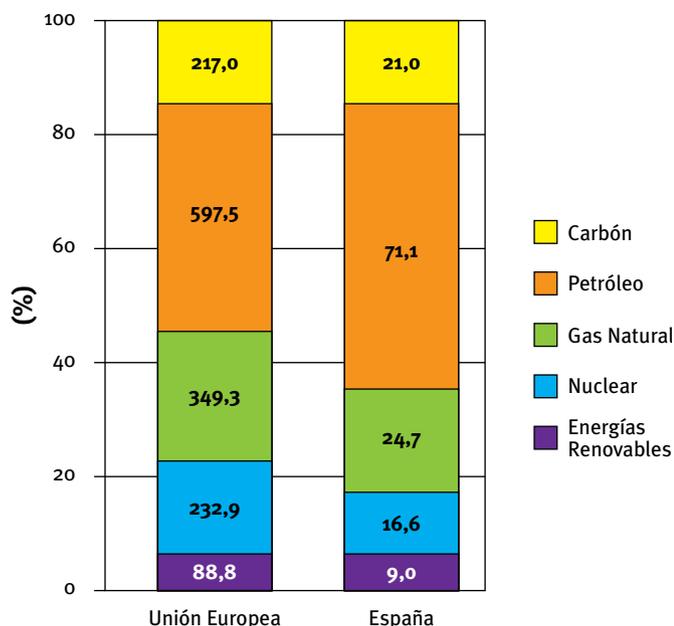
El Plan de Acción 2008-2012 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012 tiene como objetivo la consecución de un ahorro de casi 83 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep). Esta cifra es equivalente al 52% del total del consumo de energía primaria previsto para el año 2008 y teniendo en cuenta que las importaciones de petróleo en dicho periodo se estiman en 435 millones de barriles, el objetivo del Plan supondría el 140% de estas importaciones (608 millones de barriles).

Dicho Plan de Acción va a contribuir, además, a la mejora de la competitividad de la economía española al llevar aparejado la incorporación a los procesos productivos de equipos tecnológicamente más avanzados, que posibilitan un mejor posicionamiento de nuestras empresas en los mercados internacionales.

Según las previsiones del Plan de Energías Renovables 2005-2010 (PER) el consumo de energía primaria abastecido por las energías renovables pasará del 6,9% en 2004 al 12,1% en el año 2010. El Plan ha sido

elaborado con el propósito de reforzar los objetivos prioritarios de la política energética del Gobierno, que son la garantía de la seguridad y calidad del suministro eléctrico y el respeto al medio ambiente, y con la determinación de dar cumplimiento a los compromisos de España en el ámbito internacional (Protocolo de Kioto, Plan Nacional de Asignación), y a los que se derivan de nuestra pertenencia a la Unión Europea.

**Figura 1. Estructura del consumo de energía primaria por fuentes en Mtep (2005).**



El fuerte crecimiento de la intensidad energética de los últimos años ha sido una razón adicional de peso a la hora de elaborar este nuevo Plan, cuya puesta en marcha, conjuntamente con los Planes de Acción 2005-2007 y 2008-2012 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética, han de permitir reducir nuestros consumos de energía y aminorar nuestra dependencia energética del exterior, al tiempo que contribuirán de manera esencial a reducir la contaminación.

Por otro lado, el sector de los cultivos forzados en invernadero está sumido en un continuo progreso motivado, por un lado, por la aplicación de nuevas normativas de calidad y medioambientales, y por otro, por la propia reestructuración del sector para mejorar su competitividad de cara a mantenerse en el mercado actual.

La superficie invernada en la Unión Europea está en constante ascenso, y en determinadas zonas como el Sureste de España tiene una importancia socioeconómica muy relevante. El consumo energético en los invernaderos es un factor muy importante a considerar dentro de los costes de producción, de ahí que se considere prioritaria la optimización energética de estos sistemas. Por otra parte, optimizando el consumo de energía se facilitará el cumplimiento de las regulaciones ambientales y energéticas, cada vez más restrictivas, que afectan al sector, logrando unos invernaderos más amigables con el medio ambiente a la vez que competitivos en el mercado europeo.

Además, un consumo desmedido de la energía no sólo repercute negativamente en el medio ambiente, sino que también influye negativamente en el balance económico de las explotaciones agrícolas y en la imagen que el sector transmite a la sociedad. De hecho, el gasto medio de los invernaderos en energía ha crecido en los últimos años, en gran parte debido a un uso poco eficiente de ella. Se hace necesario reducir el consumo mejorando la eficiencia y utilizar fuentes de energía respetuosas con el medio ambiente.

En esta publicación se indican las necesidades energéticas de un invernadero para, a continuación, presentar una serie de medidas concretas que permitan mejorar el ahorro y la eficiencia energética del mismo, así como la posibilidad de utilizar energías renovables en estos agrosistemas.

## Medidas a desarrollar para mejorar la eficiencia energética

Para contribuir a la mejora de la eficiencia energética, deberán considerarse una serie de factores directamente implicados:

- Las condiciones climáticas de la región.
- Las particularidades locales de la zona.
- Las necesidades climáticas en el interior de los invernaderos según cultivos, variedades, época del año y estado fisiológico de las plantas.
- La relación coste-eficacia de las inversiones en los equipos de control climático en los invernaderos.

Las recomendaciones para dicha mejora estarán basadas en una combinación de normas de construcción y equipamiento de los invernaderos: materiales de construcción, aislamientos, ventilación, calefacción e iluminación principalmente, de tal forma que se pueda garantizar un funcionamiento integrado de los diferentes sistemas sin que el funcionamiento de alguno de ellos suponga un derroche de energía.

Los aspectos básicos sobre los que se incide y que se consideran más importantes para contribuir al ahorro y eficiencia energética, son los siguientes:

- ✓ Aislamiento y estanqueidad adecuados de los invernaderos.
- ✓ Regulación correcta de los equipos de climatización.
- ✓ Iluminación eficiente.
- ✓ Revisión y mantenimiento de los equipos.
- ✓ Aplicación de energías renovables para la generación de calor.



# 1 Necesidades energéticas

---

## 1.1 Situación actual

La demanda energética de un invernadero depende de la relación entre las condiciones climáticas exteriores y las necesidades ambientales de los cultivos dentro del invernadero. El control climático mejora el confort de las plantas y ayuda a conseguir los objetivos productivos del invernadero.

Los sistemas de calefacción y refrigeración se usan para controlar la temperatura interior. Su objetivo es el de lograr valores de humedad y temperatura lo más cercanos posibles a los óptimas de producción. En la actualidad, en el sector de los semilleros e invernaderos para flores y plantas ornamentales, está muy extendida la utilización de técnicas constructivas y de control climático eficientes por la elevada sensibilidad de su producción a las condiciones ambientales.

Debido a las características productivas del sector hortícola, las medidas de climatización y aislamiento no están tan extendidas. En general, las especies hortícolas no son tan sensibles a las fluctuaciones térmicas como los cultivos ornamentales o florales, y durante casi todo el año pueden cultivarse en invernaderos con ventilación natural como único sistema de climatización.

El material de cubierta utilizado es uno de los factores que influyen de forma decisiva en las necesidades de calefacción o refrigeración de las plantas cultivadas en los invernaderos. Igualmente tienen importancia la propia refrigeración que proporcionan estas mismas plantas a través de su transpiración y el calor que entra o sale a través de los sistemas de ventilación.

Con el objeto de estimar las necesidades de calefacción o refrigeración en un invernadero, se ha realizado un estudio basado en el principio del balance de energía.

## 1.2 Cálculo de las necesidades energéticas

Resolver la ecuación del balance de energía en un invernadero permite conocer, entre otros, los parámetros de consumo y la potencia de calefacción ( $Q_{ca}$ )

o de refrigeración ( $Q_{ref}$ ) a instalar, la respuesta del invernadero en situaciones meteorológicas críticas, etc.

### 1.2.1 Condiciones meteorológicas que influyen en las necesidades energéticas

En el cálculo de las necesidades de climatización del invernadero ( $Q_{cli}$ ) intervienen tanto las condiciones climáticas a las que está expuesto el invernadero como las condiciones climáticas que es necesario mantener en su interior para el correcto desarrollo de los cultivos. Los principales datos climáticos que caracterizan el clima de una zona son los siguientes:

- Intensidad máxima de radiación solar
- Temperatura y humedad exteriores
- Dirección y velocidad media del viento

El principal parámetro en el balance energético de un invernadero es la temperatura exterior, que determina de forma directa las necesidades de refrigeración y calefacción. Existen diferentes valores de temperatura exterior que se pueden utilizar en el diseño de los sistemas de climatización. Los principales valores de temperatura exterior que se pueden considerar son:

- Temperatura media mensual del mes más cálido
- Temperatura media de las máximas diarias del mes más cálido
- Temperatura máxima absoluta del año
- Temperatura media mensual del mes más frío
- Temperatura media de las mínimas mensuales
- Temperatura mínima absoluta del año

### 1.2.2 Condiciones climáticas favorables para los cultivos en invernadero

La temperatura del aire que se debe mantener dentro del invernadero depende del tipo de cultivo que se desarrolla en su interior, del nivel de confort deseado y de su estado de crecimiento (Tabla 1).

**Tabla 1. Valores de temperatura adecuados para varios cultivos hortícolas en invernadero.** (Tesi, 2001)

Especie	Temp. mínima letal	Temp. mínima biológica	Temp. óptima		Temp. máxima biológica
			Noche	Día	
Tomate	(-2) a 0	8-10	13-16	22-26	26-30
Pepino	0	10-13	18-20	24-28	28-32
Melón	0	12-14	18-21	24-30	30-34
Judía	0	10-14	16-18	21-28	28-35
Pimiento	(-2) a 0	10-12	16-18	22-28	28-32
Berenjena	(-2) a 0	9-10	15-18	22-26	30-32

Estos valores sirven como base para establecer las consignas de funcionamiento de los sistemas de climatización, además de para calcular su potencia de diseño a través del balance de energía. Los valores de consigna de los sistemas de calefacción suelen variar en función del periodo del día, así como según el cultivo (Tabla 2). En el diseño se deben considerar las condiciones de funcionamiento más restrictivas, por lo que la calefacción se diseñará para satisfacer las necesidades de calor durante las noches invernales.

**Tabla 2. Temperaturas de consigna de la calefacción utilizadas para varios cultivos.** (Urban, 1997)

Especie	Temperatura de calefacción del aire	
	Noche	Día
Tomate	17,5-20 °C	18,5-20 °C
Pepino	19-21 °C	21-23 °C
Pimiento	18-20 °C	22-23 °C
Berenjena	19-21 °C	21-22 °C

Las necesidades energéticas del invernadero dependen fundamentalmente del salto térmico, es decir, la diferencia entre la temperatura interior y exterior que se desea mantener (Tabla 3).

**Tabla 3. Potencia instalada media y necesidades de calefacción en función del gradiente térmico.** (FAO, 2002)

Salto térmico ( $T_i - T_e$ )	Potencia caldera ( $W \cdot m^{-2}$ )	Necesidades reales ( $W \cdot m^{-2}$ )
5	115	50
10	175	105
15	290	121

Por el contrario, los sistemas de refrigeración se diseñarán para poder mantener unas condiciones térmicas adecuadas para el desarrollo de las plantas durante el periodo diurno en la época estival.

Además de la temperatura del aire es importante mantener un adecuado régimen higrométrico (Tabla 4) para evitar el estrés hídrico provocado cuando su valor desciende demasiado, o la condensación de agua sobre el cultivo o la cubierta del invernadero es excesiva.

**Tabla 4. Valores de humedad adecuados a cada cultivo hortícola en invernadero.** (Tesi, 2001)

Especie	Temperatura óptima del sustrato	CO <sub>2</sub> (ppm)	Humedad relativa (%)
Tomate	15-20	1000-2000	55-60
Pepino	20-21	1000-3000	70-90
Melón	20-22	–	60-80
Judía	15-20	–	–
Pimiento	15-20	–	65-70
Berenjena	15-20	–	65-70

### 1.2.3 Cálculo del balance energético en un invernadero

Los términos que intervienen en el balance energético de un invernadero se indican en forma de intensidad de energía. Según el Primer Principio de la Termodinámica, la energía ganada por el sistema se equilibra con la energía perdida por el mismo. Sin embargo, cada autor suele considerar una serie de componentes del balance energético despreciando otros. Existen diversos modelos simplificados del balance de energía (Walker, 1965; Walker et al., 1976; Kindelan, 1980; Arinze et al., 1984; Boulard y Baille, 1987; Al-Jamal, 1994; Baille, 1996).

Una forma simplificada de la ecuación del balance de energía en el invernadero puede ser:

$$R_n + Q_{cli} = Q_{cc} + Q_{ren} + Q_{evp} + Q_{sue} \quad (W)$$

Energía ganada
Energía perdida por el aire del invernadero

Donde:

$R_n$ : Radiación neta

$Q_{cli}$ : Energía calorífica que es necesario aportar ( $Q_{cal}$ ) o eliminar ( $Q_{ref}$ ) del invernadero

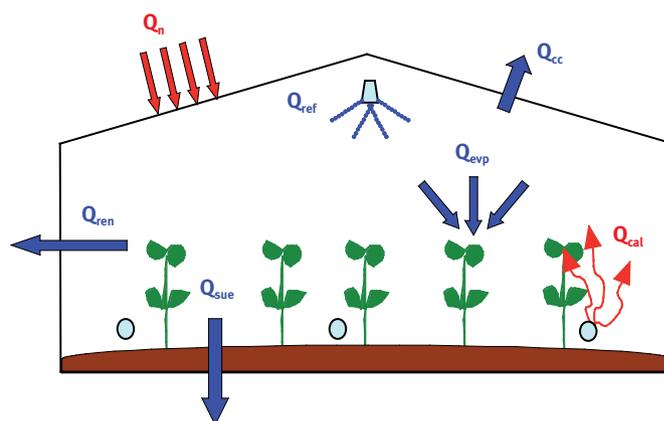
$Q_{cc}$ : Calor perdido por conducción-convección

$Q_{ren}$ : Calor sensible y latente perdido por la renovación del aire interior

$Q_{evp}$ : Calor latente consumido en la evapotranspiración de las plantas y el suelo

$Q_{sue}$ : Flujo de calor perdido por conducción a través del suelo

**Figura 2. Balance energético en un invernadero**



En el anexo 1 se presentan las diferentes expresiones matemáticas que permiten evaluar la energía calorífica que se introduce o se pierde en un invernadero, así como los parámetros y variables que intervienen en su cálculo.

### 1.2.4 Casos prácticos de balance energético

Para determinar las necesidades de climatización se ha aplicado el balance de energía descrito en el anexo 1 a dos invernaderos situados uno en el Norte de España (Invernadero nº 1), donde la principal necesidad es la calefacción y otro en el Sur (Invernadero nº 2), donde fundamentalmente es necesario refrigerar.

## Descripción del invernadero nº 1

El invernadero en estudio se encuentra situado en el término municipal de Mendigorriá (Foto 1), siendo su situación: Longitud: 1° 49' O, Latitud: 42° 37' N y Altitud: 373 m. Es un invernadero multitúnel de 64 m x 110 m, de ocho módulos y con una altura bajo canal de 4 m.



Foto 1. Invernadero multitúnel analizado

El actual sistema de calefacción consta de una instalación de agua caliente, con una caldera de potencia nominal de 1.758 kW y dos generadores de calor por combustión indirecta de 42,5 kW de potencia nominal (Foto 2). La instalación de calefacción dispone de un quemador de doble llama (Foto 3) que permite adecuar el consumo de combustible a la demanda de calor, mejorando el rendimiento de la instalación.



Foto 2. Generadores de calor por combustión indirecta

El quemador permite variar la potencia generada de 500 a 1.780 kW según se utilice una sola llama o las dos. El control se realiza en función de la temperatura

del agua dentro de la caldera, de forma que si se mantiene por encima de un valor de consigna (unos 65 °C) no se utiliza la segunda llama que entra en funcionamiento cuando la demanda de calor hace que la temperatura del agua en la caldera descienda por debajo del valor prefijado.



Foto 3. Quemador de doble llama

Del mismo modo la red de distribución de agua caliente dispone de válvulas de tres vías, que permiten mezclar el agua de retorno con el agua caliente que sale de la caldera, y de bombas de caudal regulable que permiten controlar el flujo de agua que se hace circular por las tuberías de calefacción.



Foto 4. Instalación de calefacción por agua con válvulas de tres vías (1) y bombas de caudal regulable (2)

Ambos dispositivos constituyen medidas de ahorro energético de la instalación de calefacción.



Foto 5. Mallas de sombreo situadas en el invernadero analizado

También es importante destacar que el empleo de pantallas térmicas bajo la cubierta del invernadero, y de doble lámina en los laterales, permiten reducir las pérdidas de calor por convección-conducción y por radiación infrarroja (durante la noche).

Estos dos elementos hacen que el calor que debe aportar el sistema de calefacción sea un 8,7% inferior al necesario en caso de no utilizarlos.



Foto 6. Cultivo de Lilium dentro del invernadero nº 1

El sistema de nebulización permite mantener los valores de humedad dentro del invernadero alrededor del valor de consigna, normalmente situado en el 60%. Del mismo modo, el sistema permite disminuir la temperatura dentro del invernadero incluso por debajo de los valores que se alcanzan en el exterior. El sistema

de nebulización se activa cuando la temperatura supera los 34,8 °C y pulveriza agua durante al menos 2 segundos a intervalos de tiempo de más de 4 segundos.

En la mayoría de situaciones climáticas la utilización de las mallas de sombreo (Foto 5), que pueden reducir hasta en un 30% la energía que es necesario eliminar del invernadero, y la evapotranspiración del cultivo (Foto 6), que absorbe hasta un 50% de la energía solar, permiten mantener la temperatura interior en los valores deseados. La malla de sombreo se despliega cuando la temperatura supera los 30 °C.

En el caso de temperaturas exteriores extremas de 38 °C la utilización de la nebulización puede mantener la temperatura dentro del invernadero a 25 °C.

### Datos climáticos de la zona nº 1

Los principales datos climáticos que caracterizan la zona son los siguientes:

- *Radiación solar global*: 1.000 ( $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ ) (Diciembre), 6.200 ( $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ ) (Julio) y 3.300 ( $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ ) (Media anual periodo 1998-2002)
- *Intensidad máxima de radiación*: 195 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) (Diciembre) y 870 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) (Julio)
- *Horas de sol*: 2.100-2.300 horas
- *Dirección del viento*: El Cierzo, o viento del norte, produce un efecto desecador y frío
- *Velocidad media del viento*: 25 (km/h)

El principal parámetro en el balance energético de un invernadero es la temperatura exterior, que determina de forma directa las necesidades de refrigeración y calefacción. Existen diferentes valores de temperatura exterior que se pueden utilizar en el diseño de los sistemas de climatización. Los principales valores de temperatura exterior en Pamplona son:

- Temperatura media mensual del mes más cálido en 2005: 20,4 (°C) (Julio)
- Temperatura media mensual del mes más frío en 2005: 4,8 (°C) (Enero)

- Temperatura media de las máximas diarias del mes más cálido en 2005: 28,1 (°C) (Julio)
- Temperatura máxima absoluta del año 2005: 38,0 (°C)
- Temperatura media de las mínimas diarias del mes más frío en 2006: 1,6 (°C) (Enero)
- Temperatura media de las mínimas mensuales: -4,9 °C en el mes de enero (Sanz de Galdeano et al., 2003)

## Resultados en el invernadero nº 1

Para calcular las necesidades energéticas de refrigeración se toman los datos de un día de verano al mediodía, con máxima radiación solar y con un cultivo recién transplantado que apenas produce refrigeración por evapotranspiración.

En la siguiente tabla se recogen los valores de los diferentes términos de calor que entran (valores positivos) o salen (valores negativos) del invernadero. Los datos aparecen referidos a la unidad de superficie ( $W/m^2$ ) para poder compararlos con los de otros invernaderos.

En la última columna aparece la potencia que sería necesario instalar en el invernadero de calefacción (valores negativos) o de refrigeración (valores positivos) estudiado para diferentes casos según las temperaturas exteriores e interiores utilizadas.

**Tabla 5. Resultados de los balances energéticos para diferentes condiciones climáticas en un invernadero de flor cortada en el norte de España.** (Mendigorría, Navarra)

	$T_i$ (°C)	$T_e$ (°C)	$R_n$ ( $W/m^2$ )	$Q_{cc}$ ( $W/m^2$ )	$Q_{ren}$ ( $W/m^2$ )	$Q_{evp}$ ( $W/m^2$ )	$Q_{sue}$ ( $W/m^2$ )	$Q_{cli}$ ( $W/m^2$ )
<b>A</b>	16,0	-4,9	-1,3	-131,8	-77,4	-26,1	-50,0	-286,6
<b>B</b>	16,0	1,6	-1,6	-90,8	-59,6	-26,1	-50,0	-228,1
<b>C</b>	16,0	4,8	-1,4	-70,6	-49,9	-26,1	-50,0	-198,1
<b>E</b>	12,0	-4,9	-3,7	-106,6	-58,9	-23,7	-50,0	-242,9
<b>F</b>	12,0	1,6	-4,3	-65,6	-41,2	-23,7	-50,0	-184,8
<b>G</b>	12,0	4,8	-4,3	-45,4	-31,5	-23,7	-50,0	-154,9
<b>H</b>	20,9	20,4	184,8	-3,0	-22,6	-109,2	-50,0	0,0
<b>I</b>	25,0	28,1	196,9	17,1	27,6	-123,5	-50,0	68,2
<b>J</b>	25,0	38,0	217,2	71,6	328,1	-129,6	-50,0	437,3
<b>K</b>	30,0	38,0	218,7	44,1	185,9	-146,6	-50,0	252,1

De los diferentes casos estudiados el más desfavorable para la calefacción sería el A, en el cual se considera la temperatura media de las mínimas mensuales en la zona de Mendigorría en el mes más frío, de -4,9 °C (Sanz de Galdeano et al., 2003) y se intentaría mantener dentro del invernadero una temperatura de 16 °C. Para ello sería necesario un aporte de calor de 2.017 kW.

La actual instalación de calefacción de agua, con una potencia útil de 1.600 kW, junto con los dos generadores de aire caliente, de 37 kW cada uno, proporcionan una potencia útil total de 1.674 kW, que permitirá mantener una temperatura interior de aproximadamente 12 °C (caso E), lo que garantizará que el cultivo no sufra daños en el corto periodo en el que se producen temperaturas tan bajas.

Si se consideran otros valores de temperatura exterior, como la temperatura media mensual del mes más frío (4,8 °C en enero) o incluso la temperatura media de las mínimas diarias del mes más frío (1,6 °C en enero), la actual instalación es capaz de mantener los 16 °C, planteados como objetivo del estudio energético realizado.

En cuanto a la refrigeración, se observa que para temperaturas moderadas (como la temperatura media mensual del mes más cálido de 20,4 °C) el sistema de ventilación natural es capaz de mantener la temperatura dentro del invernadero a una temperatura ligeramente superior (20,9 °C). Para temperaturas exteriores elevadas (temperatura máxima absoluta de 38,0 °C) es necesario poner en marcha el sistema de nebulización.

## Posibles mejoras de las instalaciones en el invernadero nº 1

La única deficiencia detectada durante la auditoría en las instalaciones de control climático es la distribución de las tuberías de calefacción. La actual instalación consta de 6 tuberías colocadas alrededor de los sacos de sustrato (Foto 7).

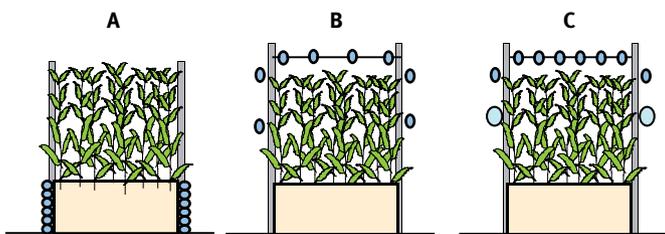
Esta disposición impide la correcta distribución de calor ya que la mitad de la superficie de las tuberías está



Foto 7. Instalación de tuberías de calefacción alrededor del sustrato en el invernadero analizado en Mendigorría

en contacto con el sustrato y le transmite su calor por conducción. El calor transmitido por convección al aire que rodea las tuberías y por radiación al cultivo se ve disminuido de forma importante. De esta forma es necesario aumentar la temperatura de las tuberías de calefacción a  $61,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  para poder suministrar la potencia máxima de calefacción ( $1.600\text{ kW}$ ). Además, un excesivo calentamiento del sustrato produce la proliferación de patógenos de suelo que dañan el cultivo.

**Figura 3. Colocación de las tuberías de calefacción en la actualidad (a), propuesta de mejora con tubos de polipropileno (b) y con tubos metálicos y de polipropileno (c)**



La disposición de las 6 tuberías de calefacción actuales alrededor del cultivo permitiría conseguir el mismo aporte de calor con una temperatura de las tuberías de sólo  $44,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Si se colocan sólo 4 tuberías alrededor del cultivo (Fig. 3b) se puede mantener una temperatura del agua de  $56,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , valor aún inferior al de la instalación actual.

Otra alternativa podría ser la sustitución de dos de las actuales tuberías de polipropileno (de  $25\text{ mm}$  de diámetro) por una tubería de hierro (de  $51\text{ mm}$ ), de forma que se utilizaran 4 de plástico y 1 metálica (Fig. 3c). En este caso se podría utilizar una temperatura del agua de  $51,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  para suministrar la potencia máxima de calefacción.

Para el caso de las 4 tuberías de polipropileno se puede mantener la temperatura de entrada en el invernadero a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  (y  $52,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  a la salida) con un caudal de agua de  $50\text{ l/s}$ , siendo el valor máximo admisible por la caldera de unos  $75\text{ l/s}$ .

El consumo de combustible necesario para suministrar la máxima potencia de la caldera es de  $150\text{ kg/h}$ .

### Descripción del invernadero nº 2

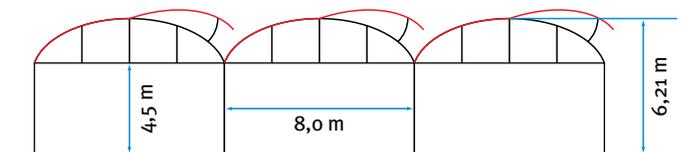
El invernadero en estudio se encuentra situado en la parte norte del Campo de Prácticas de la Universidad de Almería (Foto 8), siendo su situación: Longitud:  $2^{\circ} 17' \text{ O}$ , Latitud:  $36^{\circ} 51' \text{ N}$  y Altitud:  $90\text{ m}$ .



Foto 8. Situación del invernadero dentro del Campo de Prácticas de la Universidad de Almería

Es un invernadero multitúnel de  $24\text{ m} \times 45\text{ m}$ , de tres módulos y con una altura bajo canal de  $4,5\text{ m}$  (Fig. 4).

**Figura 4. Esquema de la estructura del invernadero**



## Datos climáticos de la zona del invernadero nº 2

Los principales datos climáticos que caracterizan la zona son los siguientes:

- *Radiación solar global (Capel, 1990):* 2.320 ( $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ ) (Diciembre) y 7.375 ( $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ ) (Junio)
- *Intensidad máxima de radiación:* 455 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) (Diciembre) y 1.025 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) (Junio)
- *Horas de sol:* 2.800-3.000 horas
- *Dirección del viento (Capel, 1990):* junio SSW y diciembre N

El principal parámetro en el balance energético de un invernadero es la temperatura exterior, que determina de forma directa las necesidades de refrigeración y calefacción. Existen diferentes valores de temperatura exterior que se pueden utilizar en el diseño de los sistemas de climatización. Los principales valores de temperatura exterior en Almería son (Capel, 1990):

- Temperatura máximas absolutas mensuales: 34,8  $\pm$  1,8 °C (Julio) y 35,4  $\pm$  2,2 °C (Año)
- Temperatura media de las máximas mensuales: 29,1  $\pm$  0,9 °C (Agosto) y 21,7  $\pm$  4,7 °C (Año)
- Temperatura media mensual de medias: 25,5 °C (Agosto) y 11,9 °C (Enero)
- Temperatura media de las mínimas mensuales: 8,2  $\pm$  1,3 °C (Enero) y 14,5  $\pm$  4,8 °C (Año)
- Temperatura mínima absoluta mensual: 4,7  $\pm$  1,3 °C (Enero) y 3,8  $\pm$  1,4 °C (Año)

## Resultados en el invernadero nº 2

Para las condiciones de Almería, en las que es necesario mantener una temperatura mínima a la que el cultivo no sufra daños cuando las condiciones exteriores son más desfavorables, el valor de diseño sería de 200 kW, correspondiente al caso B.

Para la refrigeración se consideraría la posibilidad de cultivar a lo largo de todo el año, por lo que el diseño se realizaría para poder mantener dentro del invernadero temperaturas adecuadas al cultivo, inferiores a la temperatura exterior, siendo el valor de diseño de 450 kW, correspondiente al caso F.

**Tabla 6. Resultados de los balances energéticos para diferentes condiciones climáticas en un invernadero de tomate en la costa mediterránea (Almería)**

	$T_i$ (°C)	$T_e$ (°C)	$R_n$ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	$Q_{cc}$ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	$Q_{ren}$ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	$Q_{evp}$ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	$Q_{sue}$ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	$Q_{cli}$ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
<b>A</b>	12,0	8,2	-8,3	-33,2	-43,9	-2,2	-25,0	-112,6
<b>B</b>	12,0	3,8	-13,1	-71,6	-74,7	-2,2	-25,0	-186,6
<b>C</b>	18,0	8,2	-10,4	-85,6	-105,3	-2,8	-25,0	-229,0
<b>D</b>	18,0	3,8	-15,1	-124,1	-136,1	-2,8	-25,0	-302,9
<b>E</b>	26,0	34,8	330,9	76,8	289,3	-76,5	-75,0	545,6
<b>F</b>	30,0	34,8	329,2	41,9	197,6	-78,6	-75,0	415,1
<b>G</b>	36,0	34,8	326,5	-10,5	33,9	-82,7	-75,0	192,2
<b>H</b>	30,0	29,1	313,1	-7,9	27,9	-75,3	-75,0	182,7
<b>I</b>	34,0	29,1	311,3	-42,8	-77,0	-77,9	-75,0	38,6

## 2 Técnicas de ahorro energético

---

Esencialmente, en el agrosistema invernadero se puede ahorrar energía mejorando las estructuras y los sistemas de calefacción. Las modificaciones estructurales generalmente reducen la infiltración y mejoran el aislamiento térmico del invernadero, de forma permanente o sólo durante los periodos más fríos. Las modificaciones de los sistemas de calefacción tratan de optimizar la recuperación de energía calorífica de los quemadores y suministrar el calor a las plantas de manera más eficiente. Existen otros aspectos a considerar entre los que podemos destacar la disminución del porcentaje de superficies laterales frente al total y de la pendiente de la cubierta.

### 2.1 Mejora del aislamiento térmico de los invernaderos

En primer lugar se deben utilizar materiales de cubierta térmicos, es decir, lo más impermeable posible a las radiaciones infrarrojas de onda larga. Las técnicas de conservación de energía, como construcción de invernaderos de doble pared inflados o uso de pantallas térmicas, además de disminuir las pérdidas de calor y aumentar la temperatura del invernadero producen otros cambios en su microclima, como por ejemplo la disminución de la tasa de ventilación, con efectos generalmente negativos. Por ello su instalación debe tener en cuenta estos inconvenientes y prever la forma de solventarlos.

#### 2.1.1 Pantallas térmicas

Las pantallas térmicas (Foto 9) reducen significativamente las pérdidas de calor en los invernaderos, dificultan las pérdidas de calor y disminuyen el volumen de aire a calentar, por lo que se han extendido en toda Europa para economizar los gastos de combustible en invernaderos con calefacción.

La utilización de pantallas térmicas cerradas, sin huecos entre las fibras que constituyen la malla, colocadas entre el cultivo y la cubierta del invernadero también reduce la transferencia de energía por convección a través de la cubierta. Esta reducción es mayor cuanto menor es la emisividad de la pantalla a la radiación infrarroja, como ocurre en el caso de las pantallas aluminizadas (Bailey, 1978).



Foto 9. Invernadero con pantallas térmicas aluminizadas

Los principales efectos que producen en los invernaderos son:

- Aumento de la temperatura mínima nocturna del invernadero en 2-3 °C, como consecuencia de la disminución de la pérdida de radiación térmica durante la noche (Baille et al., 1984; Plaisier, 1991).
- Aumento de 1 a 2 °C de la temperatura de las plantas y del suelo (Bailey, 1978; Boesman et al., 1984).
- Reducción de las pérdidas de calor por infiltración del aire, que se ven menos afectadas por el viento (Baille et al., 1984).
- Disminución significativa de la transpiración nocturna del cultivo (de Graaf, 1985) y, como consecuencia, reducción del calor consumido en el flujo evaporativo (Deltour et al., 1985).

El uso de pantallas aluminizadas móviles produce un aumento de los rendimientos que puede alcanzar el 40%.

Los mejores resultados se obtienen cuando se despliegan las pantallas a finales del día y se recogen por la mañana (Pirard et al., 1994).

Permiten disminuir el consumo de combustible destinado a calefacción del 20 al 27%, dependiendo del tipo de pantalla utilizada.

Su empleo durante la noche también produce un almacenamiento de energía en el suelo y el cultivo que repercute de forma positiva durante el día (Pirard et al., 1994).

Una pantalla térmica debe poseer un factor de transmisión lo más pequeño y un factor de reflexión lo más elevado posible en el infrarrojo medio y largo (2,5-40  $\mu\text{m}$ ) (Tesi, 1989).

También se pueden utilizar en el periodo estival como sistema para reducir la radiación solar incidente. Dada su alta capacidad reflectiva pueden conseguirse reducciones de hasta 7 °C en la temperatura de los frutos (Plaisier, 1991).

Las pantallas suelen ser de polietileno o poliéster, con una o dos caras aluminizadas (Tabla 7).

Las más eficientes son las que tienen ambas caras aluminizadas ya que consiguen una temperatura del cultivo más alta, siendo además una buena alternativa de sombreo.

Si sólo tiene una de ellas aluminizada, conviene que sea la que mira hacia el exterior (Baille et al., 1985).

**Tabla 7. Propiedades de diferentes tipos de pantallas térmicas.** (Baille et al., 1985; Pirard et al., 1994)

Materiales	Transmisión-Reflexión de luz solar* (%)	Transmisión-Reflexión de radiación infrarroja (%)	Difusión solar (%)	Ahorro de energía (%)
Polietileno de baja densidad	84-14	42-5	80	32,5
Poliéster tejido	39-58	5-2	29	42,0
Poliéster aluminizado al 50%	37-68	18-18	32	–
Poliéster aluminizado al 75%	19-68	9-27	16	–
Poliéster aluminizado al 100%	0-82	0-36	0	46,5

\* Ángulo de incidencia de la luz solar de 45°

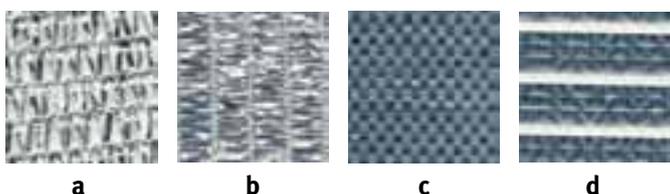
En cuanto al sistema de confección de las pantallas se pueden distinguir dos tipos (Valera et al., 2001):

- *Mallas de fibras tejidas.* En este tipo de mallas las propias láminas de la pantalla constituyen las fibras del tejido (Fig. 5a). La densidad de la malla y

el porcentaje de sombreo obtenido depende principalmente del tamaño de los huecos.

- *Mallas laminares o de cintas*. Están constituidas por una red tejida de poliéster de gran resistencia sobre la que se sujetan las láminas o cintas que constituyen la pantalla mediante hilos monofilamentados de polietileno de alta densidad. La densidad de la malla depende de la separación entre las láminas insertadas. Las láminas pueden insertarse planas (Fig. 5c y 5d) o en espiral (Fig. 5b).

**Figura 5. Diferentes tipos de pantallas térmicas: malla de fibras tejidas (a), mallas laminares con las cintas en espiral (b) e insertadas planas (c-d).**



Según la forma en que se colocan las pantallas en relación a la estructura del invernadero se pueden distinguir varios tipos:

- *Pantallas suspendidas horizontalmente*. La malla se extiende hasta quedar completamente plana y paralela al suelo. La altura a la que se coloca la pantalla ha de ser la máxima posible para dejar el mayor volumen posible entre el cultivo y la malla permitiendo una correcta circulación del aire. El cierre de la pantalla se realiza plegando la malla (Foto 10).
- *Pantallas enrollables exteriores*. Las pantallas se colocan enrolladas sobre la cubierta del invernadero a ambos lados de la cumbrera de forma que el cierre se realiza sobre la parte más alta del invernadero.
- *Pantallas enrollables interiores*. La malla se coloca enrollada alrededor de una barra de mando que gira accionada por un motor, lo que permite recoger o desplegar la malla de forma automatizada. Presenta la ventaja de permitir su colocación inclinada siguiendo la pendiente de la cubierta o incluso verticalmente para su colocación en los laterales y frontales con el objeto del cierre total del invernadero.

El enrollado de la malla se realiza mediante motores tubulares, que se desplazan sobre unos perfiles de aluminio mediante unas guías de unión. Los motores son solidarios a unos tubos ranurados en los que se inserta el extremo de la malla de forma que la fuerza proporcionada por el giro del motor consigue enrollar la pantalla que se traslada en sentido ascendente. Al girar en el sentido inverso es el propio peso del motor y la barra de mando el que consigue el desplazamiento descendente de la malla.

### 2.1.2 Invernaderos con paredes dobles

Los invernaderos con dobles paredes (Foto 10) son un método eficaz contra las bajas temperaturas invernales y puede considerarse como una alternativa de los sistemas de calefacción en la costa mediterránea (González y Martínez, 1981). En ellos se obtienen mejores resultados que en invernaderos de pared simple (Papadopoulos y Hao, 1997).



Foto 10. Instalación de un doble techo en un semillero comercial

Este tipo de invernaderos se construyen incorporando una segunda lámina de polietileno de 50 ó 100  $\mu\text{m}$  de espesor (125 ó 250 galgas). Este método puede reducir las pérdidas de calor en un 40-50% (Bianchi, 1989; Gutiérrez Montes et al., 1992) y de hasta un 57% en el consumo de calefacción (Bauerle y Short, 1977). Como consecuencia se consiguen aumentos de la temperatura del invernadero de hasta 8  $^{\circ}\text{C}$  (Rosocha, 1993), así como la de las plantas (Amsen, 1981).

Este sistema de control climático está aún poco extendido en los invernaderos españoles y su utilización se limita a algunos semilleros donde es muy importante el control climático para un correcto desarrollo de las plántulas, más sensibles a las variaciones de temperatura que las plantas ya desarrolladas.

La utilización de una doble pared en los invernaderos no sólo modifica su temperatura, sino la humedad, la luz y el CO<sub>2</sub> disponible en su interior. Al reducir la infiltración de aire se reducen las pérdidas de calor, principalmente durante la noche, así como la entrada de CO<sub>2</sub>, por lo que puede llegar a ser necesario el enriquecimiento carbónico (Bauerle y Short, 1981).

Sin embargo, el principal inconveniente es que al ser fijas producen una importante pérdida de luz durante el día (Ferare y Goldsberry, 1984), que puede llegar a ser de un 10-15% (Plaisier, 1991). Esto puede provocar ahilamiento en cultivos con altas necesidades de luz, como el melón (Sánchez-Montero et al., 1989).

### 2.1.3 Microtúneles

Los microtúneles (Foto 11) son estructuras de pequeño porte, cubiertas por una lámina de polietileno de 50 µm de espesor y entre 0,5 y 1 m de anchura. Se usan sólo para las primeras etapas de crecimiento, puesto que después las hojas tocan el plástico y es necesario quitarlo para que las plantas sigan creciendo.



Foto 11. Invernadero con microtúneles y pantalla térmica

Permiten aumentar la temperatura en el aire que rodea las plántulas, al disminuir las pérdidas energéticas por radiación infrarroja durante la noche. Ubicándolos por encima de las tuberías de calefacción permiten grandes ahorros de energía al limitar enormemente las pérdidas de calor por convección hacia el resto del invernadero.

### 2.1.4 Aumento de la hermeticidad del invernadero

Los mayores ahorros de energía están relacionados principalmente con la disminución de la tasa de infiltración de aire en los invernaderos. Así, en un invernadero viejo que no esté correctamente cerrado, se podrían conseguir ahorros de hasta un 40% en combustible sólo sellando todas las grietas por las que se producen las fugas de calor. Si el invernadero es relativamente nuevo y con un cerramiento adecuado, una mayor hermeticidad sólo podría producir un ahorro del 5% anual. Cada vez es más importante la hermeticidad de los invernaderos, debido al ahorro energético y fundamentalmente a que supone una barrera física al paso de insectos vectores de virus (Valera et al., 2006).

Una ventana parcialmente abierta puede permitir varias renovaciones de aire por hora, siendo necesario un aporte adicional de combustible para calentar este aire. Durante el invierno se pueden cerrar algunas de las ventanas del invernadero y cubrirlas con plástico para reducir la infiltración de aire. También deben utilizarse materiales aislantes donde existan fisuras en la estructura, alrededor de las puertas y las aberturas y donde se une el material de cubierta a los soportes de la estructura. Igualmente es necesario tapar y sellar cualquier otro tipo de hendiduras para asegurar que el invernadero queda perfectamente aislado (tapar los orificios por los cuales pueda escaparse el aire). Lograr un óptimo aislamiento térmico permite proteger mejor el cultivo del frío en el periodo invernal. Si el material de cubierta está fisurado (polietileno rasgado, paneles de vidrio fracturados o placas de policarbonato rotas) hay que reemplazarlo inmediatamente para reducir las pérdidas de calor.

La utilización de materiales aislantes (como placas de policarbonato) en la pared norte (en el hemisferio norte) y del resto de las paredes hasta la altura de las plantas, puede reducir las pérdidas de calor por conducción en los invernaderos de cubierta plástica.

Del mismo modo conviene que las instalaciones de pantallas térmicas y las dobles cubiertas plásticas sean lo más herméticas posible, para evitar el movimiento del aire a través de ellas. Así, en el caso de las pantallas térmicas se pueden utilizar pequeñas láminas del mismo material (Foto 12) para sellar la unión entre los paños consecutivos o en su unión con las mallas colocadas verticalmente en los laterales.



Foto 12. Láminas de sellado de las pantallas térmicas en su unión con los laterales del invernadero

En zonas muy frías se pueden aislar los cimientos colocando juntas de poliuretano o poliestireno de unos 5 cm de espesor a unos 30-40 cm bajo tierra. Esto puede incrementar la temperatura del suelo al lado de los laterales en más de 5 °C durante el invierno. Otra medida que puede contribuir a ahorrar energía es el aislamiento de las paredes laterales mediante juntas de protección de goma-espuma de 2 a 5 cm de espesor.

### 2.1.5 Compartimentación del invernadero

La creación de diferentes compartimentos dentro de los invernaderos de cultivos ornamentales o en los semilleros, en los que es bastante habitual tener cultivos con diferentes necesidades térmicas, puede reducir consi-

derablemente las necesidades de calefacción y refrigeración. Para ello se disponen verticalmente láminas de polietileno (Foto 13). Esta técnica también se puede utilizar en invernaderos de gran longitud situados sobre parcelas con fuertes desniveles para evitar que el aire caliente se desplace hacia la parte más elevada del invernadero (por efecto de su menor densidad).



Foto 13. Particiones interiores con láminas de polietileno dentro de un invernadero

### 2.1.6 Cortavientos

El viento exterior es un aspecto fundamental en las pérdidas de energía del invernadero. Se debe minimizar su efecto mediante cortavientos y eligiendo correctamente la orientación de los invernaderos. Vientos de tan sólo 25 km/h pueden duplicar la pérdida de calor de un invernadero. Para evitar que los cortavientos actúen como barreras al proceso de ventilación en los periodos cálidos, la medida más aconsejable es la instalación de cortavientos móviles; cuando esto no es posible se hace necesario mantener una distancia adecuada entre el cortavientos y la estructura del invernadero.

## 2.2 Mejora de la eficiencia energética en la generación de calor

Con unas reservas de energía y recursos limitados, el mundo está presenciando un constante aumento de la demanda de energía (EIA, 1999). La calefacción de los invernaderos conlleva una proporción cada vez más grande del consumo de energía en el sector agrícola.

Un estudio realizado en los años ochenta indicó que más del 60% del ahorro de energía alcanzable en los edificios se realizaría en la calefacción (Herring et al., 1988). Desde la crisis energética de los 70 se han realizado enormes esfuerzos para promocionar la eficiencia energética de los sistemas de calefacción en edificios (Jonathan y Jiang, 1994; EIA, 1999). Sin embargo, la eficiencia energética todavía está por debajo de las expectativas, ya que inicialmente se pronosticó un potencial de ahorro en calefacción de hasta un 70% (Herring et al., 1988). De acuerdo con la comisión de la energía de los EE.UU., antes del año 2010 y en las condiciones actuales se puede conseguir un potencial de ahorro del consumo energético para calefacción de edificios próximo al 22% (Warren, 2002).

El esfuerzo realizado para mejorar la eficiencia energética de los sistemas de calefacción se ha concentrado básicamente en tres aspectos:

- Mejorar la eficiencia de la generación de calor.
- Mejorar el control de la emisión del calor y de los sistemas de distribución.
- Utilizar la energía solar y otras energías renovables.

La fase de generación es posiblemente la más importante de todo el proceso de utilización de energía y engloba, por una parte, la transformación de la energía contenida en el combustible en energía térmica, y por otra, la transferencia al agua que sirve de transporte hasta el interior del invernadero. Además, en este proceso existe una energía residual en los gases expulsados a la atmósfera que habrá que controlar y tratar de recuperar en lo posible. A continuación se indican una serie de medidas de ahorro en la generación de energía térmica para la obtención de agua caliente para calefacción de invernaderos.

### **2.2.1 Aumento del rendimiento de la combustión**

La primera mejora que se puede realizar en los generadores es la optimización del rendimiento de la combustión para que se desarrolle en concordancia al combustible, tipo de generador y régimen de trabajo. En los sistemas de calefacción por agua caliente para

invernaderos es fundamental un control periódico de la combustión, para detectar posibles defectos de funcionamiento en la caldera.

La evaluación del funcionamiento de un generador se puede realizar a partir del análisis de la combustión que permite conocer parámetros como la temperatura de humos, los porcentajes de oxígeno, de CO<sub>2</sub>, de inquemados gaseosos y sólidos, el tiro en la chimenea, etc. Otros datos que permiten realizar un diagnóstico del funcionamiento son las presiones de trabajo, de alimentación y de retorno del combustible, y las características de la llama.

A partir del estudio de la combustión se puede determinar si es necesario realizar medidas correctoras para mejorar el aprovechamiento del sistema de calefacción, como el ajuste de los quemadores o la limpieza de las superficies de transferencia de calor en los generadores.

Los combustibles líquidos requieren una pulverización muy fina y una gasificación para obtener una perfecta mezcla con el oxígeno que permita el inicio de la combustión mediante el aporte de calor. Esta tarea la realiza el quemador, por lo que es necesario realizar revisiones periódicas de mantenimiento que aseguren un funcionamiento correcto y una combustión adecuada.

Existen diversos parámetros que influyen en el proceso de combustión, como la presión de alimentación, que debe ajustarse al tipo de combustible utilizado para obtener una correcta pulverización. Así, se puede impedir la aparición de humo y hollín que disminuyen el rendimiento de la combustión y la transferencia de calor.

Otro de los parámetros que influyen en la combustión es la viscosidad del combustible, que se debe ajustar al sistema de pulverización empleado, para lo que es necesario mantener en perfecto estado las resistencias de caldeo encargadas de fluidificar el combustible.

El parámetro más importante en la combustión es la relación de mezcla de aire y combustible, que debe ser la adecuada para el tipo de combustible utilizado. Es fundamental mantener el mínimo exceso de aire posible, sin que se generen inquemados, puesto que el

aire que no se utiliza en la combustión arrastra a la atmósfera parte del calor generado, lo que supone una disminución de la eficiencia energética del generador.

Los ahorros energéticos que se obtienen analizando la combustión suelen estar comprendidos entre el 5 y el 10% del consumo de combustible. El periodo de recuperación de las inversiones en este tipo de controles oscila entre 4 y 8 meses en sistemas de calefacción con un funcionamiento continuo.

### 2.2.2 Quemadores de funcionamiento fraccionado

En los generadores con potencia superior a 2.000 kW es conveniente instalar quemadores modulantes (Foto 14) que permiten adaptar el consumo de energía a las necesidades de la instalación. Estos quemadores ofrecen la posibilidad de regular la cantidad de combustible y la potencia térmica en una proporción de 1 a 3, mientras que el aire para la combustión se regula automáticamente en función de la cantidad de combustible.



Foto 14. Quemador modulante en una caldera para calefacción de invernaderos

La modulación se realiza por medio de una válvula reguladora de presión colocada en la tubería de retorno, que permite un encendido silencioso, sin explosiones, con una potencia en el arranque de hasta el 35% de la nominal. El rodete del ventilador, con una presión estática elevada, hace que el funcionamiento del quemador sea insensible a oscilaciones en la sobrepresión de gases de la caldera.

Los quemadores de menos de 2.000 kW pueden ser de funcionamiento escalonado con dos posiciones de funcionamiento y con regulación automática del caudal de aire comburente. Cuando las necesidades de calefacción no son muy elevadas el quemador genera una sola llama, mientras que cuando el calor generado por ésta es insuficiente para mantener la temperatura del agua de abastecimiento se utiliza una segunda llama que permite alcanzar la potencia máxima de la caldera.

### 2.2.3 Recuperación de calor en los humos de escape

El calor transferido a la atmósfera por los gases de combustión constituye la principal pérdida energética en los generadores de calor en los invernaderos con combustión indirecta. Por ello es importante disminuir la temperatura de salida de los humos de las calderas para mejorar su rendimiento y eficiencia energética. Una disminución de 25 °C en la temperatura de los humos puede mejorar en un 1-2% el rendimiento de la caldera. La energía calorífica de los gases de escape se puede aprovechar, tanto para calentar el agua a la entrada en la caldera, como para el aire que se utiliza en la combustión.

Los economizadores son elementos que permiten recuperar calor sensible de los gases de salida de una caldera para aumentar la temperatura del fluido de alimentación de la misma. Estos son intercambiadores de calor entre los humos que salen de la caldera y el agua de alimentación que permiten aproximar su temperatura a la del agua de salida. Producen un importante ahorro de combustible al reducir las pérdidas de calor en los gases de combustión, así como una disminución del choque térmico en el interior de la caldera.

Los precalentadores son intercambiadores de calor entre gases que se colocan en el conducto de salida de la caldera de los humos y después del economizador para precalentar el aire de combustión. La instalación de precalentadores de aire también permite optimizar la temperatura de salida de los gases de la caldera, reduciendo el consumo de combustible hasta en un 10%. Permiten aumentar la temperatura de llama, pudiendo

disminuir así parcialmente el exceso de aire utilizado. Los recuperadores de baja temperatura que se suelen utilizar para el precalentamiento del aire comburente funcionan con temperaturas de los gases de escape de 500 a 1.000 °C. En ellos la transferencia de calor se produce por convección por lo que es importante controlar la velocidad de expulsión de los humos de la caldera, la velocidad de entrada del aire y la temperatura de las paredes para evitar la condensación de ácido sulfúrico corrosivo.

#### 2.2.4 Instalación de turbuladores

Se utilizan para disminuir la temperatura de salida de los gases en calderas pirotubulares. Consiste en la introducción de láminas de acero enrolladas helicoidalmente en los tubos de humos, con el fin de aumentar la turbulencia y con ello la transferencia de calor. Permiten recuperar una gran cantidad de energía, proporcionando un incremento uniforme en la eficiencia de la radiación a lo largo de toda la caldera. Su precio suele oscilar entre 10 y 25 € por metro lineal instalado.

Sin embargo, la instalación de turbuladores puede producir una importante pérdida de carga en los gases de combustión, lo que origina la formación de depósitos de hollines en las superficies de transferencia de calor por la disminución del tiro en el hogar. Por ello, su empleo se recomienda sólo en las calderas en las que se tuvo en cuenta su posible instalación a la hora de diseñar el sistema de salida de los humos.

#### 2.2.5 Aislamiento del sistema de calefacción

Las pérdidas de calor en la red de distribución de agua caliente suponen un incremento en el consumo del combustible que se precisa para atender una determinada demanda, por lo que el aislamiento térmico se traduce en una economía de combustible. Además la presencia de superficies calientes es una causa potencial de accidentes, por lo que debe controlarse la temperatura superficial de las tuberías de distribución del agua caliente y de la caldera.



Foto 15. Aislamiento de la caldera y de las tuberías de calefacción mediante coquillas

Para el aislamiento térmico de tuberías con diámetros nominales de hasta 15 cm, es aconsejable el empleo de coquillas (Foto 15). Sobre el material aislante (lana de vidrio o de roca) normalmente se aplica una primera lámina de cartón asfáltico o una pintura impermeabilizante, que actúan como barrera de vapor; y posteriormente un recubrimiento con chapa de aluminio o de acero inoxidable.

El aislamiento del cuerpo de las calderas se efectúa normalmente mediante mantas de lana mineral de alta densidad (fibra de vidrio o lana de roca) con soporte de tela metálica protegidas por láminas de acero inoxidable, con espesores de 10 a 15 cm.

#### 2.2.6 Mantenimiento de los sistemas de calefacción

Los sistemas de calefacción pueden calentar el invernadero eficazmente, pero disminuye su eficiencia si no se realiza su mantenimiento con regularidad. Con el tiempo, los tubos sufren acumulaciones de depósitos dentro de la caldera, el hollín también se acumula en los tubos de humo en los que se produce el intercambio de calor, y los quemadores se desajustan. Para evitar todo esto es necesario limpiar la caldera para retirar

los posibles depósitos, así como los tubos de humo con un cepillo de cadena. Una capa de hollín de 3 mm puede incrementar el uso de combustible en un 10%.

## 2.3 Mejora del control de la emisión del calor y de los sistemas de distribución

Otra forma de mejorar la eficiencia energética en los sistemas de calefacción es distribuyendo adecuadamente la cantidad de calor necesaria para un correcto desarrollo del cultivo. Para ello hay que evitar calentar excesivamente ciertas zonas del invernadero que no redundan en una mejora de las condiciones de crecimiento del cultivo.

### 2.3.1 Control de la temperatura de calefacción

Una adecuada gestión de los equipos de calefacción existentes en un invernadero es la forma más rápida y más barata de reducir su consumo energético.



Foto 16. Caja de protección de las sondas de temperatura, con aspiración de aire

Para ello es fundamental identificar los potenciales problemas controlando la temperatura del aire a la altura de las plantas. Si la calefacción funciona correctamente, la temperatura del aire debe ser uniforme y coincidir con los valores de consigna. Si la temperatura media es más alta que la necesaria se puede reducir bajando la consigna del sistema de calefacción. La variación de temperatura se puede detectar con mayor facilidad

en las horas iniciales del día cuando la temperatura del aire exterior es más baja y el sol no ha empezado a influir en las necesidades de calefacción. Mantener un invernadero un grado más caliente de lo necesario incrementa el coste de energía en un 10-15%.

Las diferencias entre la temperatura media del aire y la temperatura del punto de referencia de la calefacción suelen estar causadas por errores en la calibración del termostato o las sondas de temperatura o por su colocación en una posición relativamente fría dentro del invernadero. Las cajas de protección con aspiración (Foto 16) permiten que los termostatos midan la temperatura del aire con exactitud y reduzcan el error causado por su ubicación. La instalación de las tuberías de calefacción en el suelo o bajo las mesas de cultivo puede permitir que la temperatura de las tuberías sea unos 2-3 °C más baja, con el consiguiente ahorro de energía (Foto 17).



Foto 17. Tuberías de calefacción instaladas bajo las mesas de cultivo

### 2.3.2 Ventiladores desestratificadores

La temperatura del aire también debe ser uniforme desde el cultivo a la cubierta del invernadero. Una temperatura más elevada en la proximidad del techo indica un movimiento inadecuado del aire en el invernadero. Una mala circulación del aire puede producir una concentración del aire frío en la zona del cultivo y de aire caliente bajo la cubierta.



Foto 18. Ventilador para movimiento horizontal del aire dentro de un invernadero

Reducir la temperatura del aire junto al techo en un grado, mediante una mejora de la circulación del aire, puede bajar el consumo de combustible en un 10%. El aire se puede mezclar mediante ventiladores desestratificadores (Foto 18) colocados dentro del invernadero. Estos sistemas se utilizan también en invernaderos calefactados para evitar bolsas de aire caliente en la zona más alta de la explotación.

### 2.3.3 Bombas de impulsión de caudal variable

Los sistemas de calefacción de caudal variable equipados con bombas con variador de frecuencia maximizan el ahorro de energía y optimizan el funcionamiento de la instalación. Mediante las bombas de caudal variable (Foto 19) se consigue impulsar el agua caliente por la red de tuberías encargadas de distribuir el calor dentro del invernadero, manteniéndola a presión constante aun cuando varía la demanda de calefacción.

El variador de frecuencia se encarga de ir regulando el caudal del circuito secundario, siguiendo las variaciones en la presión de la red que vaya produciendo la demanda de calor en cada momento. Comparado con un sistema de distribución a caudal constante, el caudal variable presenta las ventajas de poder conseguir una temperatura constante de impulsión del agua y un ahorro de energía de bombeo frente al de caudal constante, al bombear solamente el caudal de agua necesario en la instalación en cada momento.



Foto 19. Bombas de impulsión de caudal variable para la distribución del agua de calefacción en invernaderos

## 2.4 Optimización del funcionamiento de las calderas

Mientras ya se ha realizado un enorme esfuerzo por mejorar la eficiencia energética en la generación y distribución de calor, aún no se ha profundizado lo suficiente en la mejora del control de las calderas. Por consiguiente, la eficacia energética global se puede comprometer debido al funcionamiento inadecuado de las calderas.

### 2.4.1 Instalación de dos calderas

A menudo, las calderas de muchos sistemas de calefacción son excesivamente grandes para proveer un determinado margen de capacidad (Gardner, 1984). Por consiguiente, en general las calderas pueden suministrar adecuadamente el agua caliente necesaria, pero en la mayoría de los casos lo hacen con un bajo rendimiento (Liao y Dexter, 2004).

En el caso de los invernaderos las instalaciones de calefacción deben funcionar bajo condiciones climáticas muy cambiantes. Esto supone que la demanda de calor es muy variable a lo largo de la campaña productiva. A finales del otoño, cuando empiezan a utilizarse, y al principio de la primavera, cuando suele terminar el

periodo de calefacción, las necesidades térmicas están muy por debajo de la potencia máxima de calefacción. Esto hace que las calderas tengan que funcionar muy por debajo de su capacidad máxima, lo que conlleva un descenso importante de su rendimiento.



Foto 20. Instalación de calefacción en un invernadero con dos calderas para generación de agua caliente

Una forma de poder trabajar a lo largo de toda la campaña aprovechando al máximo el rendimiento es la instalación de dos calderas iguales con la mitad de la potencia necesaria en el invernadero (Foto 20). Así, en los periodos en los que no es necesario un gran aporte de calor (primavera y otoño) se puede hacer funcionar una sola caldera a máxima potencia, permaneciendo apagada la otra. Cuando, con la llegada del periodo invernal, las necesidades de calefacción aumentan, se pondría en marcha la segunda caldera para disponer de todo el potencial de la instalación.

#### 2.4.2 Depósitos de agua para almacenamiento térmico

El almacenamiento de calor (agua caliente) se puede utilizar cuando se produce  $\text{CO}_2$  mediante combustión para enriquecimiento carbónico en momentos en los que las necesidades de calefacción son bajas (durante las horas centrales del día); y en los invernaderos en los que existen instalaciones de cogeneración de energía eléctrica y no se necesita aportar calor.

Un incremento en la concentración de anhídrido carbónico en el invernadero durante el día tiene un efecto positivo en el crecimiento de muchos cultivos. El  $\text{CO}_2$  necesario se puede producir mediante quemadores, lo



Foto 21. Depósito calorifugado para el almacenamiento de agua caliente para calefacción de invernaderos

que libera una importante cantidad de calor. La eliminación de este calor residual produce un derroche energético de difícil justificación en las actuales circunstancias económicas y medioambientales. Una forma efectiva para evitar estas pérdidas de calor es utilizar tanques para almacenar el agua caliente (Foto 21) conectados al sistema de calefacción. Durante el día, cuando los quemadores están funcionando para la producción de  $\text{CO}_2$ , el agua caliente generada en la caldera se envía hacia el tanque de almacenamiento. Durante la noche, el calor residual se utiliza para calentar el invernadero.

## 2.5 Mejora de la eficiencia de los generadores de aire caliente de combustión indirecta

Para evitar los problemas que puede suponer liberar gases tóxicos en los generadores de aire caliente, tanto para las personas como para las plantas dentro del invernadero, se utilizan intercambiadores de calor que permiten introducir en el invernadero aire caliente y expulsar los gases que resultan de la combustión fuera de él.

### 2.5.1 Intercambiadores de calor

Los generadores están constituidos por un quemador y un sistema de intercambio de calor mediante tubos de acero inoxidable (Foto 22), por donde se hace circular el aire caliente antes de ser expulsado, y varios ventiladores de impulsión.



Foto 22. Intercambiadores de calor en un generador de aire caliente de combustión indirecta en un invernadero

El ventilador principal suministra aire al quemador e impulsa el aire resultante de la combustión fuera del invernadero, haciéndolo pasar a través de un tubo metálico de 0,5-0,6 m de diámetro con una longitud de unos 5-10 m. Además, se coloca un segundo tubo de 1 m de diámetro rodeando el primero, por donde circulan los gases de escape. En uno de sus extremos se sitúa un segundo ventilador de menor caudal, de forma que al aumentar la convección en la superficie del tubo por donde circula el aire caliente se consigue un importante ahorro energético.

### 2.5.2 Mangas de polietileno

La distribución del aire caliente se puede mejorar en el caso de generadores de aire mediante mangas de polietileno con orificios de unos 200-250 mm de diámetro. Con esas mangas el alcance del chorro de aire caliente puede llegar a ser de 50 m, mientras que sin mangas el alcance suele ser de 20 m (Montero y Antón, 1994). Con ellas se puede llegar a observar un gradiente de temperaturas de 1,5 °C a una altura de 1,5 m del suelo (Meneses y Monteiro, 1990). El gradiente de temperatura que se desarrolla a lo largo del invernadero depende de varios parámetros. Por ejemplo, de la posición y tamaño de los agujeros de las mangas

de polietileno, del flujo de aire en las tuberías y de la pendiente del terreno en la dirección de medida.

## 2.6 Aumento de la superficie útil del invernadero mediante la instalación de bancos móviles

La instalación de bancos móviles en los invernaderos de plantas ornamentales o semilleros reduce los costes de energía por planta producida al incrementar el número de éstas que pueden ser cultivadas por unidad de superficie. El espacio ocupado por el cultivo suele ser aproximadamente un 65% de la superficie total del invernadero, mientras que el resto de la superficie se dedica a pasillos. Los bancos móviles permiten el acceso a todas las plantas, incrementando así el espacio de suelo útil aproximadamente al 85% de la superficie del invernadero, reduciendo el uso de energía en un 30% por planta vendida.

## 2.7 Iluminación

La luz es la fuente de energía utilizada por las plantas para poder crecer y desarrollarse, de ahí la primordial importancia que tiene esta variable climática para conseguir un buen rendimiento de los cultivos en invernaderos. En su proceso evolutivo las plantas se han adaptado a la radiación solar que reciben, de forma que su respuesta a la luz depende de su disponibilidad en su hábitat natural (Tabla 8).

De todo el espectro electromagnético, la mayor parte de la energía radiante proveniente del sol que alcanza la superficie terrestre se encuentra comprendida en el rango de longitudes de onda  $300 < \lambda < 2.500$  nm. La mayor parte de esta radiación solar incidente calienta el invernadero, el cultivo y las plantas durante el día.

Del amplio espectro de la radiación solar, la energía luminosa que es utilizada por las plantas para el proceso fotosintético se limita únicamente a una fracción de la radiación solar interceptada. Esta porción del espectro se conoce como radiación fotosintéticamente activa (PAR) y se encuentra dentro de la radiación visible, entre 400 y 700 nm.

**Tabla 8. Efectos fisiológicos sobre las plantas de las diferentes longitudes de onda de radiación** (Tesi, 1989)

Color	Longitud de onda (nm)	Efecto sobre las plantas
Ultravioleta medio y corto	<280	Efecto letal para los vegetales y acción germicida
Ultravioleta largo	280-380	Daños y posiblemente efectos formativos no deseables (plantas más pequeñas y hojas muy estrechas)
Violeta-azul	380-490	Efectos fotosintético y fotoperiódico
Verde-amarillo	490-595	Efecto fotosintético limitado
Rojo-naranja	595-760	Máximo efecto fotosintético y fotoperiódico
Infrarrojo medio y corto	760-2.500	Alargamiento excesivo del tallo. Calentamiento del ambiente
Infrarrojo lejano	>2.500	Efecto térmico sobre el ambiente (radiación absorbida por las plantas y convertida en calor)

### 2.7.1 Tipo de iluminación

El tipo de lámparas que se deben instalar en un invernadero dependerá sobre todo del tipo de iluminación para el que van a ser utilizadas. Las principales características técnicas que se deben considerar para el empleo de un tipo u otro son (Alpi y Tognoni, 1991):

- La distribución espectral de la luz emitida.
- El coste de instalación y su consumo de energía eléctrica.
- La potencia de radiación necesaria.
- El rendimiento de la lámpara, que indica el tanto por ciento de la potencia que se transforma en luz.

Con la iluminación artificial será conveniente disponer de una luz con composición espectral similar a la del sol. Las lámparas más apropiadas son las que tienen una relación entre las radiaciones rojo-anaranjado y azul-violeta, no demasiado diferentes de las del espectro solar, 1,25.

El conocimiento de la construcción, eficiencia y características eléctricas de las fuentes de luz es útil para realizar la mejor elección para una determinada tarea. Cada vez existen más tipos de lámparas, algunas de las cuales han conseguido un elevado nivel de eficiencia (valorada como la relación entre la intensidad proporcionada y la potencia eléctrica consumida).

### Lámparas de incandescencia

En este tipo de lámparas la luz se obtiene mediante el calentamiento de un filamento, normalmente de tungsteno, colocado en el interior de una ampolla de cristal que contiene un gas inerte a baja presión. Estas lámparas tienen un precio de instalación moderado y un alto coste de funcionamiento, no siendo apropiadas para iluminaciones de elevada intensidad.

El espectro de emisión de las lámparas de incandescencia está comprendido entre 400 y 4.500 nm, emitiendo una gran cantidad de radiación infrarroja que provoca un excesivo calentamiento del ambiente y el ahilado de los tallos de las plantas.



Foto 23. Instalación de focos para realizar iluminación artificial en un invernadero destinado a plantas ornamentales

Principalmente son utilizadas para iluminación fotoperiódica de baja intensidad (15-25 W/m<sup>2</sup>) para iniciar o para interrumpir el ciclo inductivo.

### Lámparas fluorescentes

Los denominados comúnmente tubos fluorescentes emiten una luz de espectro variable según el tipo, con un menor porcentaje de radiación infrarroja que

permite suministrar una elevada intensidad luminosa sin recalentar excesivamente el ambiente.

El consumo es menor que en el caso de la incandescencia, aunque su instalación es más costosa. Se pueden utilizar en la fase vegetativa para obtener un crecimiento regular bajo condiciones controladas.

**Tabla 9. Características de algunos tipos de lámparas utilizadas en la iluminación artificial** (Tesi, 1989)

Tipos de lámparas	Siglas	Eficiencia Radiante (lm/W)	Horas probables de duración
Incandescencia (150 W)	GLS	14-16	1.000
Tubos fluorescentes (58 W)	TLD33	70-75	7.500
Mercurio de alta presión (400W)	HPL-N	50-55	12.000
Mercurio fluorescente con reflector interior (400 W)	MBFR/U	50-55	7.500
Halogenuros metálicos de alta presión (400 W)	HPI-T	75-80	8.000
Sodio de alta presión (400 W)	SON/T	100-125	12.000

Se dispone de potencias variables entre 40 y 125 W. Son poco utilizadas en invernaderos porque el porta-lámparas y el reflector provocan un excesivo sombreado durante la iluminación natural.

### Lámparas mercurio-fluorescentes y de halogenuros metálicos

Las lámparas mercurio-fluorescentes suministran un espectro equilibrado, con una relación entre radiaciones rojo-anaranjada y azul-violeta (alrededor de 2) que se aproxima a la de la luz solar (1,25).

Son apropiadas para iluminación suplementaria de elevada intensidad, así como para iluminación sustitutoria porque no calientan demasiado el ambiente.

Las lámparas de halogenuros metálicos de alta presión presentan una mayor eficiencia radiante y actual-

mente proporcionan resultados que compiten con los de las lámparas de mercurio fluorescentes. Se pueden combinar diferentes tipos de lámparas de halogenuros con el fin de obtener espectros compuestos más equilibrados que los proporcionados de forma individual.

**Tabla 10. Coeficientes de eficacia de algunos tipos de lámparas utilizadas en la iluminación artificial** (Urban, 1997)

Tipos de lámparas	Coeficiente de eficacia (%)	Utilización principal
Incandescencia	4,8-6,9	Control de la floración en especies sensibles al fotoperiodo
Halogenuros metálicos de alta presión	20,0-22,0	Iluminación suplementaria
Sodio de baja presión	22,2-28,6	Iluminación suplementaria
Sodio de alta presión	22,2-25,0	Iluminación suplementaria

### Lámparas de sodio

Las lámparas de vapor de sodio presentan su máxima emisión en torno a los 586 nm, en el límite de la luz amarillo-naranja, presentando una gran eficacia fotosintética, por lo que habitualmente son utilizadas en instalaciones de iluminación suplementaria, pese a que su espectro de emisión es poco equilibrado. Son preferibles las lámparas de sodio de alta presión por tener un espectro de emisión más amplio que las de baja presión. Se suelen utilizar lámparas tubulares de unos 400 W.

### 2.7.2 Gestión de la iluminación

Actualmente existe una amplia gama de sistemas de iluminación disponible en el mercado con prestaciones similares pero con costes de adquisición y funcionamiento diferentes.

El correcto diseño de los sistemas de iluminación permitirá reducir su consumo eléctrico manteniendo un adecuado nivel de iluminación. Para mejorar la eficiencia energética de las instalaciones de iluminación para invernaderos son recomendables las siguientes medidas:

- Evaluar el sistema de iluminación existente en la actualidad en el invernadero.
- Rediseñar la instalación de iluminación y sus variables de control, en caso necesario.
- Instalar sistemas de control de la iluminación que garanticen su uso adecuado y solamente durante el tiempo necesario.
- Instalar detectores de movimiento para iluminar accesos a los invernaderos y lugares que no requieran una iluminación permanente.

### 2.7.3 Recomendaciones para mejorar la eficiencia en la iluminación

La eficiencia energética de los sistemas de iluminación artificial en invernaderos se puede mejorar hasta un 10% adoptando una serie de medidas más o menos sencillas:

- Reemplazar las lámparas incandescentes por otros tipos más eficientes (Tabla 10).
- En los invernaderos que requieren elevados niveles de iluminación y largos periodos con la luz encendida, es aconsejable instalar lámparas de halogenuros metálicos de alta presión al presentar una buena eficiencia radiante.
- Limpiar frecuentemente las superficies de los reflectores para aumentar el rendimiento de los sistemas de iluminación.
- Revisar periódicamente la instalación.

## 2.8 Refrigeración

En la zona mediterránea y en la estación cálida, la temperatura interior diurna de un invernadero es muy elevada, llegando a superar los 37 °C. En esta región la ventilación es uno de los medios potenciales para controlar las altas temperaturas que, desde el mes de abril, pueden sobrepasar el umbral de tolerancia de las plantas (Feuilloley et al., 1990).

Esta ventilación puede realizarse naturalmente mediante aberturas, o ventilación pasiva, y artificialmente utilizando ventilación forzada con la ayuda de extractores eléctricos. En determinadas situaciones climáticas resulta insuficiente la mejora de la ventilación para disminuir la temperatura, y se hace necesario algún sistema de refrigeración basado en la evaporación de agua.

### 2.8.1 Sistemas de ventilación natural

La ventilación es un proceso que influye de forma decisiva en el microclima creado dentro de los invernaderos y, por lo tanto, en el control climático destinado a mejorar las condiciones de crecimiento y desarrollo de las plantas cultivadas dentro de ellos.



Foto 24. Aberturas cenitales de ventilación en un invernadero de tipo Almería cubiertas por malla anti-insectos

La ventilación natural es el principal método de control climático en los invernaderos del área mediterránea. La ventilación natural es un sistema ampliamente utilizado para controlar el clima del invernadero, ya que requiere menos energía, menos equipos y mantenimiento y es mucho más barato que otros sistemas de climatización. Una ventilación eficaz del invernadero es crucial tanto para las regiones del norte, con climas de inviernos húmedos, como para las condiciones mediterráneas de veranos calurosos.

A continuación se indican una serie de recomendaciones para optimizar la ventilación natural:

- Los invernaderos equipados con ventanas cenitales (Kittas et al., 1996) o ventanas cenitales y laterales son más eficaces desde el punto de vista de la ventilación natural que los invernaderos con ventanas laterales únicamente (Papadakis et al., 1996).
- Disponer como mínimo de una superficie de ventilación del 20 al 30% de la superficie de suelo cubierta por el invernadero. Además, es conveniente que la superficie de las aberturas cenitales suponga al menos  $1/3$  de la superficie total de ventilación, de forma que se facilite la ventilación por efecto «chimenea» cuando la velocidad del viento es pequeña.
- Es conveniente orientar el invernadero de forma que las ventanas se sitúen perpendicularmente a los vientos dominantes en el periodo estival en el que las necesidades de refrigeración son mayores.
- Evitar la presencia de edificios o árboles que obstaculicen el flujo natural de aire por las ventanas.
- Las ventanas laterales de barlovento no deben tener bordes afilados que puedan deflectar excesivamente el flujo de aire sobre la estructura del invernadero.
- Las ventanas laterales de barlovento producen una mejor ventilación cuando se sitúan cerca del suelo y tienen mayor tamaño que las ventanas cenitales.
- Es importante disponer de ventanas cenitales que abran tanto a barlovento como a sotavento para asegurar una máxima ventilación en diferentes condiciones climáticas.
- Las ventanas deben cerrar herméticamente para asegurar que no se produce infiltración de aire en los periodos fríos.
- No utilizar sistemas de ventilación forzada cuando sea posible una circulación natural del aire exterior.
- Aunque es imprescindible la utilización de mallas anti-insecto desde el punto de vista fitosanitario, deben tener una porosidad superior al 40% para no disminuir en exceso la ventilación natural.

- Es aconsejable un control automatizado de las ventanas en función de las condiciones ambientales dentro del invernadero. Además el sistema debe permitir un cierre automático de las ventanas ante la posibilidad de lluvia o fuertes vientos.

### 2.8.2 Sistemas de ventilación forzada

El uso de ventiladores puede permitir un control más preciso de la temperatura del invernadero que el que puede lograrse con la ventilación pasiva. Para ello se recomienda que la tasa de ventilación sea como mínimo de 45 a 60 renovaciones de aire por hora (ASAE, 1981).

Sin embargo, en climas mediterráneos no es frecuente encontrar equipos de este tipo por el precio de la instalación y por el consumo de energía eléctrica.

La ASAE (1981) establece una serie de normas para el diseño y control de los sistemas de ventilación forzada:

- Los ventiladores deben hacer circular el caudal de aire previamente calculado a la presión estática de 0,03 kPa.
- La distancia entre dos ventiladores contiguos no debe ser superior a 7,5 m para asegurar la uniformidad en el flujo del aire.
- Siempre que sea posible se deben situar los extractores a sotavento de los vientos dominantes en verano. Si necesariamente es preciso instalarlos a barlovento, se debe aumentar el volumen a ventilar por cada extractor en un 10%.



Foto 25. Grupo de extractores instalados en un invernadero de tipo Almería

- Debe haber una distancia mínima sin obstáculos a la salida del aire de 1,5 veces el diámetro del ventilador. Los ventiladores se pueden situar en el techo si hay interferencias en los laterales.
- Para evitar entradas de aire indeseadas cuando los ventiladores no estén en funcionamiento, las aperturas de entrada deben tener rejillas motorizadas que abran hacia fuera y sólo se abrirán cuando los ventiladores entren en funcionamiento. Las rejillas de salida también abrirán hacia fuera movidas por la presión de los ventiladores.
- La superficie de las ventanas de entrada será al menos 1,25 veces el área de los ventiladores.
- Las aspas deben estar protegidas con tela metálica de alambre de 1,5 mm de grosor mínimo y aberturas de 13 mm. Esta especie de pantalla debe estar al menos a 1 m de distancia de cualquier parte móvil para prevenir accidentes.
- Es preferible controlar el volumen de aire renovado en varias fases. Para ello se pueden utilizar motores de frecuencia variable que permitan regular la velocidad de los ventiladores o conectar distinto número en función de la temperatura del invernadero.

### 2.8.3 Sistemas de refrigeración por evaporación de agua

En zonas áridas con altas temperaturas y baja humedad relativa es recomendable el uso de sistemas de refrigeración de agua que permiten de forma simultánea una disminución de la temperatura y un aumento de la humedad del aire, lo que favorece el desarrollo de los cultivos. La refrigeración por evaporación es mucho más efectiva en climas secos.

En clima húmedo el invernadero debe tener tasas de ventilación elevadas para que su temperatura esté por debajo de la exterior. En clima seco la combinación de la evaporación y la ventilación puede reducir la temperatura hasta cerca de 10 °C por debajo de la exterior (Montero et al., 1990). Pero también es efectiva

en climas húmedos, debido a las grandes variaciones del régimen higrométrico dentro del invernadero en un mismo día. El sistema de refrigeración es necesario en las horas centrales del día, justo cuando la humedad relativa es menor.



Foto 26. Compresor de aire y bomba de impulsión del agua en una instalación de nebulización

Durante el tiempo de uso de los evaporadores el invernadero debe estar ventilado. Es un error cerrar las ventanas cuando los nebulizadores u otros equipos similares están en funcionamiento, ya que la ventilación aumenta la eficacia de los equipos evaporadores (Lansberg et al., 1979).

Por otra parte, si la ventilación es alta, el equipo de humectación debe tener capacidad suficiente para añadir el vapor de agua que se escapa por las ventanas. La cifra de 20 a 30 renovaciones horarias parece un buen término medio, y es una tasa de ventilación que puede alcanzarse en la mayoría de invernaderos con ventanas cenitales incluso en días de poco viento (Montero et al., 1994).

Los equipos de refrigeración por evaporación son extraordinariamente eficaces en invernaderos con cultivos en las primeras fases de desarrollo, logrando descensos térmicos de 8-12 °C (Lansdberg et al., 1979).

El principal consumo energético que suponen los sistemas de nebulización lo constituyen los compresores de aire (Foto 26).

## 2.9 Factores que influyen en las inversiones en tecnologías de ahorro energético

La energía es un factor de producción muy importante en la horticultura de invernadero, fundamentalmente en climas fríos. En los últimos años los agricultores se ven enfrentados a unos precios de la energía en aumento y a variaciones climatológicas cada vez más acusadas (nieve en los invernaderos de la costa de Almería en 2005), lo que fomenta la inversión en equipos de ahorro energético.

Las inversiones más importantes que suelen realizar los agricultores son el cambio de gasóleo a gas natural e inversiones en pantallas térmicas. Un obstáculo importante para el cambio a gas natural es la falta de gaseoductos en las proximidades de los invernaderos. Las explotaciones que ya están usando gas natural son grandes empresas con importantes consumos energéticos y con gerentes jóvenes (Taragola et al., 2002). Las inversiones en pantallas térmicas son las más importantes para los productores de plantas ornamentales y los semilleros, en los que se realiza un uso intensivo de energía. En la mayoría de los casos estas inversiones consisten en la sustitución de las pantallas térmicas existentes por otras más eficientes.

Los gastos de energía en los invernaderos de países centroeuropeos y del norte de España tienen un papel importante en la competencia con los situados más al sur. Por consiguiente, tanto por razones ambientales como económicas los agricultores se ven en la necesidad de realizar un uso más eficiente de la energía.

En la horticultura en invernadero el gasóleo pesado es uno de los combustibles más usados y desafortu-

nadamente también es de los más contaminantes. El gas natural es más ecológico que el gasóleo, pero es más costoso. De acuerdo con los cálculos realizados por el Centro de Economía Agrícola (Van Lierde y De Cock, 1999) solamente el 15% del consumo de energía total viene del gas natural. Una de las posibilidades para reducir las emisiones de gases en la horticultura intensiva es el apoyo al uso del gas natural. Si todas las explotaciones cambiaran a gas natural la emisión de gas SO<sub>2</sub> desaparecería totalmente y la emisión de CO<sub>2</sub> disminuiría un 30% (Carels y Van Lierde, 2000; Van Lierde et al., 2002).

Por último, destacar el papel fundamental que debe tener el uso de energías renovables en los invernaderos. Para ello debemos conseguir que estén a un precio competitivo para los agricultores; los cuales están padeciendo en las últimas campañas caídas en los precios de venta de sus productos y un incremento generalizado de los costes de producción.

# 3 Aplicación de energías renovables en los invernaderos

---

## 3.1 Energía solar

Una forma de mejorar la eficiencia energética en el invernadero es la sustitución de fuentes de energía no renovables por energías renovables. La energía solar es una energía limpia y no contaminante, teniendo un efecto muy positivo ante el medioambiente, ya que permite sustituir el uso de otras fuentes de energía contaminantes.

Teniendo en cuenta las necesidades energéticas del invernadero se pueden plantear dos posibilidades de introducción de la energía solar:

- Instalación solar térmica como apoyo a la calefacción.
- Instalación solar fotovoltaica para producir electricidad.

### 3.1.1 Energía solar para el precalentamiento del agua de calefacción

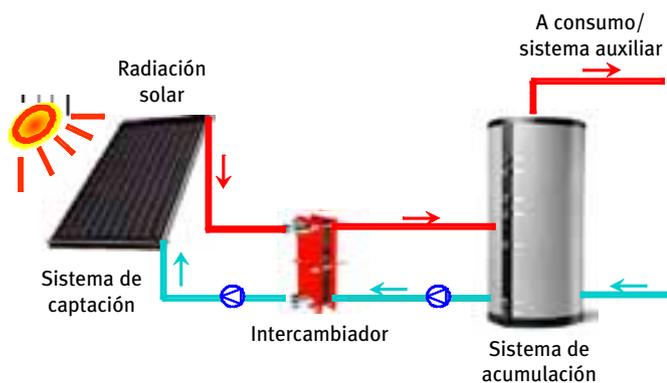
Las temperaturas nocturnas en el interior de los invernaderos en ciertas regiones son demasiadas bajas, por lo que en muchos semilleros es necesario contar con algún sistema de calefacción para evitar daños irreversibles en las plántulas. Elbatawi et al., (2000) hicieron una comparativa en dos semilleros de pimienta en Ohio, uno de los invernaderos no tenía ningún sistema de calefacción, y el segundo disponía de un sistema de calefacción por agua calentada durante el día con un captador solar con una superficie de captación solar de 6 m<sup>2</sup>. El agua era almacenada en un depósito adecuadamente aislado con una capacidad de 3 m<sup>3</sup>. A corto plazo, la eficacia del colector solar alcanzó más del 80%, pero a largo plazo el promedio era casi del 50%. El porcentaje de germinación en el invernadero con calefacción fue del 100%, mientras que sólo se alcanzó una germinación del 80% en el invernadero sin calefacción y un 60% al aire libre.

Ichsani y Wulandari (2002) estudiaron la posibilidad de incorporar un sistema mixto que combinaba la combustión de queroseno con un captador solar. En días soleados no era necesario complementar el sistema solar con queroseno, el calor aportado era suficiente

para mantener una temperatura adecuada del agua; pero en días lluviosos el aporte de energía solar era insuficiente y era necesario complementarlo con algún tipo de combustible.

Estos sistemas de calefacción mixtos por suelo radiante aprovechan el calor del sol en época estival con un campo de captación pequeño que acumula la energía a través de un fluido en grandes tanques en superficie o enterrados bajo el suelo del invernadero. De esta forma, durante la época de mayor demanda calorífica, permiten tener un reservorio de energía en perfectas condiciones para circularlo por el suelo radiante del invernadero produciendo un gran ahorro en el combustible fósil.

**Figura 6: Sistema solar térmico**

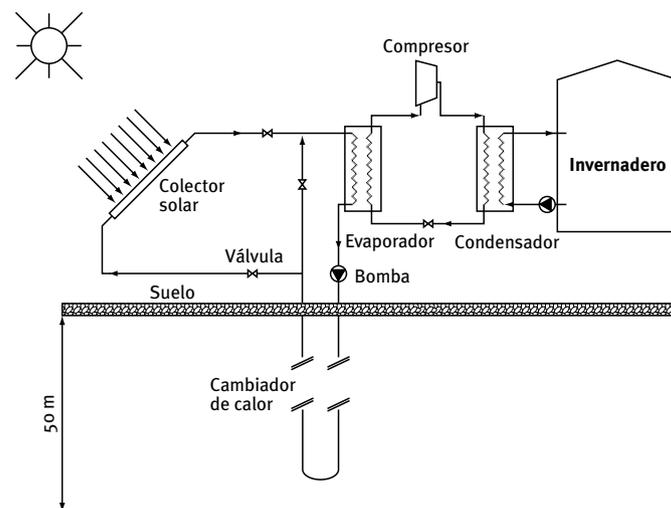


Cuando el sistema solar no sea capaz de proporcionar la energía necesaria para mantener la temperatura óptima del invernadero entrará en funcionamiento el sistema convencional; de esta forma tenemos garantizado el suministro y el ahorro energético con la diversificación a través de la energía solar térmica.

La inversión con estas configuraciones es más alta en el sistema de acumulación que en el sistema de captación, sistema que además por ser relativamente pequeño no tiene porque sombrear en ninguna época del año la superficie del invernadero.

En esta misma línea Ozgener y Hepbasli (2005) estudiaron las características de funcionamiento de un sistema de calefacción mediante colectores solares asistido geotérmicamente (Fig. 7). El agua caliente de los colectores solares se hacía pasar bajo tierra para que la pérdida de temperatura fuese menor hasta el momento de su uso.

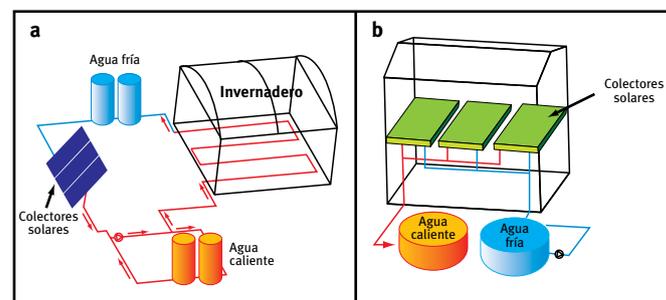
**Figura 7. Sistema de calefacción solar asistido geotérmicamente** (Adaptado de Ozgener y Hepbasli, 2005)



Lazaar et al., (2004) estudiaron un sistema de calefacción que aprovecha la energía solar mediante una red de tuberías instaladas en el interior del invernadero y un depósito bajo tierra. Durante el día las tuberías captan el calor del aire del invernadero y el agua caliente se almacena en el depósito subterráneo, devolviendo al invernadero durante la noche esa energía almacenada. Este sistema permitía alcanzar temperaturas nocturnas de 12 °C en invierno en Túnez, a la vez que disminuir las temperaturas diurnas en épocas cálidas.

En Marruecos, Bargach et al., (2004) estudiaron el comportamiento de un sistema de calefacción mediante colectores solares en un invernadero de polietileno y otro sistema de calefacción por absorción (Fig. 8) utilizando como fluido el azul de metileno y usando como colector polietileno alveolar transparente en el interior del invernadero.

**Figura 8. Sistemas de calefacción mediante colectores solares (a) y un sistema de absorción (b)** (Adaptado de Bargach et al., 2004)



El sistema más eficiente resultó ser el primero, aunque el segundo presentaba la ventaja de disminuir la temperatura interior del invernadero en días calurosos.

Otra de las aplicaciones de la energía solar térmica es el calentamiento de la disolución nutritiva en cultivos sin suelo, mejorando la absorción de iones. De esta manera se puede incrementar la precocidad y calidad de las cosechas, y simultáneamente, reducir los lixiviados con el consiguiente impacto medioambiental positivo (Valera et al., 2004, Valera, 2006).

### 3.1.2 Energía solar fotovoltaica para invernaderos

La energía solar fotovoltaica se puede utilizar para abastecer elementos aislados de bajo consumo:

- Bombas (pozos, elevación de agua, abastecimiento desde balsas)
- Sistema de control climático del invernadero (autómata u ordenador)
- Motorreductores

En zonas con un elevado número de horas de sol al día puede resultar económico abastecer de energía solar ciertos sistemas en los invernaderos (accionamiento de ventanas, ordenadores...).

Para introducir la energía solar fotovoltaica en los invernaderos es recomendable comenzar por pequeñas instalaciones que permitan abastecer elementos de bajo consumo y que requieran un uso continuo, como el sistema de control de la climatización y la fertirrigación.

### 3.1.3 Ejemplo de instalación de energía solar fotovoltaica para generación de energía eléctrica en el invernadero nº 1

A continuación se muestran unas cifras orientativas sobre las dimensiones de una instalación solar fotovoltaica según las necesidades de consumo para la provincia de Navarra. Dicha instalación estaría formada por paneles fotovoltaicos de 100 W principalmente, baterías de tensión nominal de 24 V y una profundidad de descarga de 0,8 que proporcionen una autonomía de 5 días.

**Tabla 11. Dimensiones de una instalación solar fotovoltaica**

Consumo (kW·h)	Todo el año			Verano		
	Nº paneles	Capacidad batería (100 W)	HSP (Ah)	Nº paneles	Capacidad batería (100 W)	HSP (Ah)
0,10	1	55	1,99	1 (25 W)	55	4,66
0,25	2	137	1,99	1 (60 W)	137	4,66
0,50	4	274	1,99	2	274	4,66
1,00	7	548	1,99	3	548	4,66
2,50	18	1,371	1,99	8	1,371	4,66
5,00	37	2,741	1,99	16	2,741	4,66
7,50	55	4,112	1,99	24	4,112	4,66
10,00	74	5,482	1,99	32	5,482	4,66

HSP (Hora solar pico): indica el promedio de la insolación diaria para el mes más desfavorable

Para un invernadero de 1 ha, la instalación necesaria para uso en verano vendría definida por el consumo de los siguientes elementos:

**Tabla 12. Instalación de energía solar necesaria para un invernadero(\*)**

	Componentes	Potencia total (kW)	Consumo (kW·h)	Nº Paneles (100 W)	Capacidad batería (Ah)
Ventilación	20 motores (0,4 kW)	8	8	25	4.386
	5 ventiladores (0,25 kW)	1,25	3,75	12	2.056
Control	1 PC	0,07	1,68	5	521
	TOTAL		13,43	42	6.963

(\*) Datos de consumo orientativos

## 3.2 Uso de calderas de biomasa en invernaderos

La biomasa se puede utilizar en múltiples aplicaciones de generación de calor, incluidos por supuesto los invernaderos. Las limitaciones técnicas son menores y la mayor parte de las veces salvables, por lo que en la mayor parte de los casos la viabilidad de la aplicación de biomasa viene determinada por los parámetros que determinan los costes de cada caso. Los sistemas de calefacción con biomasa tienen en muchos casos considerables ventajas económicas y son, generalmente, fáciles de realizar.

Los factores clave que determinan la viabilidad económica son dos:

- Número de horas de demanda de calor anuales.
- Tamaño de la caldera necesaria.

El primero de ellos depende fundamentalmente de la climatología, es decir, de la localización del invernadero, y del tipo de cultivo. El segundo factor depende fundamentalmente de la superficie de cultivo y de la climatología.

### 3.2.1 Biomásas comercializadas como combustible

En el mercado existen diferentes tipos de biomásas que se comercializan como combustible (Fig. 9). El precio de los combustibles de biomasa que se comercializan es muy inferior al de los combustibles fósiles. Al tratarse en muchos casos de residuos de industrias agrícolas puede haber variaciones importantes por regiones y de un año a otro en función de las cantidades generadas y de la demanda existente. Existen diferencias significativas de unos combustibles de biomasa a otros en función de las calidades (densidad, poder calorífico, humedad y contenido en cenizas).

**Figura 9. Ejemplos de combustibles comercializados para aplicaciones de generación de calor: a) orujo de uva seco, b) hueso de aceituna, c) cáscara de almendra, d) astillas de madera, e) pellet de madera y f) orujillo de aceituna** (CGC Biomasa)



El precio de los biocombustibles será cada vez más competitivo con respecto a los combustibles fósiles según se incremente el precio del petróleo, puesto que aquellos no son tan sensibles al mismo como los combustibles convencionales utilizados para los sistemas de calefacción.

Los biocombustibles más utilizados para el uso de biomasa con aplicaciones para calefacción son los pellets, las astillas de madera y los residuos agroindustriales como los orujillos, las pepitas de uva o las cáscaras de almendra.

No todas las biomásas son combustibles iguales y las calderas están diseñadas para un combustible con unas especificaciones determinadas. Normalmente las calderas de pequeña potencia admiten un combustible estandarizado según una norma, como por ejemplo los pellets o astillas secas (<30%) y cribadas con una granulometría adecuada. Por otro lado, las calderas de gran potencia se diseñan a medida de un combustible determinado y admiten una variación limitada en las características de éste.

En cualquier caso, para el adecuado funcionamiento del sistema de calefacción con biomasa es esencial que la calidad del combustible se corresponda con los requerimientos de la caldera.

Los parámetros más importantes en el combustible son los siguientes:

- Granulometría
- Densidad
- Poder calorífico
- Humedad
- Contenido en cenizas
- Contenido en cloro
- Temperatura fusión cenizas

**Tabla 13. Ejemplos de características de algunas biomásas**

Tipo de biomasa	Humedad (%)	Cenizas (%)	PCI (Kcal/kg)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Precio aproximado (mayo 2006) (€/MWh)
Pellets de madera	<12	<1	>4.000	~700	~25-34
Hueso de aceituna	12-23	<1	>3.800	~680	~23
Cáscara de almendra	~9-15	~1-3	>3.700	~400	~13
Orujo de uva seco	<12	<4	>3.800	~275-300	~11
Astillas de madera	20-55	~1-2	~1.600-3.300	~250	~9-13

Los pellets son un biocombustible estandarizado, cilíndrico, hecho por la compresión de virutas y astillas molturadas y secas, y en muchos casos procedentes de residuos de madera limpios, de serrerías o de otras industrias de la madera. El poder calorífico inferior de los pellets es aproximadamente 4,7 kWh/kg (4.000 kcal/kg).

Dos kilogramos de pellets equivalen aproximadamente a un litro de gasóleo. Los pellets tienen una densidad energética mayor y necesitan menos volumen de almacenamiento que el resto de los biocombustibles pero, no obstante, su precio es más alto.

Las astillas de madera son trozos pequeños de longitudes entre 5 y 50 milímetros en la dirección de la fibra. Tienen un precio más competitivo pero requieren un volumen de almacenamiento mayor. Un m<sup>3</sup> de pellets tiene cuatro veces la energía del contenido de un m<sup>3</sup> de astillas secas. La calidad de las astillas de madera depende de la materia prima y de la tecnología de producción. Las calderas de pequeño tamaño (<~100 kW) preparadas para el uso de astillas requieren un combustible de alta calidad (<30% de humedad; 3-16 mm) lo que no siempre se cumple en el caso de las astillas en el mercado.

Otros recursos son los residuos agrícolas y agroalimentarios que están ampliamente extendidos en nuestro país como el hueso de aceituna, cáscara de almendra, orujo de uva, etc.

En los casos en que la disponibilidad de espacio para el almacenamiento es pequeña dos aspectos críticos son la densidad y el poder calorífico del combustible. En este último caso, los combustibles más adecuados son los pellets de madera y el hueso de aceituna que tiene mayor PCI y densidad.

Para calderas compactas de pequeño tamaño (<~100 kW) el contenido en humedad debe ser inferior al 30% y el contenido en cenizas inferior al 1,5%. Calderas de mayor tamaño (~100-600 kW) admiten mayores contenidos en humedad y cenizas, así como granulometrías más gruesas o densidades más bajas. En este caso se pueden utilizar otros combustibles de menor precio.

Aunque la disponibilidad de biomasa es abundante, todavía el número de suministradores es limitado. Nuevas empresas están entrando en el mercado y el número aumenta rápidamente. La aparición de los pellets, con alta densidad energética que permite transportarlos grandes distancias, ha mejorado considerablemente la situación; además, el número de los productores de pellets está creciendo rápidamente.

En cualquier caso, antes del establecimiento de un sistema de calefacción con biomasa debe asegurarse el suministro a largo plazo de los biocombustibles, con una calidad acorde con los requisitos de la caldera y a un precio estable. Este es el primer paso que debe dar el usuario de biomasa.

Algunos distribuidores suministran sólo “grandes cantidades” (un camión) lo cual no es adecuado para pequeñas calderas (< ~100 kW). Los pellets se suministran a granel o también al por menor en sacos de 15-50 kg por lo que son el combustible más adecuado para pequeños consumidores.

### 3.2.2 Calderas de biomasa para calefacción

En el plazo de los últimos 20 años, las calderas de biomasa han experimentado un avance considerable, las emisiones han caído en dos órdenes de magnitud y los rendimientos han alcanzado el mismo nivel que las calderas de gasóleo o de gas. Este progreso ha incluido la fiabilidad de operación de una caldera automática.



Foto 27. Caldera de pellets (cortesía de Soli clima)

Los sistemas modernos de calefacción con biomasa trabajan del mismo modo que los sistemas de calefacción convencionales con gasóleo o gas. El estado actual de desarrollo tecnológico de estas calderas permite que la limpieza de las superficies de intercambio y la extracción de cenizas sean automáticas.



Foto 28. Caldera de parrilla móvil (Novaenergía)

Estos sistemas de calefacción arrancan automáticamente y modulan la potencia según la demanda. Sin embargo, hay que destacar la existencia de una amplia gama de calidades disponibles en el mercado. La

selección cuidadosa de una caldera de alta calidad es esencial para realizar con éxito un proyecto.

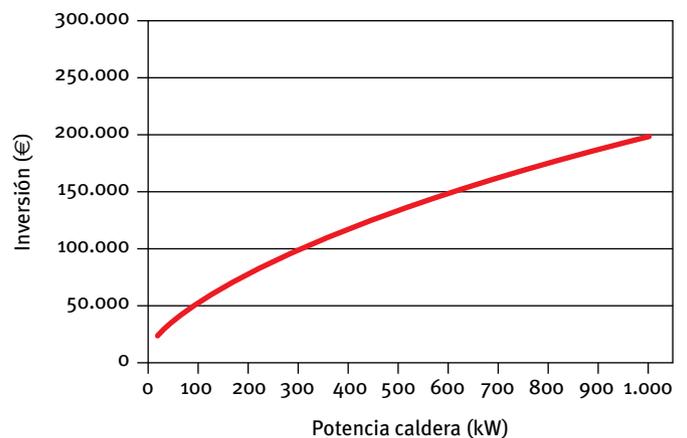
Un sistema de calefacción con biomasa necesita algo más de espacio para la caldera, espacio para el silo de combustible y el acceso para el suministro del mismo.

El número de suministradores de calderas de biomasa no es muy grande pero nuevas empresas están entrando en el mercado y el número aumenta rápidamente. El coste de inversión de la instalación de biomasa (caldera y elementos auxiliares necesarios como silo, alimentación de biomasa, etc.) es bastante mayor que las instalaciones con calderas de gasóleo (hasta 4-10 veces para calderas de biomasa de alta calidad). El valor final en cada caso depende de muchos factores:

- Características combustible
- Rendimiento
- Silo almacenamiento
- Limpieza automática
- Extracción de cenizas
- Límites de emisiones
- Tipo de aplicación
- Obra civil necesaria

Los valores típicos se muestran en la siguiente figura:

**Figura 10. Coste de inversión de una instalación de biomasa en función de la potencia instalada.** [IDAE, LSOLE, ERATIC, CENER (Proyecto BIOSOUTH), Novaenergía, Termosun. HClIngeniería]. Datos 2007



## Rentabilidad de la inversión

La inversión inicial en calderas de biomasa es mayor que con los combustibles fósiles pero, sin embargo, el coste de combustible es claramente menor. Por lo tanto, cuanto mayor sea el ahorro anual en combustible respecto a la inversión inicial antes se amortizará la instalación y menor será el coste del calor generado. Esto depende fundamentalmente de los siguientes factores:

- Horas anuales de funcionamiento a plena carga: ratio entre el consumo anual de combustible (expresado en kWh) y la potencia de la caldera (en kW).
- Potencia de la caldera.
- Diferencial de coste entre el combustible fósil y la biomasa utilizada.

Es necesario analizar cada instalación en concreto y en el momento que se vaya a realizar el proyecto, puesto que los precios de los combustibles fósiles varían en cortos periodos de tiempo y tienen una tendencia creciente. A modo de ejemplo se puede indicar que:

Para una caldera de 200 kW:

- El uso de *pellets*, con precios medios en torno a los 30 €/MWh, puede resultar competitivo con el gasóleo, y con respecto al gas natural dependerá de la tarifa aplicada a la instalación.
- Las *astillas* pueden ser más baratas, aunque todo depende del recorrido que tengan que realizar desde el monte hasta la caldera. Podríamos establecer precios medios razonables de ~12 €/MWh, pero requieren calderas que admitan un combustible de peor calidad y en el caso de calderas pequeñas deben estar suficientemente secas (<30%) y tener la granulometría adecuada. Al ser más baratas, el diferencial de coste con el combustible fósil es mayor, por lo que la viabilidad podría ser interesante.

Como ya se ha indicado, otro de los factores que van a determinar la viabilidad es el tamaño de la instalación. Por ejemplo, para 1.500 h de demanda anual:

- Los *pellets* son normalmente competitivos con el gasóleo para potencias de calderas mayores de ~100 kW.
- Las *astillas* son normalmente competitivas con el gasóleo para potencias de calderas mayores de ~50 kW.

## Pasos a seguir para realizar un proyecto

*Dimensionado de la caldera y cálculo del consumo anual:*

- En primer lugar es necesario conocer la demanda térmica anual y la demanda puntual máxima para dimensionar adecuadamente el sistema de calefacción.

*Suministro de biomasa:*

- Debe asegurarse el suministro a largo plazo de los biocombustibles, con una calidad acorde con los requisitos de la caldera y a un precio estable, antes del establecimiento de un sistema de calefacción con biomasa. El combustible y la forma de suministro determinan el diseño del sistema de calefacción (silo, caldera, etc.).

*Estudio de viabilidad:*

- Se debe contactar con suministradores de calderas para solicitar un presupuesto de la instalación. La información necesaria es la siguiente:
  - La demanda energética: máxima puntual y total anual.
  - El combustible: características (PCI, humedad, cenizas, granulometría, densidad y temperatura de fusión de cenizas).
  - Almacenamiento de biomasa necesario (en función del suministro de biomasa).
  - Modo de suministro y descarga de la biomasa.
  - Espacio disponible para el cuarto de calderas y el silo de combustible, en el edificio o fuera de él.
  - Límites de emisiones de acuerdo con la normativa local.

- Las demandas mínimas de información que deben cubrir las respuestas presentadas son:
  - Características técnicas de la caldera y auxiliares.
  - Especificaciones límites del combustible.
  - Borrador de los esquemas del proyecto.
  - Precio y condiciones de pago.
  - Alcance de suministro y exclusiones.
  - Referencias de clientes con instalaciones similares.

Con esta información y el precio del combustible se deberá estudiar la viabilidad del proyecto.

### 3.2.3 Caso práctico

Para este ejemplo se ha analizado el invernadero nº 1 presentado anteriormente en el balance de energía.

El estudio de esta instalación se ha realizado bajo la financiación de un proyecto Altener Best Result.

#### Descripción de la instalación actual

El aporte térmico necesario se realiza actualmente utilizando gasóleo como combustible en dos pequeños calentadores de aire (2x42,5 kW) y una gran caldera de agua caliente (1.758 kW). La antigüedad de la caldera es de 5 años.

La temperatura en el interior del invernadero se regula entre 15 y 18 °C. Para calentar el invernadero se utiliza agua caliente a 45 °C. La temperatura del agua se regula mezclando el agua caliente generada en la caldera (70 °C) con agua de retorno del invernadero (40-45 °C).

**Tabla 14. Datos técnicos de la caldera instalada en el invernadero**

Modelo caldera	YGNIS EMR-1600 ( $P_{max} = 4 \text{ bar}$ ; $T_{max} = 110 \text{ °C}$ )
Potencia	1.758 kW
Eficiencia caldera	91%
Combustible	Gasóleo
Quemador	ELCO KLOCNER (42-150 kg/h)
Fluido calefactor	Agua caliente (70 °C)

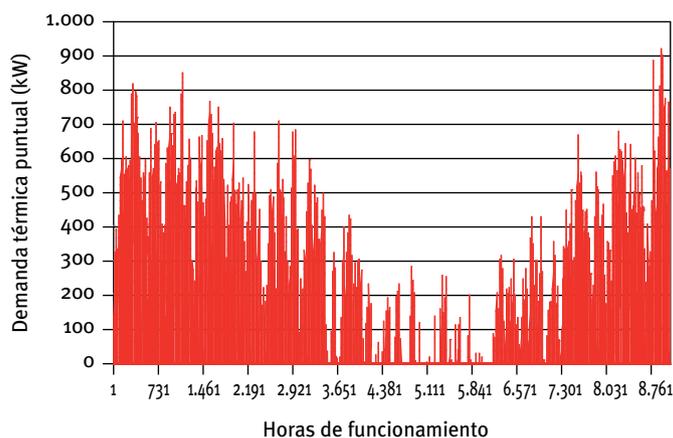
### Cálculo de la demanda térmica

Se ha realizado una simulación del comportamiento energético del invernadero para estimar la demanda anual y la demanda punta en un año tipo. Teniendo en cuenta la ampliación prevista del invernadero (superficie total 8.800 m<sup>2</sup>; 20 túneles) los resultados se muestran en la Figura 11.

El consumo térmico anual (correspondiente al área en rojo en la figura siguiente) es de 1.240.000 kWh y el consumo punta máximo 920 kW.

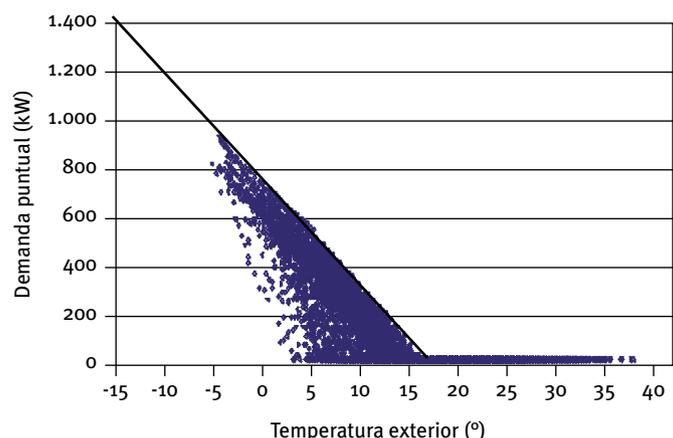
Para la configuración actual (16 túneles; de 7.200 m<sup>2</sup>) el consumo calculado es de 1.090.000 kWh equivalentes a 108.000 l de gasóleo (91% eficiencia).

**Figura 11. Consumo horario del sistema de calefacción del invernadero**



El consumo de gasóleo en 2005 fue de 103.000 l. La diferencia es inferior al 5%, por lo tanto se verifica que la simulación parece reflejar adecuadamente la demanda del invernadero.

**Figura 12. Variación de la demanda punta en función de la temperatura exterior**



## Solución propuesta

Se propone la instalación de una caldera de biomasa en serie con la caldera existente de gasóleo, con el fin de realizar la menor inversión posible y obtener la mejor rentabilidad energética. El procedimiento de operación será aquel que permita a la caldera de biomasa suministrar el consumo base, consiguiendo así un menor gasto anual en combustible fósil, y las demandas punta serán cubiertas por la caldera de gasóleo existente.

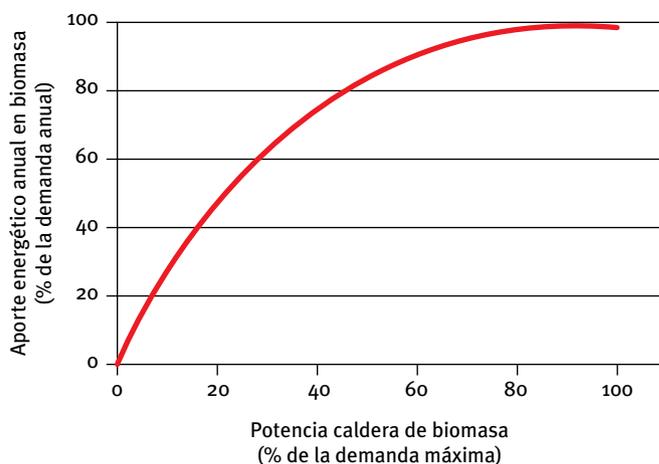
El aporte de calor de la caldera de biomasa se realizará mediante el calentamiento de agua en un circuito secundario e independiente al principal. La transmisión de energía al circuito principal existente se realizará a través de un intercambiador de calor colocado en el retorno del agua a la caldera de gasóleo.

De esta forma, cuando la demanda puntual sea inferior a la correspondiente a la caldera de biomasa (en la mayoría de los casos), la caldera de gasóleo permanecerá apagada, ya que la temperatura del agua de retorno (a 40-45 °C y ya calentada por la caldera de biomasa) es superior a su punto de consigna. Cuando la demanda sea superior al consumo base, la caldera de biomasa no será capaz de aportar toda la energía, puesto que no se ha dimensionado para estos consumos punta (se funciona en estos casos con un mayor caudal a menor temperatura), calentando el agua hasta una temperatura inferior a 70 °C dando la caldera de gasóleo el salto final hasta los 70 °C de consigna para este caudal.

En la siguiente figura se muestra la demanda anual cubierta por la caldera de biomasa (en % del consumo anual de 1.240.000 kWh) en función de la potencia térmica de la caldera de biomasa (en % de la demanda máxima puntual de 920 kW).

Por ejemplo, una caldera de biomasa de 450 kW (que representa el 49% de la demanda puntual máxima del año, 920 kW, y por lo tanto con la mitad de la inversión) aporta el 91% del consumo de combustible anual (y el 91% del ahorro en combustible).

Figura 13. Demanda anual cubierta por la caldera de biomasa

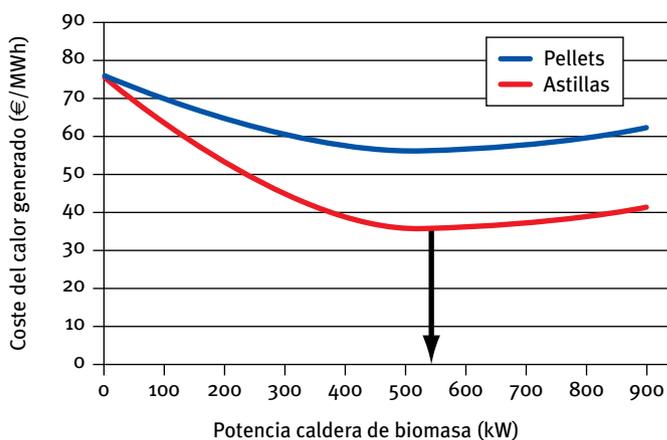


Se ha calculado cual es el coste anual total de calor generado (en €/MWh) para diferentes potencias de calderas de biomasa, considerando dos combustibles: pellets y astillas de madera. Estos combustibles representan el límite superior e inferior de coste de los biocombustibles. Se han tenido en cuenta el coste de instalación de la caldera de biomasa y el coste de mantenimiento anual de ésta. El coste de la caldera se ha anualizado considerando un periodo de 10 años y un interés del 6% anual. Se han considerado los siguientes costes de combustible (Datos año 2006):

- Pellets de madera: 30 €/MWh.
- Astillas de madera: 12 €/MWh.
- Gasóleo: 65 €/MWh.

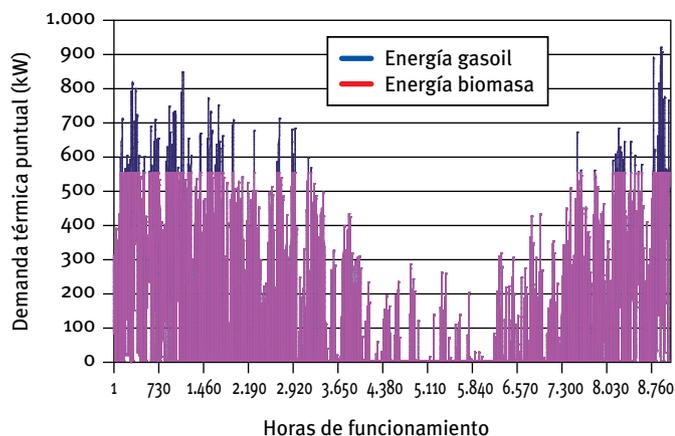
Los resultados se muestran en la gráfica representada en la Figura 14.

Figura 14. Coste de la generación de calor en función de la potencia de la caldera



Por lo tanto, se recomienda instalar una caldera con una potencia en torno a 550 kW que utilice astillas de madera como combustible principal.

**Figura 15. Representación de la demanda térmica horaria del invernadero**



Calderas de este tamaño pueden utilizar astillas de madera con un contenido en humedad y cenizas relativamente alto, que tienen un precio inferior a otras biomasa.

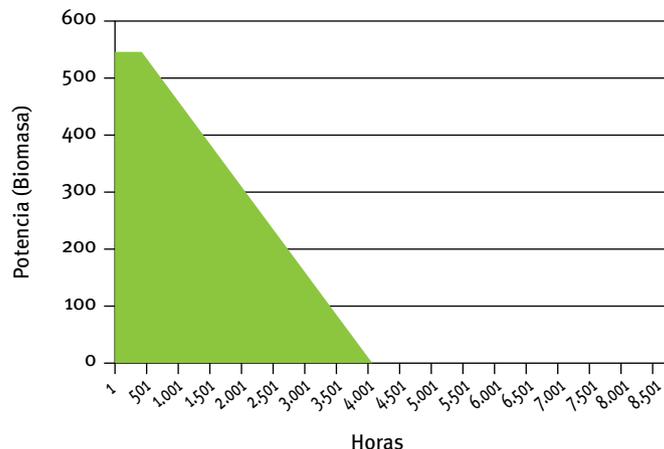
También se podrá utilizar otro combustible de precio similar que cumpla las especificaciones de la caldera (orujo de uva, cáscara de almendra, etc.). La disponibilidad de espacio puede ser suficiente para las necesidades de almacenamiento y el consumo anual. El precio de pellets es mayor y su uso no se justifica en este caso por el tamaño de la caldera, la disponibilidad de espacio para almacenamiento y el consumo anual de combustible, que es suficientemente alto.

La potencia de esta caldera se corresponderá con el 60% de la demanda máxima pero, sin embargo, aportará el 97% del consumo de combustible. El consumo base se aporta con biomasa y las puntas de demanda con la caldera de gasóleo existente.

La caldera de biomasa estará en funcionamiento 4.000 horas al año y la de gasóleo sólo unas 500 horas al año, como puede verse en la Figura 16.

Dado que la mínima potencia necesaria de la caldera de biomasa es aproximadamente 140 kW y la demanda a este valor es inferior a 1.000 h al año, se recomienda la instalación de un depósito de acumulación para cubrir estos periodos.

**Figura 16. Representación del tiempo de funcionamiento de la caldera de biomasa**



### Análisis económico

Los parámetros económicos del proyecto se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 15. Principales parámetros económicos del proyecto**

	Pot. máxima demandada	919	kW	
	Potencia biomasa	551	kW	60%
<b>A</b>	Inversión caldera biomasa	137.337	€	
	anualizada	18.660	€/año	6%; 10 años
<b>B</b>	Mantenimiento	5.924	€/año	
<b>C</b>	Demanda cubierta con gasóleo	41.409	kWh/año	3%
	Consumo gasóleo	48.716	kWh/año	4.223 l/año
		3.167	€/año	
<b>D</b>	Demanda cubierta con biomasa	1.198.320	kWh/año	97%
	Consumo biomasa	1.409.788	kWh/año	
		16.917	€/año	
		335	t/año	Astillas 20% HR
<b>E= B+C+D</b>	Total consumos anuales (con biomasa)	26.008	€/año	
<b>F</b>	Consumo gasóleo sin biomasa	94.803	€/año	
<b>F-E</b>	Ahorro operación	68.795	€/año	

(Continuación)

<b>F-E-A</b>	Ahorro total	50.135	€/año
	Tiempo retorno de la inversión	2,0	años
	Coste calor consumido	36,0	€/MWh

El ahorro anual es de aproximadamente 69.000 €, por lo que la inversión necesaria (aproximadamente 137.000 € sin incluir la obra civil) se amortiza en algo más de 2 años. El coste del calor generado será de 36 €/MWh.

### 3.3 Uso de energía geotérmica para la climatización de invernaderos

De todos es sabido que el interior de la Tierra está caliente y que, a medida que profundizamos hacia el interior de ella se encuentran temperaturas crecientes. A veces no llegamos a percibir cómo el calor de la Tierra se disipa hacia su parte más externa. Sin embargo, ya el hombre primitivo aprovechaba esta característica peculiar del subsuelo y buscaba abrigo de las bajísimas temperaturas que entonces sufrían y se acomodaba en las cavernas que mantienen su temperatura prácticamente estable durante todo el año.

Las fumarolas, géiseres y fuentes termales son fenómenos observables en superficie que denotan un calor que proviene del subsuelo.

Todas ellas son manifestaciones del calor que el interior de la Tierra transmite hacia su exterior y que constantemente se “desperdicia” en la corteza terrestre. En suma, son indicaciones de la estructura interna de la Tierra formada por capas sucesivas tanto más calientes cuanto más hacia el interior se encuentran situadas.

La energía geotérmica es, en su más amplio sentido, la energía calorífica que la Tierra transmite desde sus capas internas hacia la parte más externa de la corteza terrestre.

El gradiente geotérmico, esto es, el incremento de temperatura según profundizamos en la corteza terrestre, observado en la mayor parte del globo es de unos 2,5-3 °C cada cien metros. Es lo que se conoce como gradiente geotérmico normal.

En regiones muy delimitadas y específicas del globo, el gradiente es muy superior al gradiente normal. Se

trata de regiones de gradiente geotérmico anómalo en las que el incremento de temperatura con la profundidad es muy superior a los 3 °C/100 m. Estas regiones se sitúan sobre áreas geológicamente activas de la corteza terrestre.

El gradiente geotérmico es una medida fácil de obtener y permite conseguir una estimación de la cantidad de flujo de calor que se transmite desde las zonas internas de la corteza hacia las zonas externas. El flujo de calor se expresa en unidades de mW/m<sup>2</sup> y, aunque más difícil de medir en campo, representa la cantidad de calor geotérmico que se desprende por unidad de superficie.

La energía geotérmica de baja temperatura tiene múltiples usos, siendo uno de ellos en agricultura, y una aplicación agrícola de fluidos geotermales es el uso en la climatización de invernaderos.

Bien utilizando las aguas termales que surgen de las profundidades terrestres, bien utilizando el calor terrestre a través de sondeos profundos donde introducimos una tubería con un fluido caloportador, el uso de energía geotérmica es un hecho y puede suponer una fuente de ahorro y diversificación energética para la climatización de invernaderos en nuestras latitudes, donde como ya hemos visto es necesario calefactar los invernaderos en los meses más fríos.

La existencia de un foco caliente nos va a permitir utilizar esta energía en otras aplicaciones, como la producción de frío a través del uso de una máquina de absorción (frío que podemos utilizar para refrigerar el invernadero en las épocas de mayor temperatura).

La aplicación de esta energía invernadero se realiza utilizando los sistemas habituales de climatización de invernaderos: a través de circulación forzada de aire, mediante tuberías de circulación de agua caliente bien dentro o sobre el suelo, radiadores, etc.

La energía geotérmica, en función de la localización geográfica, podría llegar a ser la única fuente de energía necesaria para la climatización del invernadero. No obstante, si no fuera suficiente, podemos combinarla con las fuentes auxiliares tradicionales (electricidad, derivados del petróleo, gas natural) u otras energías renovables (solar térmica, biomasa).

# REGLAS CLAVE

## Para el Ahorro y la Eficiencia Energética en los invernaderos

### CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

- ✓ Orientación Este-Oeste para maximizar la captación de energía solar.
- ✓ Altura mínima bajo la canal de 4 metros para aumentar la inercia térmica y facilitar la ventilación.
- ✓ Anchura máxima del invernadero de 50 m para mejorar la ventilación.
- ✓ Separación mínima entre invernaderos adyacentes de 3 m para facilitar el flujo de aire por ventilación natural.
- ✓ Tuberías de calefacción principales enterradas para disminuir la pérdida de calor fuera del invernadero.

### ESTANQUEIDAD

- ✓ Asegurar la hermeticidad de la cubierta y el correcto cierre de las ventanas.
- ✓ Utilizar pantallas térmicas también en los laterales de los invernaderos y en la unión entre los paños bajo cubierta.
- ✓ Disponer mallas cortavientos que permitan su uso en el periodo invernal y se puedan desmontar en los periodos cálidos para no disminuir la ventilación.

### MATERIALES DE CUBIERTA

- ✓ Utilizar materiales de cubierta con una transmisividad a la radiación solar (300-2.500 nm) superior al 80% y una transmisividad máxima a la radiación infrarroja (2.500-40.000 nm) inferior al 50%.
- ✓ Blanquear el invernadero en periodos cálidos para disminuir las necesidades de refrigeración.
- ✓ Utilizar dobles cubiertas en los invernaderos que dispongan de sistemas de calefacción por agua caliente.

### VENTILACIÓN

- ✓ Orientación de las ventanas cenitales perpendiculares a los vientos dominantes en el periodo cálido.
- ✓ Disponer de una superficie de ventilación de al menos el 30% de la superficie de suelo cubierto por el invernadero.
- ✓ Porosidad de las mallas anti-insecto superior al 40% para no disminuir en exceso la ventilación natural.

### ILUMINACIÓN ARTIFICIAL

- ✓ Reemplazar las lámparas incandescentes por fluorescentes.

### SISTEMAS DE APOYO PASIVOS

- ✓ Utilizar pantallas térmicas aluminizadas cuando se utilice la calefacción, para reducir las pérdidas de calor por conducción-convección y por radiación nocturna de onda larga.
- ✓ Compartimentación del invernadero durante los periodos fríos para evitar una incorrecta distribución del calor.
- ✓ Emplear mallas de sombreo en los periodos cálidos para reducir el aporte de calor por radiación solar.

### CALEFACCIÓN

- ✓ Aislar bien las calderas, utilizar quemadores de funcionamiento fraccionado y sistemas de recuperación de calor en los humos de escape o turbuladores para mejorar el rendimiento en la generación del calor.
- ✓ Registrar el consumo energético de la calefacción.
- ✓ Disminuir al máximo posible las consignas de temperatura y aumentar las de humedad relativa.
- ✓ Utilizar tuberías de calefacción al nivel del cultivo para optimizar la distribución de calor.
- ✓ Emplear biocombustibles para las calderas.
- ✓ Utilizar sistemas con dos calderas con la mitad de potencia para regular las necesidades de calefacción y maximizar su rendimiento térmico.
- ✓ Instalar ventiladores de recirculación para mejorar la distribución de calor y mejorar la uniformidad del clima.

### REVISIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS

- ✓ Limpiar la cubierta del invernadero en el periodo invernal para maximizar la captación de energía solar.
- ✓ Reparar las posibles roturas en la cubierta del invernadero para evitar la pérdida de calor por infiltración de aire y renovar la cubierta del invernadero respetando la vida útil del material.
- ✓ Realizar una calibración y renovación periódica de los sensores climáticos.
- ✓ Programar la revisión y mantenimiento de los diferentes sistemas de climatización.
- ✓ Mantenimiento, limpieza y renovación de las lámparas y fuentes de luz de forma periódica.
- ✓ Comprobar periódicamente la eficiencia de los quemadores del sistema de calefacción.

# Anexo: Cálculo a través de expresiones matemáticas del balance energético en un invernadero

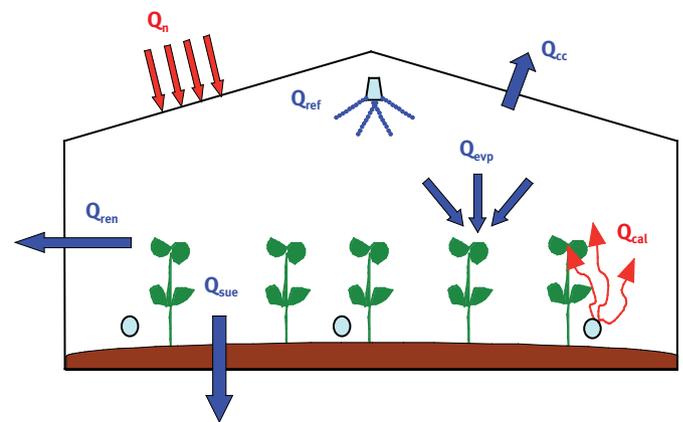
Los términos que intervienen en el balance energético de un invernadero se indican en forma de intensidad de energía. Según el Primer Principio de la Termodinámica, la energía ganada por el sistema se equilibra con la energía perdida por el mismo. Sin embargo, cada autor suele considerar una serie de componentes del balance energético despreciando otros. Existen diversos modelos simplificados del balance de energía (Walker, 1965; Walker et al., 1976; Kindelan, 1980; Arinze et al., 1984; Boulard y Baille, 1987; Al-Jamal, 1994; Baille, 1996).

Una forma simplificada de la ecuación del balance de energía en el invernadero puede ser:

$$R_n + Q_{cli} = Q_{cc} + Q_{ren} + Q_{evp} + Q_{sue} \quad (W)$$

Energía ganada
Energía perdida por el aire del invernadero

Figura 1. Balance energético en un invernadero



A continuación se presentan las diferentes expresiones matemáticas que permiten evaluar la energía calorífica que se introduce o se pierde en un invernadero, así como los parámetros y variables que intervienen en su cálculo.

## Radiación neta, $R_n$

Para el cálculo del balance radiativo a nivel del invernadero se puede considerar que la radiación neta que calienta el invernadero es igual a la energía absorbida por la cubierta, por el suelo y las plantas menos la radiación emitida por la cubierta:

$$R_n = S_s \cdot [I \cdot (\alpha + \tau \cdot \alpha_s)] + S_c \cdot \sigma \cdot \tau_{ter} \cdot (\epsilon_{atm} \cdot T_{atm}^4 - \epsilon_{ter} \cdot T_c^4) \quad (W)$$

Donde:

$S_s$ : superficie captadora de la radiación solar ( $m^2$ )

$I$ : radiación solar incidente ( $W/m^2$ )

$\alpha$ : coeficiente de absorción de la cubierta para la radiación solar (Tabla 8)

$\tau$ : coeficiente de transmisión del material de cubierta para la radiación solar

$S_c$ : superficie de suelo cubierta ( $m^2$ )

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzman ( $5,67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ )

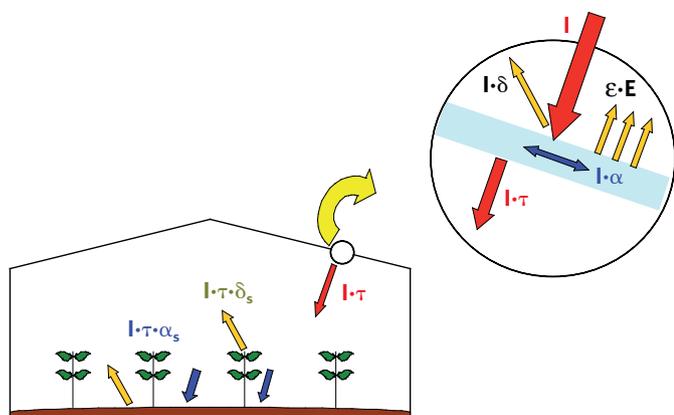
$\tau_{ter}$ : coeficiente de transmisión del material de cubierta para la radiación térmica

$\epsilon_{ter}$ : emisividad del material de cubierta para la radiación térmica

$T_c$ : temperatura absoluta de la cubierta (K)

En la siguiente figura se representa el balance radiativo considerado:

**Figura 2. Balance de radiación en un invernadero**



El coeficiente de absorción de las plantas y del suelo  $\alpha_s$  puede calcularse como:

$$\alpha_s = \alpha_{pla} \cdot f_p + \alpha_{sue} \cdot (1 - f_p)$$

Siendo  $f_p$  la fracción de suelo cubierto por las plantas y  $\alpha_{pla}$  el coeficiente de absorción de las plantas para la radiación solar (Tabla 6).

**Tabla 1. Coeficientes de absorción de una cubierta vegetal para la radiación solar y térmica en función del índice de área foliar, LAI.** (Stanghellini, 1987)

LAI	$\alpha_{pla}$ (400-2.800 nm)	$\alpha_{pla}$ (2.800-40.000 nm)
2,0	0,65	0,72
2,5	0,71	0,80
3,0	0,75	0,85
3,5	0,78	0,89
4,0	0,81	0,92

El coeficiente de absorción del suelo a la radiación solar se puede obtener a partir de su reflexión a la radiación solar o albedo  $\rho_{sue}$  (Tabla 1):

$$\alpha_{sue} = 1 - \rho_{sue}$$

**Tabla 2. Valores del albedo para diferentes superficies de suelo.** (Elias y Castelví, 1996)

Tipo de superficie	Albedo ( $\rho_{sue}$ )
Arcilla húmeda	0,02-0,08
Arcilla seca	0,16
Arena húmeda	0,09
Arena seca	0,18
Césped	0,15-0,28
Rastrojo	0,15-0,17
Tela blanca	0,30

La temperatura de emisión de energía de la atmósfera puede estimarse a partir de la siguiente expresión (Swinbank, 1963):

$$T_{atm} = f_n \cdot T_e + 0,0552 \cdot (1 - f_n) \cdot T_e^{1,5} \quad (K)$$

**Tabla 3. Absorbividad ( $\alpha$ ), emisividad ( $\epsilon$ ), transmisividad ( $\tau$ ) y reflectividad ( $\delta$ ) para diferentes tipos de radiación; coeficiente de pérdidas de calor (U) y densidad ( $\rho_c$ ) de los materiales comúnmente utilizados como cubierta de invernaderos.**

Siendo  $f_n$  el factor de nubosidad (1 para cielo totalmente cubierto y 0 para cielos claros) y  $T_e$  la temperatura absoluta exterior (K).

Materiales utilizados en cubiertas simples, en dobles paredes o como pantallas térmicas	Espesor (mm)	Radiación solar (300-2.500 nm)			Radiación visible (380-760 nm)			Radiación térmica (2.500-40.000 nm)			U (W/m <sup>2</sup> .°C)	$\rho_c$ (g/cm <sup>3</sup> )
		( $\alpha = \epsilon$ )	( $\tau$ )	( $\delta$ )	( $\alpha = \epsilon$ )	( $\tau$ )	( $\delta$ )	( $\alpha = \epsilon$ )	( $\tau$ )	( $\delta$ )		
Vidrio hortícola (VH)	4	0,03	0,89	0,08	0,01	0,91	0,08	0,90	0,00	0,10	6,7	2,40
Poliéster (PRV)	1	0,01-0,02	0,89-0,92	0,07-0,09	0,01	0,93	0,06	0,64-0,69	0,27-0,32	0,04		1,50
PVC rígido	18	0,11	0,62	0,27	0,02	0,61	0,37	0,92	0,01	0,07	3,8	1,30
Polimetacrilato de metilo (PMMA)	8	0,06	0,82	0,12	0,01	0,92	0,07	0,98	0,00	0,02	3,4	1,19
Polycarbonato (PC)	4	0,08-0,11	0,78	0,14-0,15	0,06-0,10	0,75-0,79	0,15	0,89-0,98	0,02-0,03	0,09	3,5	0,17-0,20
Polietileno sin aditivos (PE)	0,1	0,01	0,88-0,91	0,08-0,11	0,01	0,88-0,91	0,08-0,11	0,04-0,19	0,79-0,84	0,02	9,1	0,92
Polietileno de baja densidad (PEbd)	0,18	0,03	0,88	0,09	0,01	0,89	0,10	0,13-0,40	0,53-0,80	0,07	9,4-16,2	0,91
Polietileno de larga duración (PEld)	0,1	0,03	0,88	0,09	0,01	0,89	0,10	0,20-0,40	0,53-0,76	0,04-0,07	9,4-16,2	0,92
Polietileno infrarrojo (PEir)	0,1	0,03	0,89	0,08	0,01	0,89	0,10	0,77	0,20	0,03	8,6-13,0	0,92
Polietileno térmico (PEt)	0,18	0,03	0,89	0,08	0,02	0,90	0,08	0,80	0,10	0,03	8,6-13,0	0,92
Copolímeros EVA	0,1	0,02	0,89-0,91	0,07-0,09	0,00	0,90-0,92	0,08-0,10	0,42-0,58	0,39-0,55	0,03	7,8	0,94
Coextrusiones PE-EVA-PE	0,2	0,02-0,04	0,82-0,89	0,09-0,14	0,01	0,82-0,85	0,14-0,17	0,59	0,38	0,03	8,8-10,4	0,93
PVC plastificado	0,1	0,02	0,91	0,07	0,01	0,92	0,07	0,62	0,06	0,32	7,7	1,3
PVC armado	0,15	0,06	0,73-0,74	0,20-0,21	0,03	0,73-0,76	0,21-0,25	0,53-0,76	0,09-0,32	0,15	6,5	1,3
Polipropileno (PP)	0,8	0,06	0,74	0,20	0,04	0,73	0,23	0,69-0,71	0,21-0,26	0,05-0,08	11,2	0,91
VH+VH	4+4	0,15	0,72	0,13	0,03	0,82	0,15	0,83	0,00	0,17	3,2	
VH+PE	3,4+0,1	0,04	0,84	0,12	0,01	0,86	0,13	0,87	0,01	0,12	4,2	
VH+EVA	3,4+0,1	0,04	0,84	0,12	0,02	0,86	0,12	0,87	0,01	0,12	4,0	
PE+PE	0,1+0,1	0,03	0,83	0,14	0,00	0,84	0,16	0,28	0,66	0,06	6,8	
PE+EVA	0,1+0,1	0,03	0,87	0,10	0,00	0,88	0,12	0,59-0,70	0,27-0,38	0,03	9,4-10,2	
Pantalla aluminizada en las dos caras	0,04							0,50	0,10	0,40	7,6	
Cara aluminizada hacia el suelo	0,03							0,45	0,23	0,32	7,9	
Cara aluminizada hacia el cielo	0,03							0,50	0,23	0,27	8,1	

Fuentes:  Feuilleley et al., 1989  Nijskens et al., 1989  Nisen y Coutisse, 1981  
 Feuilleley et al., 1994 a.  Nijskens et al., 1984 a.  Nisen et al., 1984  
 Feuilleley y Issanchou, 1996  Nijskens et al., 1984 b.

La emisividad de la atmósfera se puede calcular como (Baile, 1996):

$$\varepsilon_{\text{atm}} = 1 - 0,35 e^{\left(\frac{-10 e_e [\text{hPa}]}{T_e}\right)}$$

Siendo la presión parcial del vapor de agua en el aire en el exterior:

$$e_e = e_{\text{se}} \cdot \text{HR}_e$$

$\text{HR}_e$ : humedad relativa exterior

La presión parcial del vapor saturante en el aire en el exterior se puede calcular mediante la fórmula de Magnus-Tetens (Tetens, 1930; Murray, 1967):

$$e_s = 6,1078 e^{\left[\frac{17,269 t(^{\circ}\text{C})}{t+237,3}\right]} \text{ (hPa)}$$

### Calor perdido por conducción-convección, $Q_{\text{cc}}$

En los intercambios energéticos por conducción-convección entre el interior del invernadero y el ambiente exterior, el calor que pasa por unidad de superficie de cubierta ( $\text{m}^2$ ) y por unidad de tiempo (s), puede expresarse mediante las siguientes ecuaciones:

$$Q_{\text{cc}} = S_d \cdot K_{\text{cc}} \cdot (t_i - t_e) \text{ (W)}$$

Siendo  $S_d$  la superficie desarrollada de la cubierta del invernadero ( $\text{m}^2$ ),  $t_i$  la temperatura interior ( $^{\circ}\text{C}$ ) y  $t_e$  la temperatura exterior ( $^{\circ}\text{C}$ ).

El coeficiente global de pérdidas de calor por conducción-convección es:

$$K_{\text{cc}} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{e_c}{\lambda_c} + \frac{1}{h_e}} \text{ (W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)}$$

Donde:

$e_c$ : espesor del material de cobertura (m)

$\lambda_c$ : conductibilidad térmica del material de cobertura ( $\text{W/m}^3 \cdot \text{K}$ ) (Tabla 9)

$h_e$ : coeficiente superficial de convección para el ambiente exterior del invernadero (Tabla 5)

$\Delta T$ : salto térmico entre el interior y el exterior del invernadero (K)

$v$ : velocidad del viento (m/s)

$L$ : longitud del invernadero (m)

**Tabla 4. Conductividad térmica de algunos materiales de cubierta,  $\lambda_c$**

Material	$\lambda_c$ (W/m·K)
Polietileno de baja densidad (PEbd) <sup>a</sup>	0,45
Copolímero etileno y acetato de vinilo (EVA) <sup>a</sup>	0,45
Polietileno alta densidad (PE) <sup>b</sup>	0,33
Polipropileno (PP) <sup>b</sup>	0,17-0,22
Vidrio celular <sup>b</sup>	0,054-0,067
Policarbonato ondulado (PC) <sup>c</sup>	0,19
Polimetacrilato (PMMA) <sup>c</sup>	0,19
Policloruro de vinilo (PVC) <sup>d</sup>	0,16
Vidrio <sup>e</sup>	0,76

Fuente: <sup>a</sup> Nijskens et al., 1984c; <sup>b</sup> Mills, 1997; <sup>c</sup> Nijskens et al., 1984c; <sup>d</sup> Stöcker et al., 1999; <sup>e</sup> Chapman, 1984

**Tabla 5. Fórmulas empíricas para el coeficiente de convección exterior determinadas por varios autores**

$h_e$ (W/m <sup>2</sup> · °K)	Invernadero
$2,8+1,2 \cdot v$	Invernadero tipo Venlo <sup>a</sup>
$1,32 \cdot \Delta T^{0,25} \cdot v^{0,8}$	Invernadero tipo túnel <sup>b</sup>
$7,2+3,84 \cdot v$	Invernadero de plástico <sup>c</sup>
$5,96 \cdot v^{0,8} \cdot L^{-0,2}$	Invernadero a gran escala <sup>d</sup>
$0,95+6,76 \cdot v^{0,49}$	Invernadero con cubierta de polietileno <sup>e</sup>

Fuente: <sup>a</sup> Bot, 1983; <sup>b</sup> Kittas, 1986; <sup>c</sup> Garzoli y Blackwell, 1987; <sup>d</sup> De Halleux, 1989; <sup>e</sup> Papadakis et al., 1992

El coeficiente superficial de convección para el ambiente interior del invernadero en función de la temperatura de la cubierta y del aire es:

$$h_i = 1,95 \cdot (T_c - T_i)^{0,3} \text{ (W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{K)} \text{ para } (T_c - T_i) \leq 11,1 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

(Papadakis et al., 1992)

$$h_i = 7,2 \text{ (W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{K)} \text{ para } (T_c - T_i) > 11,1 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

(Garzoli y Blackwell, 1987)

### Calor sensible y latente perdido por la renovación del aire interior, $Q_{\text{ren}}$

La entrada de aire procedente del exterior supone una pérdida o ganancia de energía según las diferencias de temperatura y humedad en el exterior:

$$Q_{\text{ren}} = V_{\text{inv}} \cdot R/3600 \cdot \rho \cdot [c_{\text{pa}} \cdot (t_i - t_e) + \lambda_o \cdot (x_i - x_e) + c_{\text{pv}} \cdot (x_i \cdot t_i - x_e \cdot t_e)] \text{ (W)}$$

Donde:

$V_{inv}$ : volumen del invernadero ( $m^3$ )

$c_{pa}$ : calor específico del aire (a  $0^\circ C$  es  $1006,92540 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )

$c_{pv}$ : calor específico del vapor recalentado (a  $0^\circ C$  es  $1875,6864 J/kg \cdot K$ )

$x_i, x_e$ : humedades absolutas interiores y exteriores, respectivamente ( $kg/kg$ )

– La densidad del aire es función de la temperatura y la presión (Donatelli et al., 2006):

$$\rho = \frac{1000 \cdot p}{1,01287 \cdot (t + 273,16)}$$

– La presión dentro del invernadero  $p$  se puede considerar igual a la presión atmosférica, que es función de la elevación sobre el nivel del mar (Jensen et al., 1990):

$$p_{atm} = 101,3 \cdot \left[ \frac{293 - 0,0065 \cdot z}{293} \right]^{5,26}$$

– El calor latente de vaporización se calcula como (Brooker, 1967):

$$\lambda_o = 2502535,259 - 2385,76424 \cdot t \quad (J \cdot kg^{-1})$$

– La humedad absoluta de una masa de aire húmedo es función de la humedad relativa (ASAE, 1999):

$$x = 0,6219 \cdot HR \cdot e_s / (p - HR \cdot e_s)$$

HR: humedad relativa

El cálculo de la presión parcial del vapor en saturación se puede realizar mediante la expresión de Magnus o Tetens (Murray, 1967; Dalezios et al., 2002):

$$e_s = 6,1078 \cdot e^{\left[ \frac{17,269 \cdot t(^{\circ}C)}{t + 237,3} \right]} \quad (hPa)$$

La tasa de renovación de aire  $R$  debido a la infiltración de aire a través de la estructura cuando las ventanas están cerradas es función del tipo de estructura (Tabla 6).

**Tabla 6. Tasas de renovación de aire por infiltración a través de la estructura** (ASAE, 2003)

Tipo de cubierta	R ( $h^{-1}$ )
<b>Nueva construcción</b>	
Láminas de plástico	0,75-1,0
Vidrio o fibra de vidrio	0,5-1,0
<b>Construcciones antiguas</b>	
Vidrio o fibra de vidrio	1-2
Láminas de plástico	2-4

Cuando se abren las ventanas la tasa o índice de renovación de aire del invernadero se puede calcular a partir del caudal de ventilación natural:

$$R = 3600 \left[ s \cdot h^{-1} \right] \cdot \frac{G}{V_{inv}}$$

El caudal de aire que entra y sale del invernadero se debe al efecto combinado de la diferencia de temperatura y del viento (Boulard et al., 1997):

$$G = C_d \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{h_{12} \cdot \Delta T}{T_e \cdot \left( \frac{1}{S_1^2} + \frac{1}{S_2^2} \right)} + \left( \frac{S_1 + S_2}{2} \right)^2 \cdot C_v \cdot v^2} \quad (m^3 \cdot s^{-1})$$

Donde:

$g$ : aceleración de la gravedad,  $9,807 (m/s^2)$

$h_{12}$ : diferencia de altura entre las aperturas de ventilación lateral y cenital ( $m$ )

$S_1$ : superficie efectiva de ventilación lateral ( $m^2$ )

$S_2$ : superficie efectiva de ventilación cenital ( $m^2$ )

$C_v$ : coeficiente adimensional del efecto del viento (Tabla 7)

**Tabla 7. Valores del coeficiente de efecto eólico determinados por algunos autores**

$C_v$	Superficie del invernadero, $S_c (m^2)$
0,10 <sup>a</sup>	416 (2 módulos)
0,14 <sup>b</sup>	179 (1 módulo)
0,071 <sup>c</sup>	900 (túnel)
0,13 <sup>d</sup>	416 (2 módulos)
0,09 <sup>e</sup>	204 (4 módulos)
0,11 <sup>f</sup>	38.700 (60 módulos)

Fuente: <sup>a</sup> Boulard y Baille, 1995; <sup>b</sup> Kittas et al., 1995; <sup>c</sup> Kittas et al., 1996; <sup>d</sup> Papadakis et al., 1996; <sup>e</sup> Baptista et al., 1999; <sup>f</sup> Bailey, 2000

– El coeficiente de caída de presión a través de una ventana con mallas anti-insectos depende del coeficiente adimensional de pérdida de carga:

$$C_d = F^{-1/2}$$

– El coeficiente adimensional de pérdida de carga a través de una ventana con malla anti-insectos puede estimarse como (Bailey et al., 2003):

$$F = -0,0012 \cdot \left(\frac{L}{H}\right)^2 + 0,0396 \cdot \left(\frac{L}{H}\right) + 2,3047 + 1540 \cdot \alpha^{-1,65} + \exp(5,23 - 7,70 \cdot \varphi)$$

Donde:

L: longitud de la apertura de ventilación (m)

H: altura de la apertura de ventilación o profundidad característica (m)

$\alpha$ : ángulo de apertura de una ventana con alerón ( $^\circ$ )

$\varphi$ : porosidad de la malla anti-insectos

Para invernaderos sin mallas existen datos para varias geometrías de ventanas (Tabla 8)

**Tabla 8. Valores del coeficiente adimensional de caída de presión determinados por algunos autores**

$C_d$	Tipo de ventana
0,6-0,8	V. rectangular vertical <sup>a</sup>
0,6-0,7	V. cenitales <sup>b</sup>
0,6	Ventana rectangular <sup>c</sup>
$0,64 + 0,001 \cdot \alpha$	V. cenitales <sup>d</sup>
$\{1,75 + 0,7 \cdot \exp(-L/(32 \cdot H \cdot \text{sen}\alpha))\}^{-0,5}$	V. cenitales <sup>d</sup>
0,63	V. rectangular vertical <sup>e</sup>
0,6-0,7	V. rectangular vertical <sup>f</sup>
0,73	V. rectangular vertical <sup>g</sup>
0,61	V. rectangular vertical <sup>h</sup>
0,74	V. rectangular vertical <sup>i</sup>
$\{1,9 + 0,7 \cdot \exp(-L/(32,5 \cdot H \cdot \text{sen}\alpha))\}^{-0,5}$	V. cenitales <sup>j</sup>
$-0,198 + 0,157 \cdot \ln\alpha + 0,00108 \cdot L/H$	V. alargadas ( $L/H \geq 5$ ) <sup>j</sup>

Fuentes: <sup>a</sup> Brown y Solvason, 1963; <sup>b</sup> Kozai et al., 1980; <sup>c</sup> Bruce, 1982; <sup>d</sup> Bot, 1983; <sup>e</sup> Hellickson y Walker, 1983; <sup>f</sup> Timmons et al., 1984; <sup>g</sup> Kirkpatrick y Hill, 1988; <sup>h</sup> Zhang et al., 1989; <sup>i</sup> de Jong, 1990; <sup>j</sup> Bailey et al., 2003

### Calor latente consumido en la evapotranspiración de las plantas y el suelo, $Q_{evp}$

En los últimos años se han realizado un gran número de estudios para determinar el valor del calor latente

en condiciones de invernadero y para diversos cultivos hortícolas.

Para un cultivo de tomate en invernadero se puede utilizar la siguiente expresión (Jolliet y Bailey, 1992):

$$Q_{evp} = S_c \cdot (0,2 \cdot R_{sol} + 5,5 \cdot DPV_i + 5,3 \cdot u) \quad (W)$$

Siendo  $R_{sol}$  la radiación solar diurna ( $W \cdot m^{-2}$ ) (se corresponde con los valores positivos de  $R_n$ ) y  $u$  la velocidad del aire en el invernadero ( $m \cdot s^{-1}$ ).

Para un cultivo de gerbera en invernadero los coeficientes de la expresión anterior son diferentes (Marfà et al. 2000):

$$Q_{evp} = S_c \cdot (0,3 \cdot R_{sol} + 38,54 \cdot DPV_i + 15,58) \quad (W)$$

El déficit de presión de vapor en el interior del invernadero es:

$$DPV_i = e_s(t_i) - e_i \quad (kPa)$$

De forma general el flujo de calor absorbido por el agua evapotranspirada se obtiene a partir de la evapotranspiración potencial dentro del invernadero (Allen, 2000):

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - Q_{sue}) + \frac{37 \cdot \gamma}{T_i} \cdot u \cdot DPV_c}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u)}$$

La pendiente de la curva de presión de vapor se puede calcular como la derivada parcial de la ecuación de Murray (Donatelli et al., 2006):

$$\Delta = 4098 \cdot \frac{0,61078 \cdot e \cdot \frac{17,269 \cdot t}{t + 237,3}}{(t + 237,3)^2} \quad (kPa \cdot ^\circ C^{-1})$$

La constante psicrométrica es función de la presión atmosférica, la capacidad calorífica del aire y el calor latente de vaporización (Donatelli et al., 2006):

$$\gamma = c_{pa} \cdot p / (0,6219 \cdot \lambda_o)$$

Evapotranspiración del cultivo:

$$ET_c = k_c \cdot ET_o$$

El calor absorbido por la evapotranspiración del cultivo es:

$$Q_{evp} = \lambda_o \cdot ET_c \quad (W/m^2)$$

El coeficiente del cultivo se puede estimar en función del índice de área foliar del cultivo (Doorenyos y Pruitt, 1977; Allen et al., 1998):

$$k_c = k_{c_{ini}} + \left[ \frac{k_{c_{mid}} - k_{c_{ini}}}{3} \right] \cdot LAI$$

**Tabla 9. Valores de los coeficientes de cultivo para los estados de crecimiento inicial  $k_{c_{ini}}$ , a mitad de campaña  $k_{c_{med}}$  y a final de campaña  $k_{c_{fin}}$  de los principales cultivos hortícolas creciendo en invernaderos de plástico en Almería** (Orgaz et al., 2005)

Cultivo	$k_{c_{ini}}$	$k_{c_{med}}$	$k_{c_{fin}}$
Melón rastrero	0,2	1,1	1,0
Melón entutorado	0,2	1,3	1,1
Judía verde	0,2	1,4	1,2
Pimiento	0,2	1,3	0,9
Sandía rastrera	0,2	1,1	1,0

### Flujo de calor perdido por conducción a través del suelo, $Q_{sue}$

Una parte de las pérdidas de calor en el invernadero, alrededor del 10%, se producen a través del suelo. Su cálculo se realiza mediante la fórmula:

$$Q_{sue} = K_s \cdot S_c \cdot (t_i - t_s) / p \quad (W)$$

Donde:

$K_s$ : coeficiente de intercambio térmico a través del suelo ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ) (Tabla 10)

$T_s$ : temperatura del suelo del invernadero ( $^\circ C$ )

$p$ : profundidad a la que estima la diferencia de temperatura (m)

**Tabla 10. Conductividad térmica de algunos tipos de suelo,  $K_s$**

Material	$K_s$ ( $W/m \cdot K$ )
Arena de cuarzo <sup>a</sup>	7,7
Arena de río <sup>a</sup>	4,4
Arena de granito <sup>a</sup>	2,7
Grava <sup>b</sup>	2,3-2,8
Tierra húmeda <sup>b</sup>	2,0
Tierra seca <sup>b</sup>	1,0
Lana de roca <sup>c</sup>	0,038-0,048

Cemento <sup>c</sup>	1,16
Hormigón <sup>c</sup>	0,88
Hormigón celular <sup>d</sup>	0,11
Hormigón armado <sup>c</sup>	0,39-1,6
Turba seca <sup>c</sup>	0,08
Arcilla seca <sup>c</sup>	1,0-1,2

Fuente: <sup>a</sup> Côté y Honrad, 2005; <sup>b</sup> Mills, 1997; <sup>c</sup> Chapman, 1984; <sup>d</sup> Stöcker et al., 1999

### Energía calorífica que es necesaria aportar ( $Q_{cal}$ ) o eliminar ( $Q_{ref}$ ) del invernadero, $Q_{cli}$

El calor que es necesario suministrar mediante los sistemas de calefacción o que hay que eliminar del invernadero con los sistemas de refrigeración se deduce del balance de energía:

$$Q_{cli} = Q_{cc} + Q_{ren} + Q_{evp} + Q_{sue} - R_n$$

#### 1.2.4 Análisis del sistema de calefacción

La potencia que suministra un sistema de calefacción depende principalmente de la superficie de tuberías emisoras y de su temperatura.

#### Potencia útil emitida por las tuberías de calefacción

La potencia útil que tienen que emitir las tuberías del sistema de calefacción debe compensar el déficit energético del invernadero ( $Q_{cal}$ ). La potencia útil que emite el sistema de calefacción por agua se puede calcular en función de la temperatura media de las tuberías de calefacción y de su geometría:

$$Q_{cal} = L_p \cdot (\pi \cdot D_o + \eta \cdot p) \cdot (q_c + q_r) \quad (W)$$

Donde:

$L_p$ : longitud de las tuberías de calefacción dentro del invernadero (m)

$D_o$ : diámetro exterior de la tubería (m)

$\eta$ : eficacia de la aleta

– Perímetro de las aletas,  $p$ :

$$p = 2 \cdot (2 \cdot l + z) \quad (m)$$

Siendo **l** la anchura de la aleta (m) y **z** el espesor de las aletas (m).

#### – Transferencia de calor por convección, $q_c$

El calor transmitido por la superficie de las tuberías por convección es:

$$q_c = h_o \cdot (T_o - T_i) \quad (\text{W/m}^2)$$

Siendo **T<sub>o</sub>** la temperatura de la superficie del tubo de calefacción (°C) y **T<sub>i</sub>** la temperatura del aire que rodea las tuberías (fluido en flujo libre) (°C).

El coeficiente de transferencia de calor de la superficie exterior también se puede determinar, para el caso de flujo del laminar en tuberías de calefacción, mediante la expresión (Hollman, 1992):

$$h_o = 1,32 \cdot ((T_o - T_i)/D_o)^{0,25} \quad (\text{W/K} \cdot \text{m}^2)$$

#### – Transferencia de calor por radiación, $q_r$

El calor transmitido por las tuberías mediante radiación es:

$$q_r = \sigma \cdot \varepsilon_{tb} \cdot (T_o^4 - T_i^4) \quad (\text{W/m}^2)$$

Siendo  $\varepsilon_{tb}$  la emisividad de las tuberías de calefacción (Tabla 11).

**Tabla 11. Valores de la emisividad para algunos materiales utilizados en tuberías de calefacción.** (Mills, 1995)

Material	$\varepsilon_{tb}$
Acero inoxidable	0,26-0,42
Aluminio	0,03-0,05
Asfalto	0,88
Hierro oxidado	0,30-0,57
Pintura negra	0,80-0,92
Pintura blanca	0,85-0,90

#### Potencia útil transmitida por el agua caliente

Por otro lado, se puede calcular la potencia útil del sistema de calefacción en función del caudal de agua que circula por las tuberías (limitado por el valor máximo admisible en la caldera) y la temperatura de entrada y de salida del invernadero (limitadas por los

valores de seguridad de las calderas y de las tuberías de calefacción):

$$Q_{cal} = q_{u_w} \cdot c_w \cdot (T_{ent} - T_{sal}) \quad (\text{W})$$

Donde:

$q_{u_w}$ : tasa de flujo de masa del agua de calefacción (kg/s)

$c_w$ : calor específico del agua líquida, 4.190 (J/kg·K)

$T_{ent}$ : temperatura del agua a la entrada de las tuberías (K)

$T_{sal}$ : temperatura del agua a la salida de las tuberías (K)

– La temperatura media del agua se corresponderá con la utilizada en el cálculo inicial de la potencia útil:

$$T_o = T_{med} = (T_{ent} + T_{sal})/2 \quad (^\circ\text{C})$$

#### Potencia suministrada por el quemador

La potencia nominal del quemador se calcula a partir del caudal de combustible que se quema y de su poder calorífico:

$$N_N = q_{u_{mc}} \cdot \text{PCI} \quad (\text{W})$$

Siendo  $q_{u_{mc}}$  el caudal másico de combustible consumido (kg/s) y **PCI** el poder calorífico inferior del combustible (J/kg) (Tabla 12).

**Tabla 12. Características de los combustibles comúnmente utilizados en sistemas de calefacción**

Combustible	PCS (kJ/kg)	PCI (kJ/kg)	$\rho$ (kg·m <sup>-3</sup> ) (a 20 °C)
Gasóleo A	44.000	42.500	0,830
Gasóleo B	44.000	42.500	0,840
Gasóleo C	43.150	42.000	0,830
Fuel-oil Tipo 1	42.740	40.650	-
Fuel-oil Tipo 2	44.000	39.800	-
Gas natural	56.530	51.060	0,7707
Propano	54.190	49.800	1,8785
Butano	53.200	49.000	2,5168

PCS: poder calorífico superior del combustible (J/kg)

La potencia útil del quemador se calcula a partir del rendimiento térmico de la caldera:

$$Q_{cal} = N_N \cdot \eta_{cal} \quad (\text{W})$$

### 1.2.5 Calor eliminado por nebulización

La evaporación de agua dentro del invernadero produce una cesión de calor del aire interior que origina una disminución de su temperatura. Su cálculo se realiza mediante la expresión:

$$Q_{\text{ref}} = q_{\text{u}_{\text{evp}}} \cdot \lambda_o \text{ (W)}$$

Siendo  $q_{\text{u}_{\text{evp}}}$  el caudal de agua aportada por las boquillas de nebulización (kg/s) y  $\lambda_o$  el calor latente de vaporización del agua (J/kg).



# Bibliografía

- ABDEL-GHANY, A.M. y KOZAI, T. “Cooling efficiency of fogging systems for greenhouses”. *Biosystems Engineering*, 94 (1): 97–109. 2006.
- AL-JAMAL, K. “Greenhouse cooling in hot countries”. *Energy*, 19: 1187-1192. 1994.
- ALLEN, R.G. “Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study”. *J. Hydrology*, 229: 27-41. 2000.
- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D. y MARTÍN, M. “Crop evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements”. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Roma, 300 pp. 1998.
- ALPI, A. y TOGNONI, F. “Cultivo en invernadero”. Ed. Mundi-Prensa, Madrid. 1991.
- AMSEN, M.G. “Environmental conditions in different types of greenhouses”. *Acta Horticulturae*, 115: 99-104. 1981.
- ARINZE, E.A., SCHOENAU, G.J. y BESANT, R.W. “A dynamic thermal performance simulation model of an energy conserving greenhouse with thermal storage”. *Transactions of the ASAE*, 27: 508-519. 1984.
- ASAE. “Psychrometric Data. American Society of Agricultural Engineers”. ASAE D271.2 DEC99, St. Joseph, 9 pp. 1999.
- BAILEY, B.J. “Heat conservation in glasshouses with aluminised thermal screens”. *Acta Horticulturae*, 76: 275-278. 1978.
- BAILEY, B.J. “Constraints, limitations and achievements in greenhouse natural ventilation”. *Acta Horticulturae*, 534: 21–30. 2000.
- BAILEY, B.J., MONTERO, J.I., PÉREZ-PARRA, J., ROBERTSON, A.P., BAEZA, E. y KAMARUDDIN, R. “Air-flow resistance of greenhouse ventilators with and without insect screens”. *Biosystems Engineering*, 86 (2): 217-229. 2003.
- BAILLE, A. “Overview of greenhouse climate control in the Mediterranean regions. Cultures protégées

- dans la région méditerranéenne*". Actes du Colloque d'Agadir (Cahiers Options Méditerranéennes vol. 31). 6-9 Octubre, Agadir (Marruecos). 59-76 pp. 1996.
- BAILLE, A., ARIES, F., BAILLE, M. y LAURY, J.C. "*Influence of thermal screen optical properties on heat losses and microclimate of greenhouses*". Acta Horticulturae, 174: 111-117. 1985.
  - BAILLE, A., KITTAS, C. y KATSOULAS, N. "*Influence of whitening on greenhouse microclimate and crop energy partitioning*". Agricultural and Forest Meteorology, 107: 293-306. 2001.
  - BAILLE, M., LAURY, J.C. y BAILLE, A. "*Influence d'un écran thermique sur le bilan énergétique et le microclimat nocturnes d'une serre*". Agronomie, 4(4): 327-332. 1984.
  - BAPTISTA, F.J., BAILEY, B.J., RANDALL, J.M. y MENESES, J.F. "*Greenhouse ventilation rate: Theory and measurement with tracer gas techniques*". J. Agric. Engng Res., 72: 363-374. 1999.
  - BARGACH, M.N., TADILI, R., DAHMAN, A.S. y BOUKALLOUCH, M. "*Comparison of the performance of two solar heating systems used to improve the microclimate of agricultural greenhouses in Morocco*". Renewable Energy, 29: 1073-1083. 2004.
  - BAUERLE, W.L. y SHORT, T.H. "*Conserving heat in glass greenhouses with surface-mounted air-inflated plastic*". Ohio Agricultural Research and Development Center. Special circular 101. 1977.
  - BAUERLE, W.L. y SHORT, T.H. "*Changes in practices for energy conservative greenhouses*". Acta Horticulturae, 115: 309. 1981.
  - BIANCHI, A. "*Tipologie costruttive ed impiantistiche nelle colture protette*". Colture Protette, 7: 23-26. 1989.
  - BOESMAN, G., DEROUICH, M. Y VERLODT, H. "*Influence of solar heating and thermal screen on the greenhouse climate and the yield of pepper (Capsicum annuum L.)*". Acta Horticulturae, 154: 267-279. 1984.
  - BOT, G.P.A. "*Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model*". Tesis Doctoral. Agricultural University of Wageningen (Holanda), 240 pp. 1983.
  - BOULARD, T. y BAILLE, A. "*Analysis of thermal performances of greenhouse as solar collector*". Energy in Agriculture, 5: 175-184. 1987.
  - BOULARD, T. y BAILLE, A. "*Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents*". J. Agric. Engng Res., 61: 37-48. 1995.
  - BROOKER, D.B. "*Mathematical model of psychometric chart*". Trans. Am. Soc. Ag. Eng., 10: 558-560. 1967.
  - BROWN, W.G. y SOLVASON, K.R. "*Natural convection through rectangular openings in partitions*". International Journal of Heat and Mass Transfer, 5 (9): 859-862. 1962.
  - BRUCE, J.M. "*Ventilation of a model livestock building by thermal buoyancy*". Transactions of the ASAE, 25 (6): 1724-1726. 1982.
  - CAPEL, J.J. "*Climatología de Almería. Cuadernos monográficos 7*". Instituto de Estudios Almerienses de la Diputación de Almería, 160 pp. Almería. 1990.
  - CARELS, K. y VAN LIERDE, D. "*Policies to reduce energy use and emissions in Belgian glasshouse horticulture*". Acta Horticulturae, 536: 12-15. 2000.
  - CHAPMAN, A.J. "*Transmisión del calor*". Librería Editorial Bellisco, 731 pp. Madrid. 1984.
  - CÔTÉ, J. y KONRAD, J.M. "*Thermal conductivity of base-course materials*". Can. Geotech. J., 42: 61-78. 2005.
  - DALEZIOS, N.R., LOUKAS, A. y BAMPZELIS, D. "*The role of agrometeorological and agrohydrological indices in the phenology of wheat in central Greece*". Physics and Chemistry of the Earth, 27: 1019-1023. 2002.
  - DE GRAAF, R. "*The influence of thermal screening and moisture gap on the transpiration of glasshouse tomatoes during the night*". Acta Horticulturae, 174:57-66. 1985.

- DE HALLEUX, D. “*Dynamic model of heat and mass transfer in greenhouses: theoretical and experimental study*”. Tesis Doctoral. Gembloux (Bélgica). 1989.
- DE JONG, T. “*Natural ventilation of large multi-span greenhouses*”. Tesis Doctoral, Agric. University Wageningen (Holanda), 116 pp. 1990.
- DELTOUR, J., HALLEUX, D. DE, NIJSKENS, J., COUTISSE, S. y NISEN, A. “*Dynamic modelling of heat and mass transfer in greenhouses*”. *Acta Horticulturae*, 174: 119-126. 1985.
- DONATELLI, M., BELLOCCHI, G. y CARLINI, L. “*Sharing knowledge via software components: Models on reference evapotranspiration*”. *Europ. J. Agronomy*, 24: 186–192. 2006.
- DOORENBOS, J. y PRUITT, W.O. “*Guidelines for predicting crop water requirements*”. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. FAO, 194 pp. Roma. 1977.
- EIA (ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION). “*International Energy Outlook*”. Office of Integrated Analysis and Forecasting, U.S. Department of Energy, DOE/EIA-0484, UC-950. Washington, DC. 1999.
- ELBATAWI, I.E. “*Heating inside a greenhouse at night using solar energy*”. ASAE Annual Meeting, Paper number 034040. 2003.
- ELÍAS, F. y CASTELLVÍ, F. “*Agrometeorología*”. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) y Edit. Mundi-Prensa, 517 pp. Madrid. 1996.
- FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION). “*El cultivo protegido en clima mediterráneo*”. Estudio FAO Producción y Protección Vegetal nº 90. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 320 pp. Roma. 2002.
- FERARE, J. y GOLDSBERRY, K.L. “*Environmental conditions created by plastic greenhouse covers*”. *Acta Horticulturae*, 148: 675-682. 1984.
- FEUILLOLEY, P., GUILLAUME, S. y ISSANCHOU, G. “*Couverture de serre. Mesure de la transparence thermique des matériaux*”. CEMAGREF, BTMEA nº 35, pp. 24-56. Enero 1989.
- FEUILLOLEY, P. e ISSANCHOU, G. “*Greenhouse covering materials measurement and modelling of thermal properties using the hot box method and condensation effects*”. *J. Agric. Engng Res.*, 65: 129-142. 1996.
- FEUILLOLEY, P., ISSANCHOU, G., JACQUES, J.C., GUILLAUME, S., MEKIKDJIAN, CH., MIRABELLA, J.F. y MERLOT, A. “*Films plastique de couverture de serre: condensations et propriétés thermiques*”. *Résultats de mesure. Plasticulture*, 103: 2-10. 1994.
- FICHERA, C.R., CASCONI, G. y ARCIDIACONO, C. “*Studio del regime del terreno sotto serra. Parte prima: analisi dei rilievi sperimentali*”. *Journal Ingegneria Agraria*. 1996.
- FRITSCHEN, L.J. y GAY, L.W. “*Environmental Instrumentation*”. Springer-Verlag, New York. 1979.
- GARDNER, P. “*Energy Management Systems in Buildings*”. Energy Publications. 1984.
- GARNAUD, J.C. “*The intensification of horticultural crop production in the Mediterranean basin by protected cultivation*”. Food and Agriculture Organization of U.N. (FAO), Roma. 1974.
- GARZOLI, K.V. y BLACKWELL, J. “*An analysis of the nocturnal heat loss from a double skin plastic greenhouse*”. *J. Agric. Engng Res.*, 36: 75-85. 1987.
- GONZÁLEZ BENAVENTE-GARCÍA, A. y MARTÍNEZ GARCÍA, P.F. “*Improvement of the thermal environment of the propagation house and its effect on the tomato fruit-set*”. *Acta Horticulturae*, 115: 301-307. 1981.
- HELLICKSON, M.A. y WALKER, J.N. “*Ventilation of Agricultural Structures*”. ASAE Monograph nº 6. American Society of Agricultural Engineers (ASAE), St Joseph (EE.UU.), 374 pp. 1983.
- HERRING, H., HARDCASTLE, R. y PHILLIPSON, R. “*Energy use and energy efficiency in UK commercial and public buildings up to the year 2000*”. Energy Efficiency Series, Energy Efficiency Office (Reino Unido). 1988.
- HOLLMAN, J.P. “*Heat Transfer*”. McGraw-Hill, Nueva York. 1992.

- ICHSANI, D. Y WULANDARI, D.A. “*Design and experimental testing of a solar dryer combined with kerosene stoves to dry fish*”. ASAE Annual Meeting, paper number 028024. 2002.
- JENSEN, M.E., BURMAN, R.D. y ALLEN, R.G. “*Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*”. Amer. Soc. of Civil Eng., New York. 1990.
- JOILLET, O. y BAILEY, B.J. “*The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurement and model comparisons*”. Agric. and Forest Meteorology, 58: 43-62. 1992.
- JONATHAN, E.S. y JIANG, Z. “*China energy databook 1993*”. Ibl-32822, Rev. 2, uc-350, Energy Analysis Program, Energy and Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory, and Energy Research Institute, State Planning Commission of China. 1994.
- JUNTA DE ANDALUCÍA. “*Datos energéticos de Andalucía 2004*”. Agencia Andaluza de la Energía. Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa, Sevilla, 127 pp. 2005.
- KINDELAN, M. “*Dynamic modeling of greenhouse environment*”. Transactions of the ASAE, 23: 1232-1239. 1980.
- KIRKPATRICK, A.T. y HILL, D. “*Mixed convection heat transfer in a passive solar building*”. Solar Energy, 40 (1): 25-34. 1988.
- KITTAS, C. “*Greenhouse cover conductances*”. Boundary Layer Meteorology, 36: 213-225. 1986.
- KITTAS, C., BOULARD, T., MERMIER, M. y PAPADAKIS, G. “*Wind induced air exchange rates in a greenhouse tunnel with continuous side openings*”. J. Agric. Engng Res., 65: 37-49. 1996.
- KITTAS, C., DRAOUI, B. y BOULARD, T. “*Quantification du taux d'aération d'une serre á ouvrant continu en toiture*”. Agric. Forest Meteor., 77: 95-111. 1995.
- KOZAI, T., SASE, S. y NARA, M. “*A modelling approach to greenhouse ventilation control*”. Acta Hort., 106: 125-138. 1980.
- LAMRANI, M.A., BOULARD, T., ROY, J.C. y JAFFRIN, A. “*Airflows and temperature patterns induced in a confined greenhouse*”. Journal of Agricultural Engineering Research, 78: 75-88. 2001.
- LAZAAR, M., KOOLI, S., HAZAMI, M., FARHAT, A. y BELGHITH, A. “*Use of solar energy for the agricultural greenhouses autonomous conditioning*”. Desalination, 168: 169-175. 2004.
- LAZAAR, M., KOOLI, S., HAZAMI, M., FARHAT, A. y BELGHITH, A. “*Comparison between a solar system and a fuel boiler for greenhouse air-conditioning*”. Desalination, 168: 391-396. 2004.
- LIAO, Z. y DEXTER, A.L. “*The potential for energy saving in heating systems through improving boiler controls*”. Energy and Buildings, 36: 261-271. 2004.
- MARFÀ, O., BIEL, C., BLANCH, F. y MONERO, J.I. “*Water consumption of a closed soilless culture of gerbera*”. Usefulness of models to estimate evapotranspiration. Acta Horticulturae, 534: 147-153. 2000.
- MENESES, J.F. y MONTEIRO, A.A. “*Ducted air heating systems in greenhouses: experimental results*”. International Symposium on Simple Ventilation and Heating Methods for Greenhouses in Mild Winter Climates. Acta Horticulturae, 263: 285-292. 1990.
- MIGUEL, A.F., VAN DE BRAAK, N.J., SILVA, A.M. y BOT, G.P.A. “*Free-convection heat transfer in screened greenhouses*”. J. Agric. Engng Res., 69: 133-139. 1998.
- MILLS, A.F. “*Transferencia de calor*”. Mcgraw-Hill/Irwin, Nueva York. 932 p. 1997.
- MINISTERIO DE ECONOMÍA. “*Estrategia de ahorro y eficiencia energética en España 2004-2002*”. Documento de Trabajo E4. Secretaría de Estado de Energía, Desarrollo Industrial y de la Pequeña y Mediana Empresa. Ministerio de Economía, 68 pp. Madrid. 2003.
- MOLINA-AIZ, F.D., VALERA, D.L. y ÁLVAREZ, A.J. “*Measurement and simulation of climate inside Almería-type greenhouses using Computational Fluid Dynamics*”. Agricultural and Forest Meteorology, 125: 33-51. 2004.

- MONTERO, J.I. y ANTÓN, A. “Evolución tecnológica de los invernaderos españoles”. *Acta Horticulturae*, 357: 15-28. 1994.
- MURRAY, F.W. “On the computation of saturation vapor pressure”. *J. Appl. Meteorol.* 6: 203-204. 1967.
- NIJSKENS, J., DELTOUR, J., COUTISSE, S. y NISEN, A. “Heat transfer through covering materials of greenhouses”. *Agricultural and Forest Meteorology*, 33: 193-214. 1984c.
- NIJSKENS, J., DELTOUR, J., COUTISSE, S. y NISEN, A. “Radiometric and thermal properties of the new plastic films for greenhouse covering”. *Acta Horticulturae*, 245: 71-77. 1989.
- NIJSKENS, J., DELTOUR, J., NISEN, A. y COUTISSE, S. “Agronomic and radiometric characterization of greenhouse materials”. *Acta Horticulturae*, 148: 663-673. 1984a.
- NIJSKENS, J., DELTOUR, J., NISEN, A. y COUTISSE, S. “Propriétés radiométriques des matériaux plastiques”. *Acta Horticulturae*, 154: 33-42. 1984b.
- NISEN, A. y COUTISSE, S. “Photometric properties of double wall plastics used as covering for greenhouses”. *Acta Horticulturae*, 115: 85-97. 1981.
- NISEN, A., NIJSKENS, J., DELTOUR, J. y COUTISSE, S. “Détermination des propriétés radiométriques des matériaux plastiques utilisés en couverture des serres”. *Acta Horticulturae*, 154: 19-30. 1984.
- ORGAZ, F., FERNÁNDEZ, M.D., BONACHELA, S., GALLARDO, M. y FEDERES, E. “Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse”. *Agricultural Water Management*, 72: 81-96. 2005.
- OZGENER, O. y HEPBASLI, A. “Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system”. *Energy and Buildings*, 37: 101-110. 2005.
- PAPADAKIS, G., FRANGOUDAKIS, A. y KYRITSIS, S. “Mixed, forced and free convection heat transfer at the greenhouse cover”. *J. Agric. Engng Res.*, 51: 191-205. 1992.
- PAPADAKIS, G., MERMIER, M., MENESES, J.F. y BOLLARD, T. “Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings”. *J. Agric. Engng Res.*, 63: 219-228. 1996.
- PAPADOPOULOS, A.P. y HAO, X. “Effects of greenhouse covers on seedless cucumber growth, productivity, and energy use”. *Scientia Horticulturae*, 68: 113-123. 1997.
- PIRARD, G., DELTOUR, J. y NIJSKENS, J. “Gestion des écrans thermiques en serre”. *Plasticulture*, 103: 11-22. 1994.
- ROSOCHA, CH. “Serres plastique non chauffées utilisées tout au long de l’année en pépinière”. *Plasticulture*, 97: 33-40. 1993.
- SÁNCHEZ-MANTERO SÁEZ, A., CUADRADO GÓMEZ, I.M. y JUAN RODRÍGUEZ, E. “Fechas de siembra y protección térmica en melón (*Cucumis melo L.*)”. *Jornadas Técnicas sobre los cultivos de melón y pepino. Agrícola Vergel*, 91: 384-386. 1989.
- SANZ DE GALDEANO, J., URIBARRI, A., SÁDABA, S., AGUADO, G. y DEL CASTILLO, J. “Invernaderos y calefacción en Navarra”. *Navarra Agraria*, Nov.-Dic.: 13-23. 2003.
- SILVA, A.M. “A contribution to the study of the greenhouse climate: the analysis of some processes of energy transfer”. Tesis Doctoral, Universidad de Évora, Évora (Portugal), 350 pp. 1988.
- STANGHELLINI, C. “Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management”. Tesis Doctoral, Agricultural University Wageningen, 150 pp. 1987.
- STÖCKER, H., JUNDT, F. y GUILLAUME, G. “Toute la physique”. 1180 pp. Dunod. París (Francia). 1999.
- STOFFERS, J.A. “Energy fluxes in screened greenhouses”. *Agricultural Engineering Conference of Cambridge*. Cambridge (Reino Unido). 1985.
- SWINBANK, S.C. “Long-wave radiation from clear skies”. *J. Royal Meteorology Society*, 89: 339-348. 1963.

- TARAGOLA, N., VAN LIERDE, D. y VAN HUYLENBROECK, G. “Factors influencing investments in environmental sound and energy saving technologies by glasshouse growers”. Acta Horticulturae, 8 pp. (en prensa). 2002.
- TESI, R. “Illuminazione ed ombreggiamento nelle serre”. Colture Protette, 7: 37-44. 1989.
- TESI, R. “Medios de protección para la hortoflorofruticultura y el viverismo”. Mundi-Prensa, 288 pp. Madrid. 2001.
- TETENS, V.O. “Über einige meteorologische”. Begriffe, Zeitschrift für Geophysik. 6:297-309. 1930.
- TIMMONS, M.B., BOTTCHEER, R.W. y BAUGHMAN, G.R. “Monographs for predicting ventilation by thermal buoyancy”. Transactions of the ASAE, 27 (6): 1891-1893. 1984.
- URBAN, L. “Introduction à la production sous serre”. Tome 1: la gestion du climat. Tec & Doc-Lavoisier, 319 pp. París. 1997.
- VALERA, D.L. “Control climático en invernaderos”. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Almería, 516 pp. Almería. 2006.
- VALERA, D.L., ÁLVAREZ, A.J. y MOLINA, F.D. “Aerodynamic analysis of several insect-proof screens used in greenhouses”. Spanish Journal of Agricultural Research, 4(4): 271-277. 2006.
- VALERA, D.L., MOLINA, F.D. y GIL, J.A. “Las mallas como técnica de control climático en invernaderos”. Vida Rural, nov: 50-52. 2001.
- VALERA, D.L., URRESTARAZU, M., GÓMEZ, A., SALAS, M.C. y MAZUELA, P.C. “Fertirrigación calefaccionada en horticultura”. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Almería, 114 pp. Almería. 2004.
- VAN LIERDE, D. y DE COCK, L. “Energieverbruik in de Belgische glastuinbouw”. Centrum voor Landbouweconomie, Studie A83, 70 p. 1999.
- VAN LIERDE, D., TARAGOLA, N. y CARELS, K. “Economic and environmental aspects of energy management in Belgian glasshouse horticulture”. Poster presentation at the 13th International IFMA Congress of Farm Management, July 7 – 12, Papendal, The Netherlands. 2002.
- VERA MELLA, N. “Atlas climático de irradiación solar a partir de imágenes del satélite NOAA. Aplicación a la península Ibérica”. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Departament de Projectes d’Enginyeria, 349 pp. Barcelona. 2005.
- WALKER, J.N. “Predicting temperatures in ventilated greenhouses”. Transactions of the ASAE, 8 (3): 445-448. 1965.
- WALKER, J.N., PETERSON, W.O., DUNCAN, G.A. y ANASTASI, D.T. “Temperature and humidity in a greenhouse ventilated with coal mine air”. Transactions of the ASAE, 19 (2): 311-317. 1976.
- WARREN, A. “Towards common energy standards for buildings across Europe”. Energy World, 297: 8-10. 2002.
- ZHANG, J.S., JANNI, K.A. y JACOBSON, L.D. “Modeling natural ventilation induced by combined thermal buoyancy and wind”. Transaction of the ASAE, 32(6): 2165-2174. 1989.



Títulos publicados de la serie  
*Ahorro y Eficiencia Energética  
en la Agricultura:*

---

Nº Especial: *Consumos Energéticos en las Operaciones Agrícolas en España.* 2005

Tríptico promocional: *Medidas de Ahorro y Eficiencia Energética en la Agricultura.* 2005

Nº 1: *Ahorro de Combustible en el Tractor Agrícola.* 2005

Nº 2: *Ahorro y Eficiencia Energética en Agricultura de Regadío.* 2005

Nº 3: *Ahorro y Eficiencia Energética en Instalaciones Ganaderas.* 2005

Nº 4: *Ahorro, Eficiencia Energética y Sistemas de Laboreo Agrícola.* 2006

Nº 5: *Ahorro, Eficiencia Energética y Estructura de la Explotación Agrícola.* 2006

Nº 6: *Ahorro, Eficiencia Energética y Fertilización Nitrogenada.* 2007

Nº 7: *Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos.* 2008







**IDAE** Instituto para la  
Diversificación y  
Ahorro de la Energía

c/ Madera, 8 - 28004 Madrid  
Tel.: 91 456 49 00. Fax: 91 523 04 14  
comunicacion@idae.es  
www.idae.es



P.V.P.: 8 € (IVA incluido)