

PARTE IV. UNIDAD 2. LOS MODELOS DE BALANCE DE ENERGÍA

1- INTRODUCCIÓN

Existen actualmente dos tendencias de modelización de los procesos de transferencia de energía y de masa bajo invernadero. Una se apoya en una descripción detallada de los mecanismos de intercambio que tienen lugar a nivel de los diferentes elementos que integran el sistema invernadero (pared de cubierta, sistema de calefacción, aire interior, dosel vegetal y suelo). Otra forma de abordar el problema consiste en asociar el invernadero a un volumen de control delimitado por fronteras, que tienen (o no) una realidad física, y formular los procesos de transferencia que intervienen a través de estas fronteras sin examinar en detalle los procesos que intervienen al interior del volumen de control. Este tipo de modelo "funcional" (llamado también caja negra o "black box"), más empírico que explicativo, se utiliza frecuentemente para objetivos de regulación y de control de procesos. Con este enfoque, el balance energético del invernadero se aborda con una o dos ecuaciones y un número limitado de variables de entrada y de parámetros. La ventaja que presenta este tipo de modelos es su simplicidad y la relativa facilidad de identificación de sus pocos parámetros, permitiendo así evaluar rápidamente y de manera global el comportamiento energético del invernadero.

Hay que recalcar entonces que un modelo debe estar pensado y elaborado *en función de sus objetivos*. Para objetivos de investigación o de optimización del diseño, los modelos explicativos detallados son imprescindibles. Para aplicaciones de control y de gestión, los modelos funcionales son generalmente más adecuados. Una vez fijado el objetivo, hay que elegir el tipo de análisis y de herramienta de cálculo que debe de aplicarse al invernadero.

En lo que sigue se presentan tres tipos de modelos, haciendo hincapié en los modelos funcionales:

- (a)- Modelos basados en la analogía invernadero- colector solar, que dan acceso a describir el invernadero a partir de una sola ecuación.
- (b)- Modelos basados en la analogía invernadero-volumen de control, es decir, el aire del invernadero, que conlleva la descripción del comportamiento energético del invernadero a partir de dos ecuaciones diferenciales.
- (c)- Modelos basados en el balance energético de cada una de las componentes del invernadero (pared de cubierta, vegetación, sistema de calefacción, aire, suelo), que requieren resolver un sistema con n ecuaciones diferenciales.

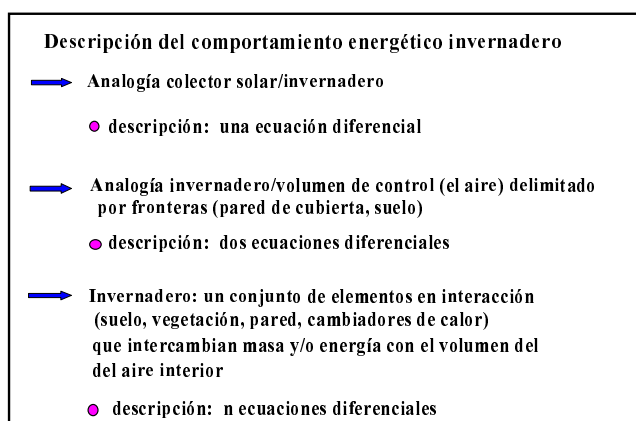


Figura 1. Los diferentes modelos utilizados para estimar el comportamiento energético del invernadero.

2- MODELOS SIMPLIFICADOS

2.1- MODELOS BASADOS EN LA ANALOGÍA INVERNADERO-COLECTOR SOLAR

Para estimar la evolución temporal de la temperatura del aire del invernadero o bien para evaluar las necesidades energéticas relativas a la calefacción se pueden utilizar métodos de cálculo similares a los que se utilizan para las edificaciones. Sin embargo, un enfoque más realista es asociar el invernadero a un colector solar –lo que el invernadero es en realidad– y emplear las ecuaciones desarrolladas para los colectores solares de aire. En esta Unidad, se presenta este enfoque y sus aplicaciones.

- Analogía invernadero-colector solar plano

Un invernadero puede considerarse, en primera aproximación, como un colector solar plano, (Figura 2a) que comporta:

- Una placa transparente, con un elevado coeficiente de transmisión para la radiación solar (τ).
- Una superficie (en general, un cuerpo negro) que posee un elevado coeficiente de absorción de la radiación solar (α).
- Un fluido que se calienta en contacto con la superficie negra al circular al interior del colector.

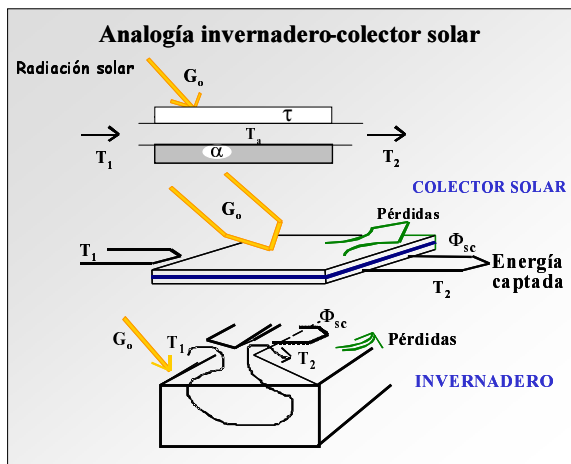


Figura 2a. Representación esquemática de la analogía invernadero-colector solar plano.

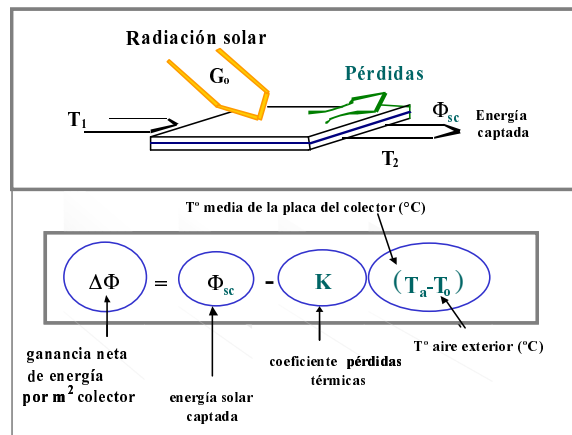


Figura 2b. Representación esquemática del balance de energía de un colector solar.

El conjunto del colector se caracteriza por:

- *Los aportes energéticos* (radiación global solar, G_0).

- La energía solar captada (Φ_{sc}).
- Las pérdidas de energía del colector con el medio que la rodea.

Las pérdidas energéticas se pueden evaluar de forma empírica, como el producto, $K \times (T_a - T_o)$, de un coeficiente global de pérdidas, K , por la diferencia ($T_a - T_o$) entre la temperatura media de la placa del colector (T_a) y la temperatura del aire exterior (T_o).

El balance energético del sistema establece que la ganancia neta de energía por unidad de tiempo y por metro cuadrado de colector ($\Delta\Phi, W m^{-2}$) debe de ser igual a la energía solar captada (Φ_{sc}) menos las pérdidas:

$$\Delta\Phi = \Phi_{sc} - K(T_a - T_o) \quad (1)$$

- Analogía y diferencias entre un invernadero y un colector solar

Existe una diferencia esencial entre un colector solar plano y un invernadero que explica no pueda aplicarse directamente la fórmula del colector (Ecn. 1):

- En el caso del colector, toda la energía solar captada es utilizada en forma de calor sensible para calentar el fluido en contacto con el elemento absorbente.
- En un invernadero, una parte importante de la energía solar que absorben el suelo y las plantas se transforma en calor latente a través del proceso de evapotranspiración.

Estas diferencias de comportamiento implican que, bajo invernadero, *los procesos de evaporación del suelo y de transpiración de las plantas disminuyen la cantidad de energía sensible, potencialmente disponible para calentar el aire del invernadero*. Es preciso tener en cuenta las pérdidas que conlleva dicha transformación puesto que van a afectar la temperatura y la humedad del aire del invernadero. Si lo que interesa es recuperar la energía sensible para calentar el aire del invernadero, el proceso de evapotranspiración representa una pérdida. Si, por el contrario, lo que interesa es limitar el calentamiento del aire este proceso representa un medio importante de enfriamiento del aire invernadero.

- Reparto de la energía captada por el invernadero

Por eso, bajo invernadero es importante conocer *cómo se reparte la energía solar* captada. Si consideramos un invernadero con un coeficiente ξ de captación de energía solar, la energía solar total captada es:

$$\Phi_{sc} = \xi G_o$$

Φ_{sc} se reparte en tres componentes.

- **Energía sensible** que se transfiere por convección al aire del invernadero, Φ_c .
- **Energía sensible** que se transfiere por conducción a la masa térmica del suelo, Φ_{cd} .
- **Energía sensible** que se transforma en **calor latente** (procesos de evaporación y transpiración), Φ_{Lsv} .

Para un invernadero con Φ_{cd} despreciable (p.e.: cuando el cultivo está desarrollado y llega al suelo un valor bajo de radiación solar), la energía total captada es:

$$\xi G_o = \Phi_c + \Phi_{Lsv} \quad (1a)$$

La energía captada en forma de calor sensible es la que va a contribuir a calentar el aire del invernadero. Por lo tanto, lo que interesa es evaluar es la energía sensible útil, teniendo en cuenta la pérdida que representa el proceso de evapotranspiración (Φ_{Lsv}):

$$\Phi_c = \xi G_o - \Phi_{Lsv} \tag{1b}$$

Teniendo en cuenta estas pérdidas, la ecuación del colector (Ecn. 1) aplicada a un invernadero es:

$$\Delta\Phi = (\xi G_o - \Phi_{Lsv}) - K(T_a - T_o) \tag{2}$$

El cálculo de $\Delta\Phi$ exige que se conozca el valor de K (Apartado 2.3) y el flujo de evapotranspiración (Unidad 4). Si consideramos que, en primera aproximación, el flujo de evapotranspiración representa una *fracción b de la carga solar*:

$$\Phi_{Lsv} = \xi b G_o$$

El coeficiente **b** ($= \Phi_{Lsv} / \xi G_o$) indica la **importancia relativa de los procesos de transferencia por calor sensible y por calor latente** (Figura 3).

$$b = \Phi_{Lsv} / \xi G_o$$

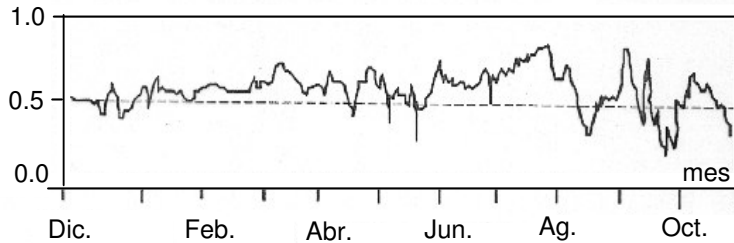


Figura 3. Fracción de la energía solar captada en invernadero que se transforma en latente a través del proceso de transpiración (cultivo de tomates). Boulard, 1985

Por analogía con la ecuación del colector solar, se deduce que **la ganancia neta, disponible para calentar el aire bajo invernadero**, puede evaluarse a partir de la relación (Figura 4):

$$\Delta\Phi = \xi(1-b)G_o - K(T_a - T_o) \tag{3}$$

Bajo invernadero, b varía (entre 0.4 y 0.6) en función del tipo de cultivo y de su desarrollo foliar, y ξ es del orden de 0.7-0.8.

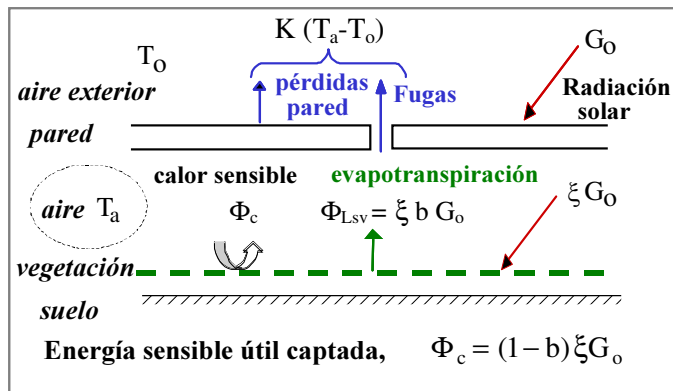


Figura 4. Representación esquemática del reparto de la carga solar recibida en invernadero, ξG_o , en calor sensible, Φ_c , y latente, Φ_{Lsv} , considerando que el flujo de calor en el suelo es despreciable. El coeficiente b es la fracción de energía solar captada que se transforma en latente a través del proceso de evaporación.

El coeficiente K es la resultante de un coeficiente de pérdidas térmicas a través de la pared (h_p , $W m^{-2}_{pared} K^{-1}$) y de un coeficiente de pérdidas por fugas (y/o ventilación), h_{fv} ($W m^{-2}_{suelo} K^{-1}$) que se puede expresar en función de la tasa de renovación del aire, Z (s^{-1}). Para un invernadero con una superficie de suelo S y una superficie de pared S_p :

$$K = \frac{S_p}{S} h_p + \rho C_p \frac{V}{S} Z \quad (4)$$

Sustituyendo la Ecn 4 en la ecuación (3) obtenemos la ecuación del colector aplicada al invernadero:

$$\Delta\Phi = \xi(1-b) G_o - \left(\frac{S_p}{S} h_p + \rho C_p \frac{V}{S} Z \right) (T_a - T_o) \quad (5a)$$

Para un invernadero en el que existe un aporte o extracción de energía, $\pm\Phi_{ar}$, a partir de un sistema de climatización:

$$\Delta\Phi = \pm\Phi_{ar} + \xi(1-b) G_o - \left(\frac{S_p}{S} h_p + \rho C_p \frac{V}{S} Z \right) (T_a - T_o) \quad (5b)$$

Para el caso de régimen estacionario ($\Delta\Phi = 0$) y $\Phi_{ar} = 0$, se puede obtener, a partir de la Ecn (5a) la influencia que ejercen en T_a el proceso de evapotranspiración y la tasa de renovación del aire del invernadero a través de la ventilación (Parte III, Unidad 3, 2.3):

$$T_a = T_o + \frac{\xi(1-b) G_o}{\left(\frac{S_p}{S} h_p + \rho C_p \frac{V}{S} Z \right)} \quad (6)$$

Si, a modo de ejemplo, tomamos, $T_o = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $G_o = 500 \text{ W m}^{-2}$, $\xi = 0,7$; $h_p = 10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ y una tasa Z de 20 renovaciones a la hora ($Z = 0,00556 \text{ s}^{-1}$), la temperatura del aire interior es:

- Para $b = 0.30$, $T_a = 37.1 \text{ }^\circ\text{C}$ y para $b = 0.60$, $T_a = 34.1 \text{ }^\circ\text{C}$

Puede observarse que, bajo invernadero, el papel que juega la evapotranspiración es muy importante. Si toda la energía captada se utilizase en el proceso de evapotranspiración ($b = 1$), no habría calentamiento del invernadero. Esto explica que, a veces, la temperatura dentro del invernadero, de día, no sea superior a la temperatura exterior. Esta situación puede alcanzarse bajo condiciones de fuerte transpiración, o con sistemas de enfriamiento por evaporación (nebulización).

Para un invernadero con aporte de energía externa, la ecuación (5b), en régimen estacionario, nos indica la energía que **es necesario aplicar (a través del sistema de calefacción) para mantener una determinada temperatura de consigna, T_a** :

$$\Phi_{cal} = \left(\frac{S_p}{S} h_p + \rho C_p \frac{V}{S} Z \right) (T_a - T_o) - \xi(1-b) G_o \quad (7)$$

Se puede aplicar el mismo razonamiento para evaluar, por ejemplo, la cantidad de energía que debe extraer del invernadero un sistema de ventilación forzada cuando se fija, durante el día un valor máximo de temperatura de consigna del aire.

2.2. MODELOS BASADOS EN LA ANALOGÍA INVERNADERO-VOLUMEN DE CONTROL

Este tipo de modelos se basa en un balance de energía simplificado (Figura 5), considerando el invernadero como *un volumen de control* (el volumen de aire) *delimitado por la pared de*

cubierta y la masa térmica. El balance de energía consiste en formular los procesos de transferencia que intervienen a través de estas fronteras, sin detallar los procesos que intervienen al interior del volumen de control:

- *La pared de cubierta:* representa la superficie del invernadero donde tienen lugar las pérdidas por conducción-convección y por radiación con el medio que la rodea. Sus propiedades ópticas (coeficientes de transmisión, absorción, etc.) en la gama de longitudes de onda corta (solar) y larga (radiación infrarroja) se suponen conocidas. Su capacidad de almacenamiento térmico se considera despreciable. La tasa de renovación del aire (Z) asociada a la infraestructura de la pared depende de las fugas, causadas por los defectos de estanqueidad, y/o de un determinado porcentaje de apertura del sistema de ventilación.

- *La masa térmica:* asociada al conjunto vegetación-suelo, representa la única superficie del invernadero capaz de absorber o restituir la energía. La fracción de la energía solar que absorbe la masa térmica se considera conocida, al igual que la fracción que ésta transforma en calor latente.

Con este enfoque, el balance energético del invernadero se puede abordar con dos ecuaciones y con un número limitado de variables de entrada y de parámetros. Las ecuaciones del balance de energía, para un invernadero con una superficie de suelo S (m^2) y una superficie de techo S_p (m^2), se establecen para el volumen del aire interior y para la masa térmica (conjunto suelo-vegetación) (Figura 5).

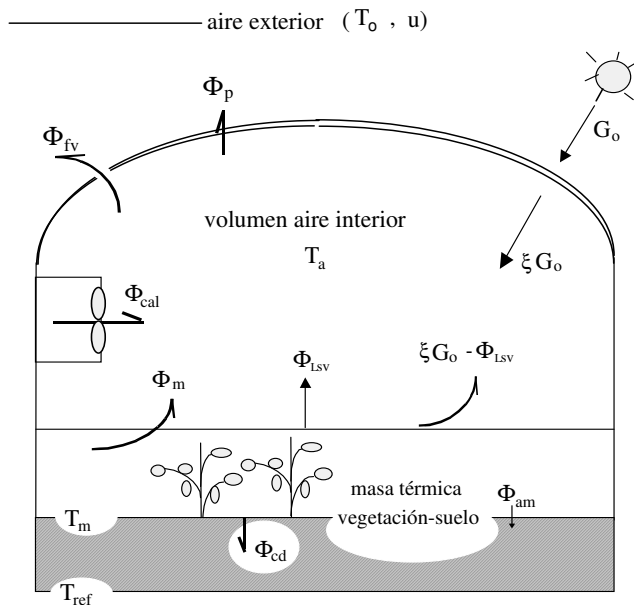


Figura 5. Representación esquemática de las componentes del balance de energía de un invernadero (ver explicación en el texto).

- Balance de energía para el volumen de aire

Si consideramos un invernadero con una temperatura T_a la variación de la energía interna del volumen de aire, V (m^3), debe compensar los aportes energéticos que recibe menos las pérdidas:

$$\rho \frac{V}{S} \frac{dT_a}{dt} = \Phi_{cal} + \Phi_c - (\Phi_p + \Phi_{fv}) + \Phi_m \quad (8)$$

siendo:

- t = tiempo (s), ρ = densidad del aire ($kg\ m^{-3}$) y C_p = calor específico de l aire ($J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$).

- Φ_{cal} = aporte de energía del sistema de calefacción ($W\ m^{-2}$).

- Φ_c ($= \xi G_o - \Phi_{Lsv}$) representa la energía sensible útil, o disponible, para calentar el aire del invernadero cuando no existe sistema de calefacción (Ecn. 1b).

- Φ_p y Φ_{fv} = pérdidas de energía a través de la pared y a través de las fugas, respectivamente ($W m^{-2}$).

Los términos Φ_p y Φ_{fv} se pueden expresar en función de un coeficiente de intercambio, h ($W m^{-2} K^{-1}$), y del gradiente de temperatura entre el aire interior, T_a , y exterior, T_o (Ecn. 4 a-b):

$$\Phi_p = \frac{S_p}{S} h_p (T_a - T_o) \quad (9)$$

$$\Phi_{fv} = h_{fv} (T_a - T_o) \quad (10)$$

- Φ_m ($W m^{-2}$) = energía que se intercambia por convección entre la masa térmica (suelo-vegetación) y el aire interior. Se puede formular, como en el caso anterior, a través del coeficiente de intercambio, h_m , y del gradiente de temperatura entre la masa térmica, T_m , y el aire interior:

$$\Phi_m = h_m (T_m - T_a) \quad (11)$$

El término Φ_m puede ser un aporte o una pérdida. De noche, siendo la temperatura de la masa térmica superior a la del aire ($T_m > T_a$), Φ_m representa un aporte de energía al volumen de control. Sin embargo, de día representa una pérdida ($T_m < T_a$).

Sustituyendo en la Ecn. (8) la formulación de cada uno de sus términos (Ecns. 4-11 y Ecn 1b), la ecuación del balance de energía del aire es:

$$\frac{V}{S} \rho C_p \frac{dT_a}{dt} = \Phi_{cal} + \xi G_o (1 - b) - \left(\frac{S_p}{S} h_p + \rho C_p \frac{V}{S} Z \right) (T_a - T_o) + h_m (T_m - T_a) \quad (12)$$

- Balance de energía para la masa térmica

Para la masa térmica, con una temperatura T_m , la variación de la energía interna es:

$$C_{Tm} \frac{dT_m}{dt} = \Phi_{am} - \Phi_m \pm \Phi_{cd} \quad (13)$$

siendo:

- C_{Tm} = capacidad térmica de la masa térmica ($J m^{-2} K^{-1}$)

- Φ_{am} = fracción de energía solar captada absorbida por la masa térmica, con un coeficiente de absorción α_{am} :

$$\Phi_{am} = \alpha_{am} \xi G_o \quad (14)$$

Φ_{cd} = flujo por conducción en el suelo.

El cálculo detallado del flujo de calor por conducción en el suelo (Φ_{cd}) exige una discretización del suelo por capas aplicando, a cada capa, las ecuaciones apropiadas para la transferencia de calor en régimen no estacionario al igual que los métodos adecuados de resolución numérica. Se puede obtener una evaluación aproximada de Φ_{cd} en función de la conductividad del suelo, k_s ($W m^{-1} K^{-1}$), y del gradiente de temperatura entre la masa térmica, T_m , y el suelo, con una temperatura T_{ref} a una profundidad Z_{ref} :

$$\Phi_{cd} = -k_s \left(\frac{T_m - T_{ref}}{Z_{ref}} \right) \quad (15)$$

Sustituyendo la formulación de los flujos (Ecns. 14-15) en la ecuación (13) se obtiene la ecuación general para el balance de energía de la masa térmica:

$$C_{Tm} \frac{dT_m}{dt} = \alpha_{am} \xi G_o - h_m (T_m - T_a) - k_s \left(\frac{T_m - T_{ref}}{Z_{ref}} \right) \quad (16)$$

La resolución de las ecuaciones (12) y (16) da acceso a determinar:

- (i) La temperatura del aire y de la masa térmica cuando se fija el consumo de energía o bien cuando no existen necesidades de calefacción ($\Phi_{\text{cal}} = 0$).
- (ii) La temperatura de la masa térmica y el consumo de energía que conlleva el mantener una temperatura de consigna, T_a .

- Orden de magnitud de la energía almacenada en la masa térmica

El suelo es el componente del invernadero que presenta la capacidad térmica más elevada (ver Cuadro 1). La capacidad efectiva de almacenamiento térmico del suelo ($\Delta\Phi_m = C_{Tm} \Delta T_m / \Delta t$) depende de la variación temporal de su temperatura de superficie. Se considera, en general, que el almacenamiento térmico es despreciable cuando la diferencia ΔT_m entre la temperatura máxima y mínima diarias del suelo es del orden de unos 2 o 4 grados. Es ésta una situación típica de condiciones de invierno, sobre todo, cuando se trata de suelos con vegetales desarrollados, debido a que la radiación solar es prácticamente absorbida al atravesar los estratos foliares del vegetal llegando al suelo un nivel radiante relativamente bajo. Sin embargo, la capacidad efectiva de su almacenamiento térmico puede ser relevante para niveles superiores de variación temporal de su temperatura. Por ejemplo, para una variación de temperatura de 10°C y $C_{Ts} = 135 \text{ kJ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, $\Delta\Phi_m = C_{Ts} \times 10 \approx 1.4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$.

Se puede obtener una evaluación aproximada de $\Delta\Phi_m$ considerando que la capacidad de almacenamiento de la masa térmica corresponde a una fracción de la radiación solar disponible bajo invernadero, es decir:

$$\Delta\Phi_m = \alpha_{\text{am}} \frac{\xi \Sigma G_o}{DN}$$

siendo $\xi \Sigma G_o$ la integral de la radiación solar recibida bajo invernadero ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), α_{am} la fracción de la radiación solar almacenada en la masa térmica y DN la duración de la noche (s). Si consideramos que el valor máximo diario de $\xi \Sigma G_o$, representativo de un día de invierno, es del orden de $5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, una duración de la noche = 10 horas y $\alpha_{\text{am}} = 0.1$:

$$\Delta\Phi_m = 0.1 \frac{5 \times 10^6}{(10)(3600)} \approx 14 \quad (\text{W m}^{-2})$$

Vemos que, para los niveles de radiación solar típicos del periodo invernal, el almacenamiento térmico puede considerarse, en primera aproximación, despreciable comparado con el orden de magnitud que pueden alcanzar las necesidades térmicas de punta de un invernadero ($100\text{-}250 \text{ W m}^{-2}$).

Cuadro 1. Capacidad calorífica de los elementos constituyentes de un invernadero de vidrio. Según Seginer (1971) y Albright (1985)

Elemento	Espesor (m)	Calor específico ($\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	Densidad (kg m^{-3})	Capacidad calorífica ($\text{J m}^{-2} \text{ K}^{-1}$)
Vidrio	0.004	836	2600	8360
aluminio	0.0012	418	7800	3762
aire interior	3.5	1003.2	1.25	4180
vegetación	0.004	4180	1000	16720
suelo (húmedo)	0.15	1045	1500	$50 \cdot 10^3$ a $200 \cdot 10^3$
masa térmica (suelo seco)				$14 \cdot 10^3$
masa térmica (suelo húmedo)				$135 \cdot 10^3$

2.3- VALORES Y EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LOS MODELOS

- Orden de magnitud de los parámetros utilizados en el modelo

El Cuadro 2 da un ejemplo del orden de magnitud de los parámetros utilizados en los modelos simplificados (Apartados 2.1 y 2.2).

Cuadro 2. Orden de magnitud de los coeficientes utilizados en los modelos simplificados (Apartados 2.1 y 2.2).

Coefficiente de captación de energía solar	$\xi = 0.6-7$
Absorción de la radiación solar por la masa térmica	
- Vegetal poco desarrollado	$\alpha_{am} = 0.10-0.15$
- Suelo con cobertura de plástica	$\alpha_{am} \approx 0.05$
Coefficiente de intercambio	$h_m = 4-5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
Conductividad del suelo	$k_s = 1.0-1.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Capacidad calorífica de la masa térmica	$C_{Tm} = 0.1-0.3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Para el coeficiente global de pérdidas térmicas se detalla en lo que sigue el procedimiento de cálculo, así como los valores que se dan en la bibliografía para K y para el coeficiente de pérdidas a través de la pared y a través de las fugas.

- Coeficiente global de pérdidas térmicas

El coeficiente global de pérdidas térmicas de un invernadero ($K, \text{ W m}^{-2} \text{ suelo K}^{-1}$) integra el coeficiente de intercambio de la pared ($h_p = 1/r_p$), y el coeficiente de intercambio a través de fugas ($h_f = 1/r_f$):

$$K = \frac{S_p}{S} h_p + h_f \tag{17}$$

siendo la resistencia total equivalente a la transferencia de energía de la pared, $r_t = 1/K$

La figura 6 presenta un ejemplo de los mecanismos implicados en la transferencia de energía a través de la pared, las resistencias asociadas a los procesos de transferencia, así como la red de resistencias a partir de la cual se puede calcular el coeficiente global de pérdidas K.

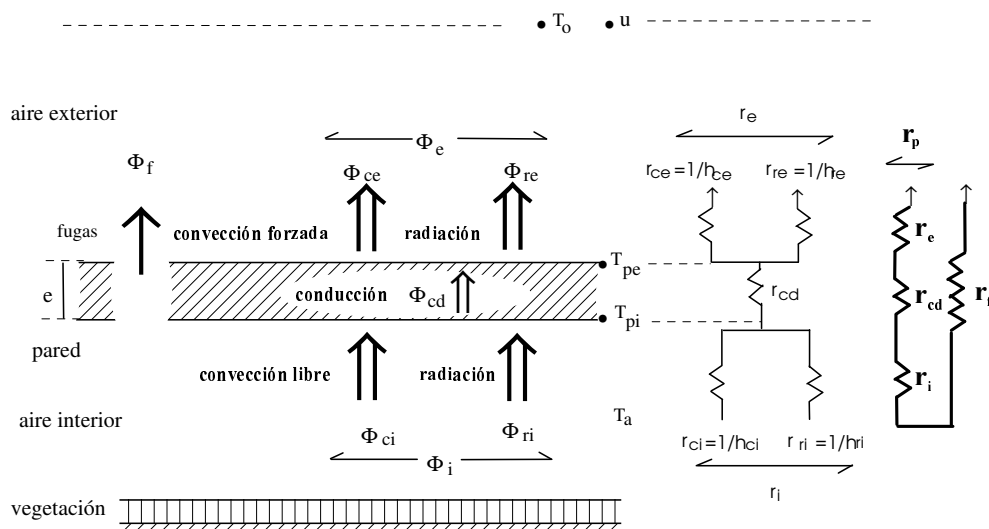


Figura 6. Pérdidas térmicas, Φ , a través de la pared de cubierta de un invernadero y resistencias, r , asociadas (ver explicación en el texto).

- Coeficiente de intercambio de la pared, h_p ($=1/r_p$)

La resistencia a la transferencia de energía a través de la pared, r_p es la resultante de:

- La resistencia interna, r_i , resultante de dos resistencias dispuestas en paralelo: la resistencia por convección entre el aire y la pared, r_{ci} , y la “resistencia” aparente por radiación, r_{ri} , entre la pared y las superficies que la rodean (vegetación, suelo y, eventualmente tubos de calefacción).
- La resistencia por conducción a través de la pared (r_{cd}).
- La resistencia externa, r_e , resultante de la resistencia por convección entre el aire y la pared, r_{ce} , y la “resistencia” aparente por radiación, r_{re} , entre la pared interna y las superficies que la rodean (esencialmente la bóveda celeste).

En condiciones de régimen estacionario se cumple la relación siguiente:

$$\Phi_p = \Phi_i = \Phi_{cd} = \Phi_e$$

siendo:

- Φ_p , las pérdidas totales a través de la pared:

$$\Phi_p = h_p (T_a - T_o) \quad (18a)$$

- Φ_i , la densidad de flujo al interior de la pared:

$$\Phi_i = h_i (T_a - T_{pi}) \quad (18b)$$

- Φ_{cd} , la densidad de flujo por conducción a través de la pared:

$$\Phi_{cd} = \frac{k}{e} (T_{pi} - T_{pe}) \quad (18c)$$

- Φ_e , la densidad de flujo al exterior de la pared:

$$\Phi_e = h_e (T_{pe} - T_o) \quad (18d)$$

Cuadro 3. Valores del coeficiente global de pérdidas térmicas (h_p) con diferentes materiales de cubierta para una velocidad del viento de 4 m s^{-1} . Fuentes: diferentes referencias bibliográficas.

		h_p ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
Materiales Rígidos	vidrio	6.0-7.8
	vidrio baja emisividad	5.0-7.2
	vidrio doble pared	4.2-5.2
	polycarbonato (espesor capa de aire =10 mm)	4.7-5.4
	polycarbonato (espesor capa de aire =16 mm)	4.2-5.0
	plexiglás (espesor capa de aire =16 mm)	4.2-5.0
	plexiglás (espesor capa de aire =32 mm)	3.0-3.5
	Filmes de plástico	PE normal
PE térmico		6.7-8.0
PE doble pared		4.5-6.0
PVC		6.2-7.8

Sustituyendo las ecuaciones 18a-d en la ecuación general $\Phi_p = \Phi_i = \Phi_{cd} = \Phi_e$ se obtiene la relación:

$$\Phi_p = \frac{T_a - T_{pi}}{\frac{1}{h_i}} = \frac{T_{pi} - T_{pe}}{\frac{e}{k}} = \frac{T_{pe} - T_o}{\frac{1}{h_e}} \quad (19a)$$

Sumando en la Ecn. 19a los numeradores y los divisores, se obtiene:

$$\Phi_p = \frac{T_a - T_o}{r_p} = h_p (T_a - T_o) = \frac{T_a - T_o}{r_i + r_{cd} + r_e} \quad (19b)$$

Esta relación nos indica que la resistencia total a la transferencia de calor a través de la pared r_p ($=1/h_p$) es la resultante de tres resistencias r_i ($=1/h_i$), r_{cd} ($= e/k$) y r_e ($= 1/h_e$) dispuestas en serie, es decir:

$$r_p = r_i + r_{cd} + r_e$$

Los flujos Φ_i y Φ_e son una función de los intercambios por convección (Φ_{ci} y Φ_{ce}) y por radiación (Φ_{ri} y Φ_{re}) que intervienen, respectivamente, en:

- La pared interna:

$$\Phi_i = \Phi_{ci} + \Phi_{ri}$$

- La pared externa:

$$\Phi_e = \Phi_{ce} + \Phi_{re}$$

La resistencia interna (r_i) y la externa (r_e) equivalen a:

$$\frac{1}{r_i} = \frac{1}{r_{ci}} + \frac{1}{r_{ri}}$$

$$\frac{1}{r_e} = \frac{1}{r_{ce}} + \frac{1}{r_{re}}$$

Sustituyendo estas dos últimas ecuaciones en la ecuación $r_p = r_i + r_{cd} + r_e$, se obtiene la expresión general para el coeficiente de pérdidas térmicas globales a través de la pared ($W m^{-2}_{pared} K^{-1}$):

$$\frac{1}{h_p} = r_p = \frac{r_{ci} r_{ri}}{r_{ci} + r_{ri}} + \frac{e}{k} + \frac{r_{ce} r_{re}}{r_{ce} + r_{re}} \quad (20)$$

Esta relación muestra que el coeficiente global h_p es una función de los intercambios por convección y por radiación que intervienen en las dos caras (interna y externa) de la pared, lo que exige que se conozcan los valores de los coeficientes de intercambio implicados (h_i y h_e).

Estos coeficientes no pueden evaluarse de forma arbitraria ya que dependen de la temperatura de equilibrio de la pared. Sin embargo, no es fácil disponer de valores de r_i , lo que explica que el coeficiente de pérdidas globales de la pared h_p se evalúe a partir solamente del conocimiento de las resistencias al exterior de la pared (r_{ce} , r_{re}). Es decir, se considera que la resistencia equivalente externa, r_e , es preponderante frente a los valores que alcanzan el cociente e/k y la resistencia interior r_i . La relación general (Ecn. 20) se reduce entonces a:

$$\frac{1}{h_p} = r_p = \frac{r_{ce} r_{re}}{r_{ce} + r_{re}} \quad (21)$$

Los elementos de base para calcular los intercambios por convección y por radiación se dan en Unidad 6 y en la Lectura Complementaria de la Unidad 6. El Cuadro 4 Muestra un ejemplo de los valores de conductividad de materiales de cubierta en función de su espesor.

Cuadro 4. Conductividad térmica de diferentes materiales de cubierta (Nisen y al., 1985)

Materiales	Espesor e (m)	Conductividad térmica λ (W m ⁻¹ K ⁻¹)
Vidrio	0.004	0.76
Vidrio baja emisividad	0.004	0.76
Policarbonato	0.001	0.19
Polimetacrilato de metilo	0.001	0.19
PE	0.0001	0.45
PVC	0.0001	0.17
EVA	0.00018	0.45

- Coeficiente de pérdidas por renovación del aire, h_f ($=1/r_f$)

Cuando se trata de dimensionar el sistema de calefacción, las pérdidas por renovación del aire se limitan a las pérdidas a través de las fugas. El coeficiente de intercambio a través de las fugas se puede expresar en función de la tasa de renovación del aire, Z (s⁻¹) que representa el caudal de aire (m³ s⁻¹) que se disipa por unidad de volumen de invernadero (V, m³), es decir, el número de veces que se renueva el invernadero por unidad de tiempo:

$$h_f = \rho C_p \frac{V}{S} Z \quad (22a)$$

siendo el flujo disipado por fugas:

$$\Phi_f = \rho C_p \frac{V}{S} Z (T_a - T_o) \quad (22b)$$

donde :

- h_f en W m⁻² suelo K⁻¹
- ρ = densidad del aire (kg m⁻³)
- C_p = calor específico del aire (J kg⁻¹ K⁻¹)
- V = volumen del invernadero (m³)
- S = superficie del invernadero (m²)
- Z = tasa de renovación del aire del invernadero (s⁻¹)

Se ha demostrado experimentalmente que Z es una función de la velocidad del viento. Se considera que un invernadero es suficientemente estanco cuando Z es del orden de 1 h⁻¹ para una velocidad del viento de 4 m s⁻¹ (Cuadro 5):

$$Z = 0,1 + 0,289 u \quad (h^{-1})$$

Sin embargo, Z puede alcanzar valores superiores a 2 h⁻¹ en invernaderos poco estancos.

Cuadro 5. Tasa de renovación del aire por fugas (Z) en un invernadero de vidrio en función de la velocidad del viento (u), (Gudehuss, 1977).

Z (h^{-1})	Velocidad del viento u ($m s^{-1}$)				
	2	4	6	8	10
	0,5	1,0	1,7	2,5	3,1

- Consumo de energía

El coeficiente de pérdidas globales, K , integra, si no se especifica lo contrario, las pérdidas por fugas. El Cuadro 6 muestra un ejemplo de valores de K para un invernadero equipado con diferentes sistemas de calefacción y para una velocidad del viento al exterior de $4 m s^{-1}$.

Cuadro 6. Coeficiente K para diferentes sistemas de calefacción ($u = 4 m s^{-1}$). Según Meyer J., 1976.

Sistema de calefacción	$K (= h_p + h_f)$ ($W m^{-2} K^{-1}$)	K (% relativo al sistema 1)
(1) Tubos de acero bajo cubierta	8.2	100
(2) Tubos de acero bajo cubierta	7.4	90
(3) Tubos de acero alrededor de las paredes laterales	8.1	99
(4) Aerotermo	7.8	95
(5) Aerotermo con distribución de aire caliente por politubos	7.0	85

A partir de este análisis, también se puede deducir la energía que debe de aportar el sistema de calefacción, Φ_{cal} ($W m^{-2}$ suelo) para mantener, en periodo nocturno, una temperatura de consigna T_a :

$$\Phi_{cal} = \frac{S_p}{S} \Phi_p + \Phi_f \tag{23a}$$

Sustituyendo las ecuaciones 19 b y 22 b en Ecn. 23a:

$$\Phi_{cal} = \frac{S_p}{S} h_p (T_a - T_o) + \rho C_p \frac{V}{S} Z (T_a - T_o) \tag{23b}$$

Considerando el coeficiente global de pérdidas térmicas (Ecn. 17 y 22a):

$$K = \frac{S_p}{S} h_p + \rho C_p \frac{V}{S} Z$$

se puede obtener la relación que da el consumo inherente a la calefacción en función de K y de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior:

$$\Phi_{cal} = K (T_a - T_o) \tag{24}$$

3- MODELOS BASADOS EN EL BALANCE DE ENERGÍA DE LOS ELEMENTOS DEL INVERNADERO

La evaluación simplificada de la demanda energética se apoya en coeficientes globales (K , b) que aglutinan un cierto número de procesos. El problema estriba en la dificultad que conlleva el dar a estos coeficientes valores fijos ya que el nivel a que se establecen depende:

- K : del clima exterior, del tipo de pared, del modo de calefacción y de su localización dentro del invernadero (Cuadros 3-6).
- ξ : de las propiedades ópticas de la pared, de la geometría del invernadero y de la pendiente de la pared de cubierta
- b : fracción de energía solar que se transforma en latente depende de variables climáticas (radiación solar, déficit de saturación del aire) y de la conductancia estomática y de capa límite.

Para salvar estas limitaciones, es preciso formular el balance de energía a nivel de cada componente que integra el invernadero (pared de cubierta, aire, vegetación, suelo, sistema de calefacción). En la Figura 7 se da un ejemplo de los flujos implicados en el balance de energía de cada elemento.

El invernadero se considera como un conjunto de elementos en interacción que intercambian masa y/o energía con el aire.

La formulación del balance de energía de cada componente permite:

- Cuantificar los flujos implicados en los intercambios
- El microclima del invernadero a un instante dado.
- Estudiar la influencia que ejerce un sistema de climatización en el microclima interno.
- Evaluar la influencia que ejerce la posición de los cambiadores de calor (p.e.: tubos aéreos) en el consumo energético.

La descripción de un tal sistema conduce a un número importante de ecuaciones no lineales que no tienen solución analítica y deben resolverse aplicando métodos numéricos. La complejidad y el tiempo considerable que exige la elaboración de este tipo de modelos explican que se utilicen, por ejemplo, cuando se persiguen objetivos de estimación del microclima y de optimización de la localización de los sistemas de calefacción.

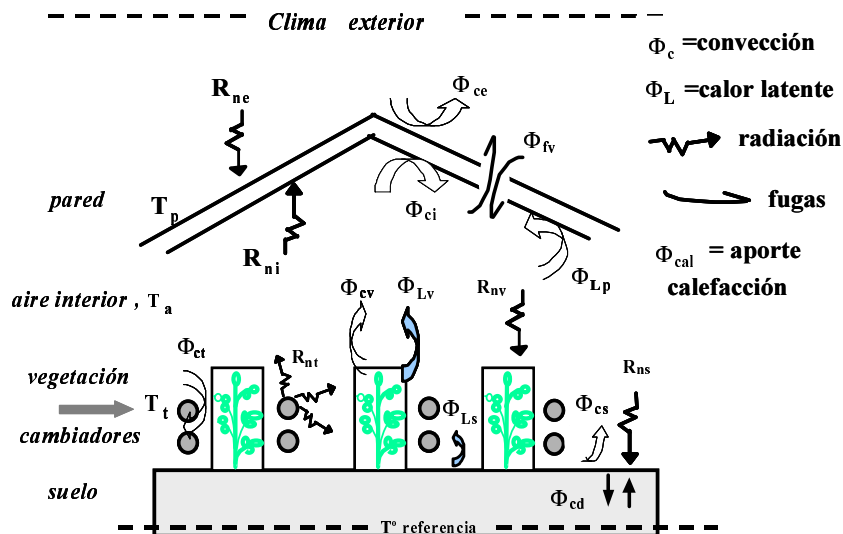


Figura 7. Flujos implicados en el balance de energía de los elementos del invernadero (pared de cubierta, vegetación, aire, masa térmica). R = radiación neta, índices n_i , n_e = pared interna y externa, v = vegetación, s = suelo. $Q_{L,v}$ = transpiración, $Q_{L,s}$ = evaporación, $Q_{L,p}$ = condensación en la pared.

El balance de energía de cada elemento se puede evaluar a partir de las relaciones que se dan en lo que sigue, que dan acceso a determinar la temperatura de cada uno de los elementos y los flujos implicados en la transferencia:

- Balance de energía de la pared:

$$C_{Tp} \frac{dT_p}{dt} = R_{ni} + \Phi_{ci} - R_{ne} - \Phi_{ce} + \Phi_{Lp}$$

- Balance de energía del aire

$$C_{Ta} \frac{dT_a}{dt} = \Phi_{cv} + \Phi_{ct} + \Phi_{cs} - \Phi_f$$

- Balance de energía de la vegetación

$$C_{Tv} \frac{dT_v}{dt} = R_{nv} - \Phi_{cv} - \Phi_{Lv}$$

- Balance de energía del suelo

$$C_{Ts} \frac{dT_s}{dt} = R_{ns} - \Phi_{cs} - \Phi_{cd}$$

- Balance de energía del sistema de calefacción por tubos aéreos

$$C_{Tt} \frac{dT_t}{dt} = \Phi_{cal} - \Phi_{ct} - R_{nt}$$

