

DETERMINACION DE LA TEMPERATURA DE EQUILIBRIO EN DOS LOCALES CON INTERCAMBIO TERMICO POR CONVECCION NATURAL

Irene De Paul

INENCO# - Facultad de Ciencias Exactas UNSa
Buenos Aires 177 - 4400 Salta
TE y fax : 087 - 251037

RESUMEN

Se presenta un programa de cálculo que permite determinar la evolución de las temperaturas que se establecen en dos locales de un modelo pequeño de vivienda que intercambian energía entre sí por convección natural a través de una puerta.

El modelo está construido en vidrio y acrílico, tiene el techo inclinado y está dividido en dos locales por un tabique con una abertura que simula la puerta de comunicación de 5.6 cm de alto y 3 cm de ancho. El modelo tiene agua como elemento convectivo. Se suministra calor a través de la pared vertical del local menor que enfrenta la puerta y parte de esta energía es transmitida por convección natural al local mayor.

Se discute la influencia de los distintos parámetros que intervienen en el cálculo: potencia suministrada, pérdidas al exterior, etc. En particular se discute la influencia del perfil de velocidades que se establece en la puerta, sobre las temperaturas alcanzadas por ambos locales en estado estacionario.

INTRODUCCION

Con el objeto de estudiar la influencia del transporte de energía por convección natural en la determinación de la temperatura de un local, en estado estacionario, se propuso el empleo de modelos en agua a escala de laboratorio lo que permite tener mayor control experimental sobre los factores que influyen en el proceso.

Uno de los modelos empleados representa una vivienda con techo inclinado, que consta de dos locales comunicados entre sí por una abertura que simula una puerta. Con un calefactor eléctrico se calienta el local menor; parte de la energía transferida se pierde hacia el exterior, parte pasa al local vecino por conducción a través de la pared separadora y parte es distribuida en los dos locales por convección natural a través de la puerta.

A fin de determinar la temperatura alcanzada por ambos locales en estado estacionario y la constante de tiempo de calentamiento durante el transitorio, se desarrolló un programa de simulación numérica que permite variar los parámetros más significativos del proceso y determinar así su influencia en los valores de temperatura alcanzados. Para su ejecución se requiere conocer el perfil de velocidades del agua en la abertura de la puerta, para lo cual se emplearon los valores medidos en el modelo experimental.

Instituto UNSa - CONICET

MODELO EXPERIMENTAL

El modelo de laboratorio fue construido con paredes de vidrio flotado de 3 mm de espesor y piso, techo y pared separadora con acrílico de 8 y 3 mm de espesor. Sus dimensiones son, en planta, 12 cm x 10 cm; altura mínima 7.1 cm y máxima 10.3 cm. La pared separadora tiene una altura de 8.7 cm, divide el modelo en dos locales, identificando el menor como "local 1" y el mayor como "local 2". La puerta de comunicación es una abertura de 5.6 cm de alto por 3 cm de ancho. El calefactor es una resistencia eléctrica soportada con material refractario y suministra una potencia de 20 a 30 W.

Empleando el método de medida de velocidad por fotografía de trazas se determinó el perfil de velocidad del agua en la puerta. Los valores medidos fueron empleados para ajustar una función analítica del siguiente tipo:

$$V(z) = \begin{cases} -V_2 \sin(k_2 z + \phi) & 0 \leq z \leq z_0 \\ V_1 \sin(k_1 z) & z_0 \leq z \leq h \end{cases}$$

MODELO TEORICO

Para calcular la evolución de las temperaturas en ambos locales hasta alcanzar los valores de equilibrio con el ambiente se aplicaron las ecuaciones de balance según los intercambios térmicos esquematizados en la figura 1, donde:

Q es la potencia suministrada por el calefactor.

q es la potencia transferida por convección a través de la puerta.

Q' es la potencia transferida por conducción a través de la pared separadora.

Q_{pi} es la potencia perdida por el local i hacia el exterior a través de paredes, piso y techo.

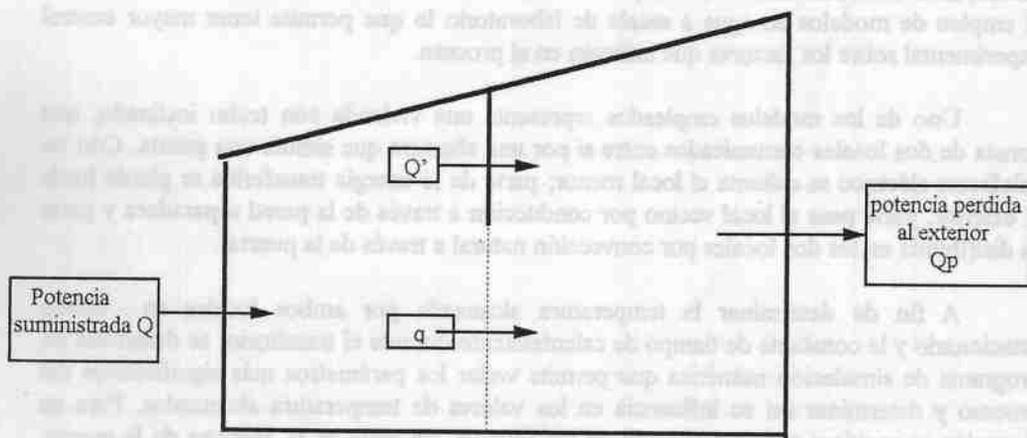


figura 1: intercambios energéticos en el modelo

Resulta el siguiente sistema de ecuaciones para describir la evolución de la temperatura de ambos locales:

$$M_1 c_p \frac{dT_1}{dt} = Q - (C + K + K')_1 T_1 + (C + K')_2 T_2 + K_1 T_a$$

$$M_2 c_p \frac{dT_2}{dt} = (C + K') T_1 - (C + K + K')_2 T_2 + K_2 T_a$$

donde la constante K tiene en cuenta las pérdidas hacia el exterior, K' tiene en cuenta la conducción entre ambos locales y C el intercambio convectivo a través de la puerta.

ESTADO ESTACIONARIO

Aproximando las derivadas por diferencias finitas se puede calcular la evolución temporal de las temperaturas con las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} T'_1 &= T_1 + \{ a_0 - a_1 T_1 + a_2 T_2 + a_3 T_a \} dt \\ T'_2 &= T_2 + \{ b_1 T_1 - b_2 T_2 + b_3 T_a \} dt \end{aligned} \quad (1)$$

donde T_i indica la temperatura del local i en el instante t y T'_i la correspondiente al instante $t + dt$. Las constantes a y b dependen de K , K' , C y Q .

Una vez alcanzado el estado estacionario las temperaturas de los locales no cambian más con t ; en este caso, en un instante posterior se tiene:

$$T'_1 = T_1 = T_{e1} \quad \text{y} \quad T'_2 = T_2 = T_{e2}$$

y las expresiones que figuran entre llaves en las ecuaciones (1) son nulas.

$$\begin{aligned} a_0 - a_1 T_{e1} + a_2 T_{e2} + a_3 T_a &= 0 \\ b_1 T_{e1} - b_2 T_{e2} + a_3 T_a &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

A partir de este sistema se puede determinar las temperaturas T_{e1} y T_{e2} en estado estacionario.

ESTADO TRANSITORIO

En el arranque del programa se supone que ambos locales se encuentran a temperatura ambiente T_a . En esa situación no hay intercambio convectivo a través de la puerta y tanto V_1 como V_2 son nulas. A medida que se calienta el local 1 con potencia constante, se establece una diferencia de temperatura $\Delta T = T_1 - T_2$ creciente hasta que se alcanza el estado estacionario. La diferencia de temperatura ΔT impulsa el flujo convectivo, con lo cual V_1 y V_2 crecen con ΔT . Cuando se alcanza el estado estacionario ambas permanecen constantes. Se supone la siguiente relación para V_1 y V_2 durante la etapa transitoria:

$$V_i = g_i (T_1 - T_2) \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

Las constantes g_i se determinan a partir de los valores calculados T_{e1} y T_{e2} y de las velocidades medidas en estado estacionario:

$$g_i = V_i / (T_{e1} - T_{e2})$$

La constante C tiene la siguiente expresión:

$$C = \rho b c_p \Delta y \alpha [V_1 (h - z_0) - V_2 z_0] / \pi y_0$$

al incorporar la expresión (3) resulta que C es función de la temperatura, con lo cual las ecuaciones de evolución temporal se modifican de la siguiente manera:

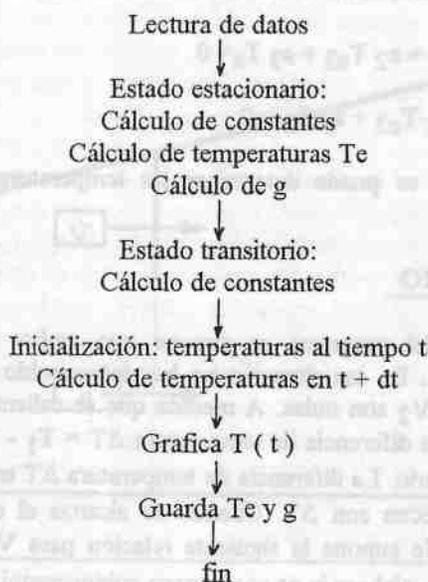
$$T'_1 = T_1 + \{ a_0 - \gamma_1 (T_1 - T_2)^2 - \gamma_2 (T_1 - T_a) \} dt \quad (4)$$

$$T'_2 = T_2 + \{ \gamma_3 (T_1 - T_2)^2 - \gamma_4 (T_1 - T_a) \} dt$$

Las expresiones (2) y (4) dependen de constantes relacionadas con los parámetros de diseño y de desarrollo de la experiencia tales como coeficientes de pérdida conductivos y convectivos a través de las paredes, potencia térmica Q suministrada al modelo, perfil de velocidades en la puerta, etc. Por lo tanto es posible variar separadamente estos parámetros y determinar la influencia de cada uno de ellos, tanto en los valores de temperatura estacionarios como en la constante de tiempo del sistema.

DESCRIPCION DEL PROGRAMA

El programa TRANSIT4.M realiza los cálculos anteriores empleando el programa MATLAB, según el siguiente diagrama de flujo:



Sobre este esquema básico, que calcula la evolución de la temperatura a lo largo de una hora, en intervalos de 1 minuto, se hicieron modificaciones que permiten variar los parámetros de diseño.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Influencia de la potencia suministrada. Se observa que los valores de temperatura estacionaria en ambos locales crece linealmente con la potencia suministrada Q en el rango 10 a 100 W, cuando se tiene en cuenta la conducción a través de la pared separadora (figuras 2). Si la pared es adiabática, la temperatura del local 1 crece mientras que la del local 2 decrece linealmente con Q .

Influencia de la ubicación del punto de inversión de velocidades z_0 . Se ejecutó el programa empleando los valores del perfil medidos experimentalmente: $V_1 = 0.51$ cm/s, $V_2 = 0.34$ cm/s y $z_0 = 2.47$ cm. Se compararon los resultados con los obtenidos si z_0 estuviera por debajo y por arriba del valor experimental: 1.5 cm y 4.5 cm. (figura 3). Se observa que, cuando la pared separadora es conductora T_1 alcanza valores más altos cuando z_0 crece, alrededor de 20 °C, mientras que T_2 es menor cuanto mayor es z_0 , con valores alrededor de 17.6 °C. Sin embargo, si la pared es aislante, (figura 4) T_1 crece con z_0 a valores alrededor de 21 °C mientras que T_2 disminuye ligeramente cuando $z_0 = 4.5$ cm y aumenta ligeramente cuando $z_0 = 1.2$ y 2.47 cm. Las variaciones en este caso, sin embargo, son tan pequeñas, (< 0.1 °C) que desde el punto de vista experimental son inapreciables y se puede considerar que T_2 no cambia.

Influencia de los coeficientes de conducción hacia el exterior. Se ejecutó el programa variando los coeficientes de transferencia conductivos hacia el exterior en un orden de magnitud por encima y por debajo de los correspondientes al modelo: $k_{\text{vidrio}} = 5.8 \times 10^{-3}$ y $k_{\text{acrílico}} = 2.1 \times 10^{-4}$ W/cm °C. Las figuras 5 muestran que las temperaturas de equilibrio alcanzadas en el local 1 varían entre 18.4 y 20.4 °C, mientras que las del local 2 varían entre 17.3 y 17.7 °C. Las constantes de tiempo cambian de 3 a 5 min en el local 1 y de 3 a 10 min en el local 2.

Influencia del perfil de velocidad en la puerta. La figura 3 muestran los resultados del cálculo usando los valores de velocidad medidos experimentalmente. Se compararon los resultados obtenidos en el caso en que hay convección con los que resultarían si no se tuviera en cuenta el intercambio convectivo entre ambos locales. Para ésto se asignó arbitrariamente los valores $V_1 = V_2 = 1$ cm/s y $V_1 = V_2 = 0$. Los resultados de la simulación se muestran en las figuras 6 y 7 . De su análisis se desprende que los valores de T_{e1} son mayores con convección que sin convección, para cualquier valor de z_0 . Por el contrario, la temperatura del local 2 es menor cuando hay convección que cuando no la hay, para cualquier valor de z_0 . Este efecto es tanto más importante cuanto mayor es la potencia suministrada Q .

Este resultado parece contradictorio con lo que se podría esperar: si la energía suministrada al local 1 se transmite al local 2 por conducción a través de la pared y por convección a través de la puerta, sería razonable esperar que, al haber convección, T_{e1} fuera menor que si no la hubiera. El resultado obtenido parece ser un problema intrínseco al modelo físico, que supone que ambos locales tienen una temperatura uniforme T_1 y T_2 . De esta manera, en cada paso de cálculo, se actualiza la temperatura del local 2 en función de la energía recibida y en el paso siguiente, parte de esta energía es reinyectada al local 1 por la masa de agua de recirculación desde 2 hacia 1. Si se tuviera en cuenta la estratificación de temperaturas que se produce en ambos locales, resultaría que el flujo de recirculación ingresa al local 1 a una temperatura menor que la calculada suponiendo temperatura uniforme.

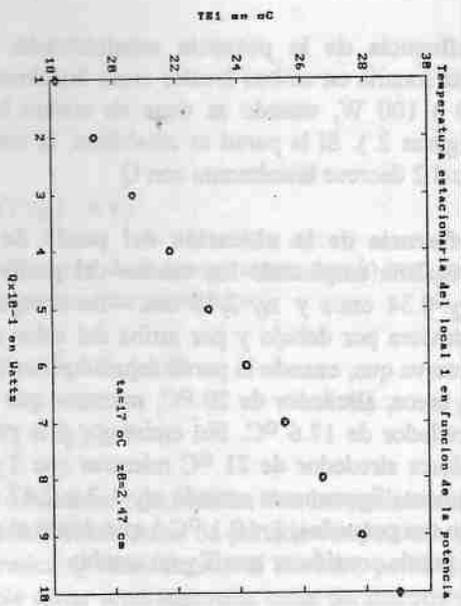


figura 2
Influencia de la potencia Q con pared conductora.

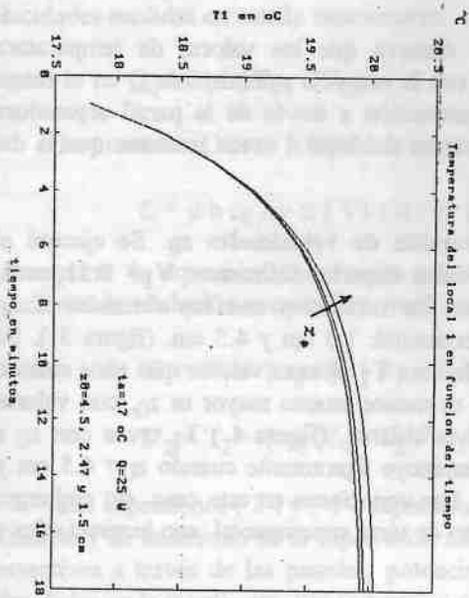
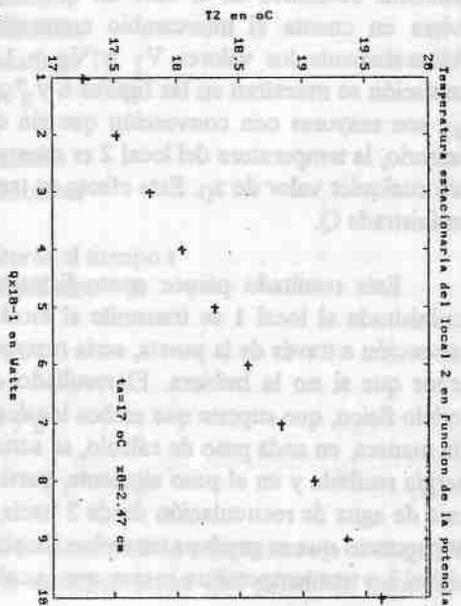
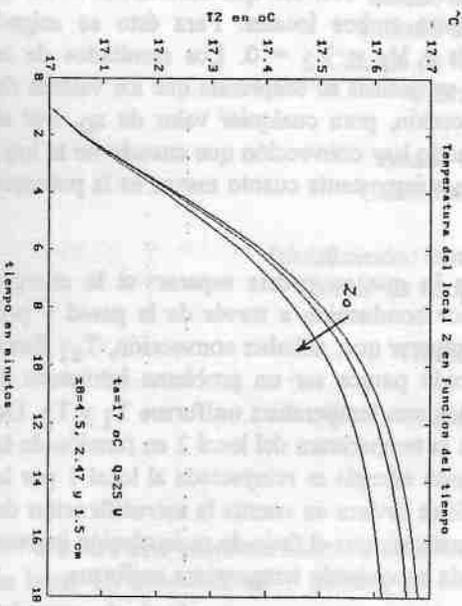


figura 3
Influencia del punto de inversión z_0 con pared conductora.



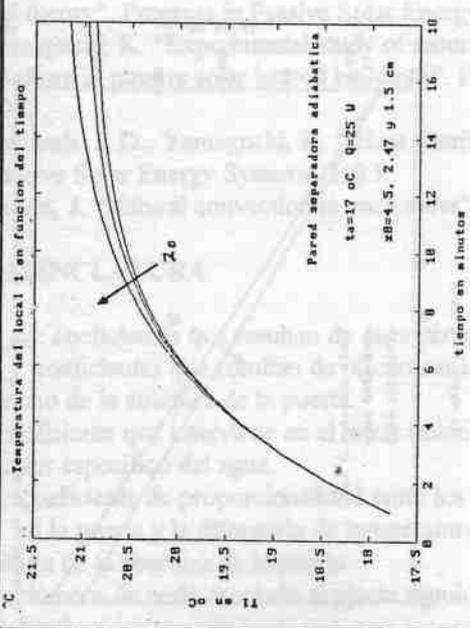


figura 4
 Influencia del punto de inversión Z_0 con pared aislante.

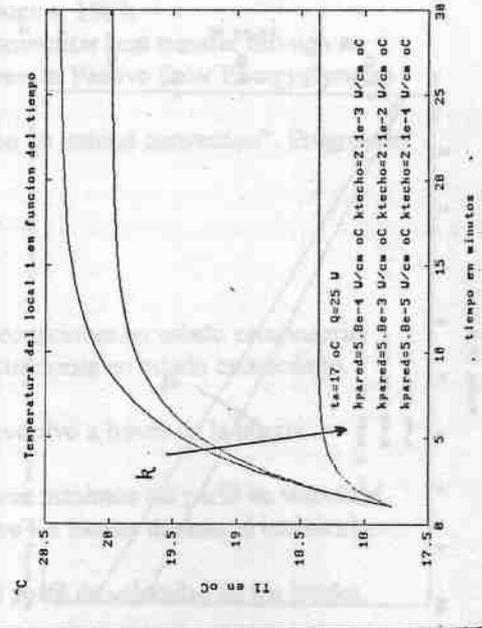
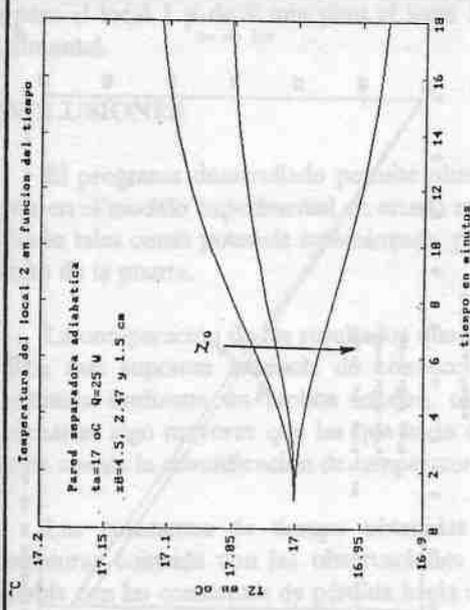
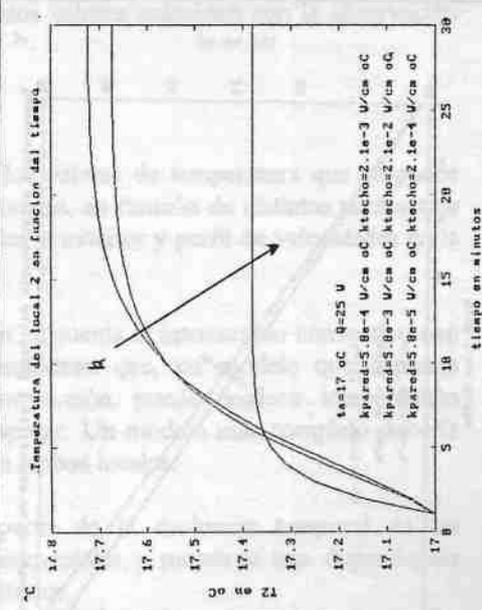


figura 5
 Influencia de las constantes de pérdida al exterior.



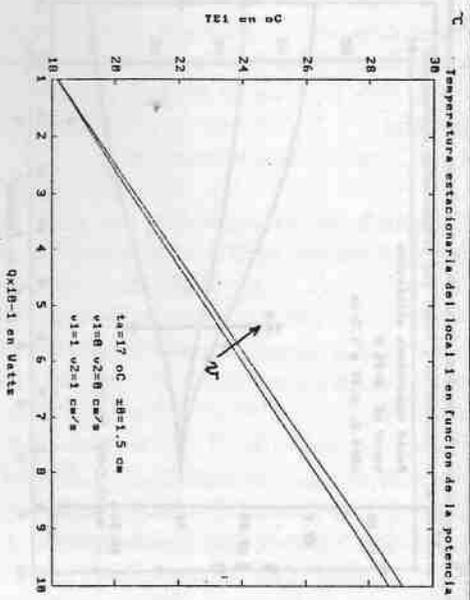


figura 6
Comparacion de Te con conveccion y sin conveccion para Z0 = 1.5 cm

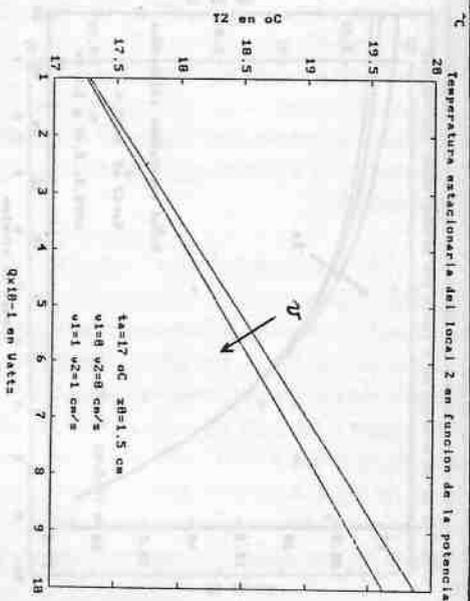
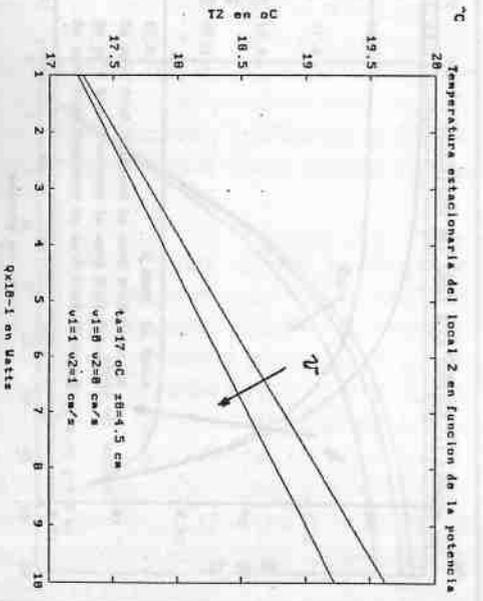
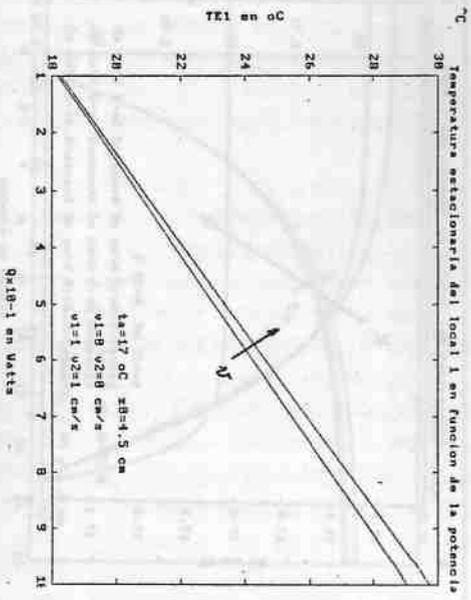


figura 7
Comparacion de Te con conveccion y sin conveccion para Z0 = 4.5 cm.



Las constantes de tiempo no varían significativamente con V siendo del orden de 5 min para el local 1 y de 9 min para el local 2. Estos valores coinciden con la observación experimental.

CONCLUSIONES

El programa desarrollado permite obtener los valores de temperatura que se puede esperar en el modelo experimental en estado estacionario, en función de distintos parámetros de diseño tales como potencia suministrada, pérdidas al exterior y perfil de velocidades en la abertura de la puerta.

La comparación de los resultados que tienen en cuenta el intercambio convectivo con aquéllos que suponen ausencia de convección muestran que, un modelo que suponga temperatura uniforme en ambos locales, con convección, puede predecir temperaturas estacionarias algo mayores que las que sería de esperar. Un modelo más completo debería tener en cuenta la estratificación de temperaturas en ambos locales.

Las constantes de tiempo obtenidas a partir de la evolución temporal de las temperaturas coincide con las observaciones experimentales y muestran una dependencia razonable con las constantes de pérdida hacia el exterior.

BIBLIOGRAFIA

- Burmeister. "Convective heat transfer". J. Wiley & Sons. Kansas. EE. UU.
- Mac Adams, W. H. "Transmisión de calor" 3a. edición. Mc Graw Hill. México. 1978.
- Boutet, S. T. "Controlling air movement". Mac Graw Hill. 1987.
- Isachenko, V., Osipova, V., Sukomel, A. "Heat transfer". Mir Publishers. Moscú. 1974.
- Balcomb, J. D. "Heat distribution by natural convection". Actas Intersol 85.
- Blay, D., Tuhault, J. L., Bois, J. M. "Natural ventilation between adjacent rooms in passive heating". Actas Intersol 85.
- Balcomb, J. D., Jones, G. F., Yamaguchi, K. "Natural convection airflow measurement and theory". Progress in Passive Solar Energy Systems. 1983.
- Yamaguchi, K. "Experimental study of natural convection heat transfer through an aperture in passive solar heated buildings". Progress in Passive Solar Energy Systems. 1983.
- Balcomb, J. D., Yamaguchi, K. "Heat distribution by natural convection". Progress in Passive Solar Energy Systems. 1983.
- Catton, J. "Natural convection in enclosures".

NOMENCLATURA

- $a_{0,1,2,3}$: coeficientes que resultan de discretizar las ecuaciones en estado estacionario.
- $b_{1,2,3}$: coeficientes que resultan de discretizar las ecuaciones en estado estacionario.
- b : ancho de la abertura de la puerta.
- C : coeficiente que interviene en el intercambio convectivo a través de la puerta.
- c_p : calor específico del agua.
- $g_{1,2}$: coeficiente de proporcionalidad entre los valores máximos del perfil de velocidad en la puerta y la diferencia de temperatura entre los locales durante el transitorio.
- h : altura de la abertura de la puerta.
- $k_{1,2}$: número de onda asociado al ajuste senoidal al perfil de velocidad en los locales 1 y 2.

k : conductividad térmica.

K : coeficiente que tiene en cuenta las pérdidas térmicas hacia el exterior.

K' : coeficiente que tiene en cuenta la conducción térmica entre los locales.

$M_{1,2}$: masa de agua en los locales 1 y 2.

T_a : temperatura ambiente.

$T_{1,2}$: temperatura de los locales 1 y 2.

$T_{e_{1,2}}$: temperatura estacionaria de los locales 1 y 2.

$V(z)$: velocidad del agua en función de la altura, en la abertura de la puerta (ajuste).

$V_{1,2}$: valores máximos del perfil de velocidad en la abertura, en los locales 1 y 2.

y_0 : distancia horizontal de la puerta al punto medio de cada local.

Δy : espesor de la puerta.

z : altura.

z_0 : altura del punto de inversión en el perfil de velocidad.

α : factor de proporcionalidad entre el gradiente de temperatura en la puerta, con convección, y el que se tendría si no hubiera convección.

$\gamma_{1,2,3,4}$: coeficientes que resultan de discretizar las ecuaciones en estado transitorio.

ϕ : factor de fase en el ajuste del perfil de velocidad.

ρ : densidad del agua.