

CLIMATIZACION DE INVERNADEROS MEDIANTE CONDUCTOS BAJO TIERRA.
SIMULACION MATEMATICA Y ESTUDIO ECONOMICO¹
Levit, H. J., Seffino, R., Gaspar, R. y Piacentini, R. D.

RESUMEN:

El sistema de climatización (calefacción o refrigeración) que se presenta y analiza en este trabajo aprovecha la inercia térmica del suelo, el elemento de mayor acumulación de calor del invernadero y que presenta en profundidad temperaturas prácticamente constantes. El sistema, que puede ser accionado termostáticamente, consta de una serie de conductos cilíndricos subterráneos dispuestos horizontalmente; a través de ellos y al circular aire forzado, se transfiere calor entre el suelo y el aire. Con el objetivo de simular el comportamiento del sistema de climatización vinculado al clima del invernadero se utilizó un modelo matemático ya desarrollado que simula el clima del invernadero, al cual se le realizaron las modificaciones necesarias para vincularlo con los conductos bajo tierra. Se describen entonces las ecuaciones de balance de calor y materia involucradas en el modelo resultante. A fin de lograr la optimización de las características del sistema desde el punto de vista técnico-económico, se utilizó dicho modelo teniendo en cuenta las pérdidas de carga y los parámetros prácticos de ejecución, para la calefacción de un invernadero representativo de los de la región. Se presentan tabulados los resultados obtenidos para distintas exigencias de temperaturas y se grafican las temperaturas del aire interno del invernadero en un día típico de invierno para distintas situaciones de calefacción. Se concluye que el sistema es más económico que los convencionales teniendo además la ventaja de no ser contaminante, siendo de utilidad cuando se requieren temperaturas menores o mayores que las del suelo en invierno o verano respectivamente.

INTRODUCCION:

Si bien los invernaderos generan un microclima que permite un mejor desarrollo de los cultivos, la demanda de mayor calidad y producción, ha hecho que se adicionen a ellos diferentes dispositivos para lograr una climatización más controlada. Es así que se han utilizado numerosos dispositivos tales como sistemas de calefacción, de refrigeración, de humectación, de incorporación de CO₂, como así también diversos mecanismos o sistemas para controlar los flujos energéticos. Los distintos sistemas de climatización pueden ser clasificados entre aquellos que usan fuentes convencionales de energía (mediante combustibles o energía eléctrica) y los que aprovechan nuevas fuentes (tal como la energía solar, la biomasa, la eólica o la geotérmica). El sistema que se presenta y analiza en este trabajo, Sistema Climatizador por Conductos Subterráneos (S.C.C.S.) aprovecha la propiedad del suelo de poseer temperaturas prácticamente constantes a cierta profundidad para, mediante una transferencia convectiva con el aire a través de conductos subterráneos que actúan como intercambiadores de calor (Fig. 1) climatizar el invernadero.

Con el objetivo de simular el comportamiento de este sistema interactuando con el invernadero, es necesario utilizar un modelo matemático que, además de describir adecuadamente los procesos físicos en estos últimos, permita acoplar y evaluar correctamente el funcionamiento del S.C.C.S. Se eligió para la simulación el modelo empleado anteriormente por Levit y Gaspar, 1987, quienes verificaron experimentalmente el buen acuerdo entre el mismo y los ensayos. El S.C.C.S. ya fue simulado y verificado en forma experimental por Seffino y Piacentini, 1985.

¹ Instituto de Física Rosario (UNR-CONICET), Av. 27 de Febrero 210 bis, Rosario, Santa Fe.

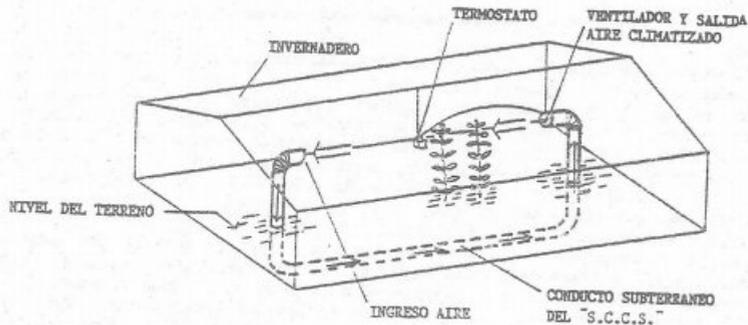


Figura 1: Esquema del invernadero y de los conductos subterráneos.

DESCRIPCION DEL MODELO DEL INVERNADERO Y ECUACIONES DE BALANCE

El modelo divide al invernadero en cuatro elementos: cubierta, aire interior, plantas y suelo, cada uno de ellos es considerado homogéneo, Fig. 2

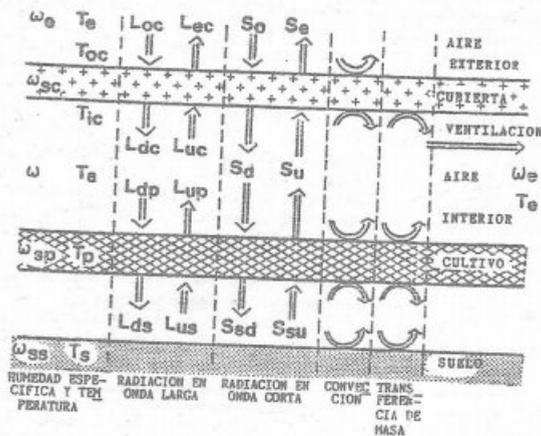


Figura 2: Esquema del intercambio de masa y energía en el invernadero.

y establece los correspondientes flujos de calor y masa entre estos elementos. Se considera al sistema unidimensional y las propiedades de los diferentes términos invariables en el tiempo, excepto para las plantas. Se considera

también acumulación de calor en plantas y suelo. Las siguientes son las ecuaciones de balance de energía y masa que se establecen para cada elemento del sistema:

CUBIERTA:

El flujo de calor que llega a la cara superior de la cubierta, Ec. 1, es el mismo que el transmitido por conducción en su interior, Ec. 2, y el mismo que abandona la cara inferior de la misma, Ec. 3. Por consiguiente resultan las siguientes ecuaciones:

$$q = h_f(T_e - T_{oc}) + (S_o - S_e) + (L_{oc} - L_{ec}) \dots \dots \dots (1)$$

$$q = \frac{k_c(T_{oc} - T_{ic})}{\delta} \dots \dots \dots (2)$$

$$q = h_s(T_{ic} - T_a) + (S_d - S_u) + (L_{dc} - L_{uc}) - \frac{\lambda Q(\omega - \omega_{sc})}{r_w} \dots \dots \dots (3)$$

donde los símbolos son los descriptos en la lista de símbolos.

AIRE INTERIOR:

El balance de energía en el aire interior esta dado por procesos de transferencia de calor por convección, debido a su despreciable conductividad térmica y absorbancia a la radiación. La Ec. 4 incluye los siguientes términos: convección desde la cubierta, el suelo y las plantas, e intercambio de calor por ventilación e intercambio de calor efectuado entre el S.C.C.S. y el aire. Este calor expresado por unidad de área del invernadero es directamente proporcional a la fuerza impulsora $(T_{cs} - T_a)$ y al caudal de aire que circula por los conductos, siendo p y c_p correspondientes a la temperatura media $(T_{cs} - T_a)/2$. La temperatura del suelo (a la profundidad de los conductos) y teniendo en cuenta las características del suelo y del conducto, como se describe mas abajo.

$$h_a(T_{ic} - T_a) \frac{A_c}{A_b} + h_i(T_s - T_a) + 2h_p(T_p - T_a) \frac{A_v L_{ai}}{A_b} + h_v(T_e - T_a) + \frac{K n Q}{A_b} c_p (T_{cs} - T_a) = 0 \dots \dots \dots (4)$$

Similarmen te se establece la ecuacion de balance de masa en el aire interior la cual incluye los términos correspondientes a la evapotranspiración de las plantas, condensación en la cubierta, condensación en el suelo y ventilación.

$$\frac{2 \varphi A_v L_{ai} (\omega_{sp} - \omega)}{A_b (r_a + r_s)} + \frac{\varphi A_c (\omega_{sc} - \omega)}{A_b r_w} + \frac{\varphi (\omega_{ss} - \omega)}{r_{so}} + \frac{h_v (\omega_e - \omega)}{c_p} = 0 \dots \dots \dots (5)$$

PLANTAS:

El balance de energía en las plantas tiene en cuenta la convección con el aire, los intercambios radiativos en longitudes de onda larga y corta, el calor asociado al intercambio de masa que se produce en la superficie de la

hoja y la acumulación de calor en las plantas. La suma algebraica de estas contribuciones resulta ser igual a:

$$2h_p(T_a - T_p) + \frac{(L_{dp} + L_{us} - L_{up} - L_{ds})}{L_{ai}} + \frac{(S_d + S_{su} - S_u - S_{sd})}{L_{ai}} + \frac{Q_r \eta_p A_v}{L_{ai} A_b} - \frac{2\lambda Q(\omega_{sp} - \omega)}{r_a + r_s} = \frac{v_v G_v c_v}{A_v} \frac{\partial T}{\partial x} \dots \dots \dots (6)$$

SUELO:

La solución de la ecuación diferencial de conducción del calor, expresada por la Ec. 7, con las condiciones de borde dadas por la Ec. 8 y las iniciales, permite obtener el perfil de temperaturas en el suelo. Las condiciones iniciales pueden ser fijadas arbitrariamente ya que al cabo de 8 a 10 días de simulación los valores convergen al valor real, según lo enuncian Levit and Gaspar, 1987. La condición de borde superior del suelo, Ec. 8 contiene los términos de intercambio radiativo en longitudes de onda larga y corta, de convección y de calor asociado al proceso de transferencia de masa.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \dots \dots \dots (7)$$

$$(L_{ds} - L_{us}) + (S_{sd} - S_{su}) + Q_r \eta_s \left(1 - \frac{A_v}{A_b}\right) + h_1(T_a - T_s) + \frac{\lambda \varphi (\omega - \omega_{ss})}{r_{so}} = -k_s \frac{\partial T}{\partial x} \dots \dots \dots (8)$$

DESCRIPCION DEL S.C.C.S.:

La temperatura del suelo en profundidad se mantiene prácticamente constante. Como además es el elemento de mayor acumulación de energía en los invernaderos, se convierte en una adecuada fuente o sumidero de calor. El sistema de climatización propuesto y estudiado en este trabajo, S.C.C.S., aprovecha esta propiedad y está constituido por una serie de conductos cilíndricos subterráneos dispuestos horizontalmente debajo del invernadero, por los cuales circula aire impulsado por ventiladores que pueden ser accionados termostáticamente, Fig. 1. El S.C.C.S. puede usarse en dos funciones: "Función Enfriamiento" o "Función Calefacción", pero ofrece mayores ventajas en esta última ya que durante las horas de frío el invernadero permanece cerrado y como el aire es reciclado a través de los conductos su temperatura se incrementa sucesivamente; se evita, por lo tanto, en días de bajas temperaturas el congelamiento de los cultivos o la detención del crecimiento, siendo además compatible con el uso de dispositivos para aporte de CO2. En cualquiera de las dos funciones la temperatura máxima o mínima que es posible lograr teóricamente es la correspondiente al suelo que rodea a los conductos. Los conductos que constituyen el S.C.C.S., pueden ser de cualquier material que cumpla con los requisitos de ser buen conductor del calor, no degradarse químicamente y tener resistencia mecánica. Por su interior circula aire mediante la impulsión de ventiladores.

MODELIZACION MATEMATICA DE LA DISTRIBUCION LONGITUDINAL DE LA TEMPERATURA EN LOS CONDUCTOS DEL S.C.C.S.

Para el estudio del perfil longitudinal de temperaturas en el aire que fluye por los conductos, el suelo circundante a los mismos se considera como un sólido semi-infinito a temperatura inicial T_s^* , sometido a una perturbación intermitente producida por el flujo de aire en el conducto a temperatura $T_a(y)$. La temperatura inicial T_s^* se determina a partir de la solución de la Ec. 7 para la profundidad correspondiente al eje de dicho conducto, usando la

condición de borde dada en la ecuación (8). Como la conductividad térmica del conducto es grande, comparada con la del suelo, y su espesor es pequeño (aproximadamente 0.5 mm), no se considera gradiente de temperatura a través del mismo. Realizando el balance energético correspondiente en un diferencial de sección longitudinal del conducto e integrando, se obtiene la temperatura del aire en función de la posición a lo largo del conducto.

$$T_a(y) = T^*s + (T_a(0) - T^*s) e^{-\gamma y} \dots \dots \dots (9)$$

$$\gamma = \bar{h}_c \pi D_c (\bar{m} c)^{-1} \dots \dots \dots (10)$$

Para conductos cuyos diámetros varían entre 0.10 y 0.40 m. y las velocidades de circulación del aire entre 0.3 y 100 m/s, el régimen resulta turbulento, por lo que el coeficiente de transferencia de calor puede calcularse a partir de Mc Adams, 1964.

Para el aire variando entre 0 C y 35 C, el número de Prantl (Pr), varía muy poco y es aproximadamente igual a 0.72. En ensayos realizados para calentamiento o enfriamiento de aire con $Pr = (0.7 \text{ a } 120.)$ y $Re = (10.000 \text{ a } 120.000)$, para relaciones $(Lc/Dc)^{0.5} = 50$ y variaciones de temperaturas moderadas ($\Delta T > 2$ SOC), el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección se mantiene aproximadamente constante a través de la longitud del conducto, Mc Adams, 1964.

$$Nu = 0.023 (Re)^{0.8} (Pr)^{0.4} \dots \dots \dots (11)$$

Las propiedades se calculan a la temperatura media de la masa del fluido; si se adopta un valor de 15 C resulta:

$$\bar{h}_c = 3.837 \bar{v}^{0.8} D_c^{-0.2} \dots \dots \dots (12)$$

Reemplazando, -se obtiene:

$$\gamma = 0.0125 \bar{m}^{-0.2} D_c^{-0.8} \dots \dots \dots (13)$$

lo que permite determinar, aplicando la Ec. 9, $T_{cs} = T_a(x=L)$. En la Fig. 3 se representa la variación de la temperatura relativa $\theta_{ra} = (T_a(x=0) - T_s^*) / (T_{cs} - T_s^*)$, en función del caudal (Q), para relaciones Lc/Dc variando entre 50 y 140 y diámetros de 0.20 y 0.30 m.

DISEÑO DEL S.C.C.S. PARA LA CALEFACCION DE UN INVERNADERO

Con el objetivo de seleccionar las características óptimas, desde el punto de vista técnico-económico, de un S.C.C.S. para la calefacción de un invernadero representativo de los de la Pampa-húmeda Argentina, se diseñó un programa que utiliza los modelos arriba desarrollados. Teniendo en cuenta la temperatura mínima requerida para el aire interior y luego de iterar, el programa selecciona las características del S.C.C.S. mas económico, tales como: cantidad, diámetro y longitud de conductos, caudal de aire, número y potencia de turbinas necesarias y calcula el rendimiento energético (energía

también proporcionalmente con la temperatura requerida pero menos pronunciadamente. En cuanto al costo anual de funcionamiento sus valores llegan a superar el 200 % del costo anual de instalación. El costo de funcionamiento del S.C.C.S. ocasionado por el consumo eléctrico de los ventiladores nunca supera el 10 % del costo de instalación, lo que significa un gasto mínimo de energía convencional, además, en el caso más desfavorable, la energía consumida en el S.C.C.S. llega a ser el 5 % de la consumida por el sistema de calefacción convencional. La relación de costos muestra que nunca el costo anual total del S.C.C.S. supera el 50 % del costo anual total del sistema convencional, decreciendo esta relación en un 21 % para la temperatura de 5 C. En la Fig. se muestran los costos de instalación y totales anuales para ambos sistemas en función de la temperatura mínima requerida, también se representa la relación de costos expresadas en porcentajes. En la Fig. 3 se muestra la evolución de las temperaturas del aire interior del invernadero simulado sin calefacción y las que se logran con el sistema de calefacción analizado, que es accionado termostáticamente con encendido a los 9 C y apagado a los 11 C, para un día típico de invierno.

CONCLUSIONES

Se comprobó que el modelo de simulación del microclima de invernaderos eslo suficientemente versátil para vincularlo al modelo que simula el S.C.C.S..

El S.C.C.S. es más conveniente en Función Calefacción que en Función Refrigeración ya que en verano es más adecuado abrirlo para bajar las altas temperaturas por medio de la renovación del aire interior.

Se comprueba a partir del estudio económico realizado que el S.C.C.S., en Función Calefacción, eleva la temperatura del aire interior de un invernadero tipo hasta 10 C con una economía respecto a los sistemas convencionales que utilizan G.L.E. como combustible.

El costo de funcionamiento del S.C.C.S. debido al consumo de energía es menor que en el sistema convencional analizado, representando esto un ahorro de energía.

Cuando las temperaturas requeridas son mayores de 10 C, el S.C.C.S. deja de ser económico y se torna imposible su construcción debido a la densidad de tubos necesaria. Cabe aclarar que ya para la temperatura de 10 C hay que recurrir a disponer los conductos a dos profundidades.

REFERENCIAS

- Levit, H. J., Gaspar, R., Lara, M. A., Piacentini, R. A., 1986. "Greenhouses in Argentina: simulation and experiments". Proceeding of the 2nd International Conference on Energy and Agriculture, Italy.
- Levit H. J., Gaspar, R., 1987. "Energy budget for greenhouses in humid-temperate climate". Aceptado para publicar en Agricultural and Forest Meteorology.
- Mc Adams, W., 1964. "Heat transmission". Mc Graw Hill, E. U. A.
- Seffino, R. A., Piacentini, R. D., 1985. "Enfriamiento de aire por tubos bajo tierra sometidos a excitación intermitente". Actas del V Congreso Latinoamericano de Energía Solar. Valparaíso, Chile.

LISTA DE SIMBOLOS

a	altura de los cultivos (m)
A _b	área del piso del invernadero (m ²)
A _c	área de la cubierta (m ²)
A _f	área frontal del invernadero (m ²)
A _v	área del piso cubierta con vegetación (m ²)
c _p	calor específico del aire (J/Kg K)
c _v	calor específico de las plantas (J/Kg K)
D	diámetro de los conductos (m)
h _g	coeficiente de transferencia de calor de cubierta al exterior (W/m ² K)
h _i	coeficiente de transferencia de calor de piso al aire interior (W/m ² K)
h _{ip}	coeficiente de transferencia de calor de plantas al aire interior (W/m ² K)
h _{ic}	coeficiente de transferencia de calor de cubierta al aire interior (W/m ² K)
h _v	coeficiente de transferencia de calor por ventilación (W/m ² K)
h _{cc}	coeficiente de transferencia de calor de conducto a aire interior (W/m ² K)
k _g	conductividad térmica media de la masa del fluido (W/m K)
k _c	conductividad térmica de la cubierta (W/m K)
k _s	conductividad térmica del suelo (W/m K)
K	coeficiente de encendido o apagado del S.C.C.S. (1 o 0)
L	longitud característica de la hoja (m)
l _i	longitud característica del invernadero (m)
l _{fol}	índice de área foliar
l _{rad}	radiación térmica descendiendo desde la cubierta (W/m ²)
l _{radp}	radiación térmica descendiendo a las plantas (W/m ²)
l _{radc}	radiación térmica descendiendo al piso (W/m ²)
l _{radu}	radiación térmica ascendiendo desde la cubierta (W/m ²)
l _{radc}	radiación térmica descendiendo a la cubierta (W/m ²)
l _{radc}	radiación térmica ascendiendo a la cubierta (W/m ²)
l _{radp}	radiación térmica ascendiendo desde las plantas (W/m ²)
l _{radu}	radiación térmica ascendiendo desde el piso (W/m ²)
Q	caudal másico (Kg/s)
n	número de tubos subterráneos que componen el S.C.C.S.
Nu	número de Nusselt
Pr	número de Prantl
q	flujo de calor por unidad de área de cubierta y unidad de tiempo (W/m ²)
Q	caudal de aire que circula por un conducto subterráneo (m ³ /s)
Q _v	energía radiada desde calefactores, por unidad de área de piso (W/m ²)
R _a	resistencia aerodinámica de los cultivos (s/m)
R _b	resistencia estomática de las hojas (s/m)
R _{ca}	resistencia aerodinámica del piso del invernadero (s/m)
R _{cc}	resistencia aerodinámica de la cubierta (s/m)
Re	número de Reynolds
R _{sd}	radiación solar descendiendo desde la cubierta (W/m ²)
R _{ss}	radiación solar saliendo del invernadero (W/m ²)
R _{si}	radiación solar incidente (W/m ²)
R _{sd}	radiación solar que llega al piso (W/m ²)
R _{su}	radiación solar subiendo desde el piso (W/m ²)
R _{sv}	radiación solar que llega a la cubierta (W/m ²)
t	tiempo (s)
T	temperatura del suelo (K)
T _a	temperatura del aire interior (K)
T _{a(y)}	temperatura del aire en el conducto a una distancia y del ingreso (K)
T _{ca}	temperatura del aire al salir de los conductos (K)
T _e	temperatura exterior (K)
T _{ic}	temperatura interior de la cubierta (K)
T _{ec}	temperatura externa de la cubierta (K)
T _h	temperatura de las hojas (K)
T _p	temperatura del piso del invernadero (K)
T _{sa}	temperatura del suelo circundante a los conductos (K)

V	volumen del invernadero (m^3)
V_V	volumen de las plantas (m^3)
\bar{v}	velocidad media del fluido (m/s)
x	coordenada vertical dentro del suelo (m)
y	coordenada horizontal a lo largo de los conductos (m)
α_s	difusividad térmica del suelo (m^2/s)
δ	espesor de la cubierta (m)
E_c	emisividad de la cubierta
E_p	emisividad de las hojas
E_s	emisividad del piso
η_p	factor de vista de los radiadores a las plantas
η_s	factor de vista de los radiadores al piso
λ	calor latente de vaporización del agua (J/Kg)
μ	viscosidad del aire (Kg/m s)
ρ	densidad del aire (Kg/m ³)
ρ_p	densidad de las plantas (Kg/m ³)
τ_c	transmitancia a la radiación solar de la cubierta
τ_p	transmitancia a la radiación solar de los cultivos
ϕ_c	reflectancia a la radiación solar de la cubierta
ϕ_p	reflectancia a la radiación solar de las plantas
ϕ_s	reflectancia a la radiación solar del piso
ω	humedad específica del aire interior
ω_e	humedad específica del aire exterior
ω_{sc}	humedad específica de saturación a la temperatura T_{ic}
ω_{sp}	humedad específica de saturación a la temperatura T_p
ω_{ss}	humedad específica de saturación a la temperatura T_s