

MODELO DE SIMULACION TERMICO DINAMICO  
DE UN SISTEMA DE TUBOS ENTERRADOS

P. Mosconi\*, R. Tarditti# y E. Di Bernardo°

Centro de Estudios Bioambientales (CEB)  
Facultad de Arquitectura, Planeamiento y Diseño  
Universidad Nacional de Rosario  
Riobamba 250 bis - 2000 Rosario

RESUMEN

Se propone un modelo de simulación térmico dinámico cuyo objetivo es determinar la factibilidad de uso de tubos intercambiadores tierra-aire como técnica de enfriamiento de espacios habitables para el período estival en climas templado-húmedos.

El objeto del modelo de simulación ha sido desarrollado para predecir las variaciones de temperatura del aire en cualquier punto y en cualquier instante, analizando dentro de una tubería enterrada.

INTRODUCCION

Este modelo en cuestión utiliza el potencial de enfriamiento del suelo, de temperatura relativamente constante a lo largo de todo el año, a una profundidad cercana a los 2.00m.

La temperatura del aire dentro de la tubería es consecuencia de la relación entre los siguientes parámetros: temperatura del aire exterior, humedad del aire, flujo y velocidad del mismo, temperatura de la tierra, propiedades térmicas del suelo, características estructurales de la tubería.

Por lo tanto, si el aire atmosférico pasa a través de una tubería enterrada, a una profundidad de alrededor de 2.00m., perderá o ganará calor dependiendo de las condiciones atmosféricas. En verano, el aire cederá calor hacia la tierra y se enfriará debido a este intercambio térmico, mientras que en invierno sucederá lo inverso.

Algunas de las variables significativas

para resolver modelos de simulación son: las propiedades higrotérmicas para cada tipo de suelo y a distintas profundidades, la evaluación del intercambio térmico en diversas formas de tubería y el análisis de la transferencia de calor entre superficies de distintos materiales.

El objetivo de este estudio ha sido analizar las variaciones de temperatura a lo largo de la tubería y desde la superficie de la misma a la tierra circundante.

Para ello, se realizó el análisis teórico de la transferencia de calor mediante suposiciones simplificatorias.

ANALISIS TEORICO

El análisis teórico utiliza para la evaluación de la transferencia de calor, determinadas condiciones iniciales, planteándose las siguientes suposiciones:

1. Las propiedades del suelo son isotrópicas.
2. El contacto entre la tubería y la tierra es perfecto.
3. La temperatura inicial de la superficie de la tubería se supone igual a la temperatura de la tierra circundante.
4. La resistencia térmica debido al espesor de la tubería es despreciable.
5. La presión dentro de la tubería es igual a la presión atmosférica.

Para el análisis de la transferencia de calor desde el aire a la tubería, se supone que la misma está dividida en

\*Ingeniero de Perfeccionamiento del CONICET  
#Ingeniero Electrónico, miembro del CEB  
°Director del CEB

"n" número de elementos (figura 1).

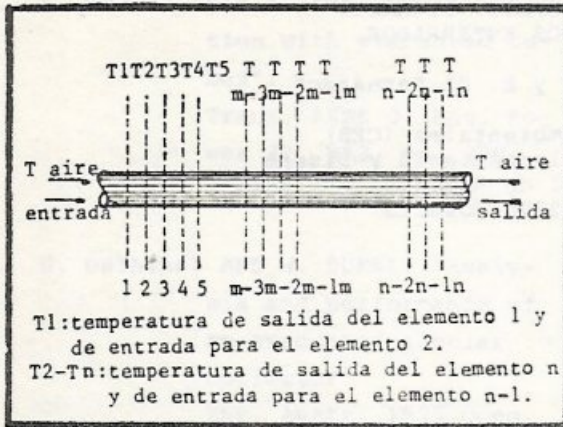


Figura 1

A partir de esta hipótesis de trabajo se puede realizar el balance energético en cada elemento (figura 2).

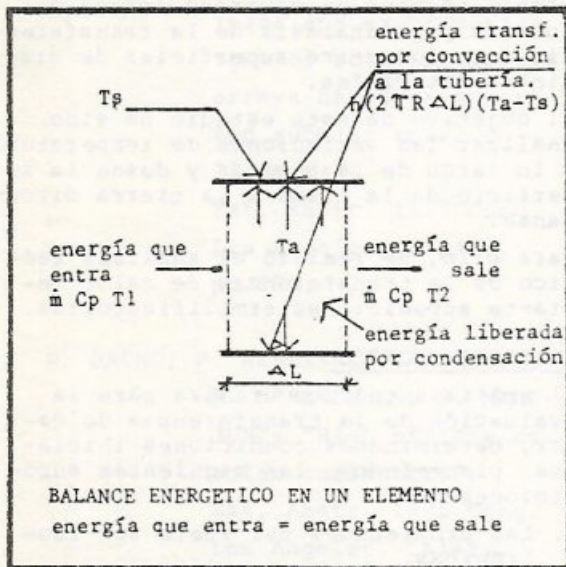


Figura 2

Siendo la ecuación:

$$\dot{m} C_p T_1 + \dot{m} (w_1 - w_2) H_{fg} = \dot{m} C_p T_2 + h A_p (T_a - T_s) \quad (1)$$

Si el aire que entra al elemento no está saturado, puede salir de éste en dos condiciones:

- no saturado
- saturado

Esto depende de la temperatura del punto de rocío.

a. Si el aire deja el elemento no saturado, el balance energético en el mismo será:

$$\dot{m} C_p (T_1 - T_2) = h A_p (T_a - T_s) \quad (2)$$

La temperatura del aire ( $T_a$ ) se considera como la temperatura media entre  $T_1$  y  $T_2$ .

Luego substituyendo y simplificando se obtiene que la temperatura de salida ( $T_2$ ) del elemento considerado resulta:

$$T_2 = \left[ \frac{(1-U) T_1 + U T_s}{2} \right] / \left( 1 + \frac{U}{2} \right)$$

b. Si el aire deja el elemento saturado  $T_2$  será:

$$T_2 = \left[ \frac{(1-U) T_1 + \frac{(w_1 - w_2) H_{fg} + U T_s}{c_p}}{2} \right] / \left( 1 + \frac{U}{2} \right)$$

donde:

$T_a$ : temperatura del aire en el elemento  
 $T_s$ : temperatura de la superficie de la tubería

$T_1$ : temperatura del aire a la entrada del elemento.

$T_2$ : temperatura del aire a la salida del elemento.

$A_p$ : área de circunferencia del elemento  
 $h$ : coeficiente de intercambio convectivo.

$\dot{m}$ : flujo másico del aire.

$C_p$ : calor específico del aire

$$U = \frac{A_p h}{\dot{m} C_p}$$

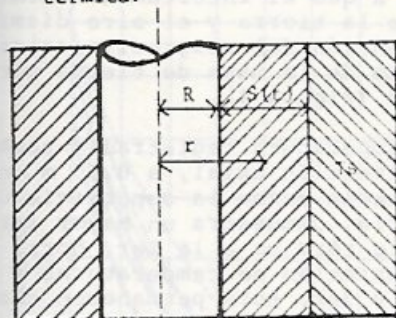
Se ha estudiado el caso a., donde el aire sale no saturado del elemento. Resta evaluar la incidencia de la humedad absoluta en el proceso de enfriamiento, fenómeno que considera posible condensación en las paredes de la tubería, en función de la temperatura de rocío en el elemento.

En síntesis, utilizando a la temperatura de salida del primer elemento como la temperatura de entrada del próximo elemento, la temperatura de salida para ese elemento en cuestión puede calcularse en forma análoga recurriendo a la fórmula (3), ó a la (4) según sea el caso.

La transferencia de calor desde la tubería a la tierra es analizada considerando el flujo de calor suministrado en el radio interior de un cilindro semiinfinito formado por la tierra alrededor del mismo.

El esquema de transferencia de calor por conducción se muestra en la figura 3. En el análisis de la transferencia de calor interviene la distancia radial desde el eje de la tubería, tiempo considerado después de iniciado el proceso, la difusividad, la conductividad térmica de la tierra y la capa límite de la misma hasta la que se produce el intercambio térmico.

$S(t)$  = capa límite de transferencia térmica.



$T_s$ : temperatura de la tierra a 2m. de prof.  
 $r$ : radio de la tubería  
 $R$ : distancia radial desde el eje de la tubería.

TRANSFERENCIA DE CALOR TUBERIA-TIERRA

Figura 3

Para un pequeño elemento, el problema puede ser formulado como:

$$\frac{\partial T(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} \quad (5)$$

Imponiendo las siguientes condiciones iniciales y de límite:

$$T(r,0) = T_s \quad (6)$$

$$T(\infty,t) = T_s \quad (7)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial r}(r,t) = q' \quad (8)$$

donde:

- = distancia radial desde el eje de la tubería.
- = tiempo considerado después de iniciado el proceso.
- = difusividad térmica de la tierra
- = conductividad térmica de la tierra
- = cantidad de calor transferido por conducción desde la tubería a la tierra.

donde:

- = cantidad de calor transferido por convección desde el aire a la tubería, expresándose como:

$$q'' = hc (T_a - T_s) \quad (9)$$

La obtención del coeficiente de intercambio convectivo ( $hc$ ), para evaluar la energía transferida desde el aire a la tubería depende del Número de Reynolds y de Nusselt, parámetros utilizados para su cálculo.

El problema de la transferencia de calor en la tierra, planteado como una ecuación diferencial tiene una solución aproximada mediante métodos iterativos.

#### CONDICIONES SUPUESTAS

El programa de computadora, realizado en TI-99 se basa en el análisis teórico presentado anteriormente, trabajando con una subdivisión de la tubería y el terreno circundante, en pequeños elementos con el objeto de resolver la ecuación diferencial que rige la transferencia de calor en forma aproximada por iteraciones.

Los parámetros físicos utilizados para la obtención de los datos, pueden agruparse de la siguiente manera:

##### a. De la tubería

- \* longitud = 30m.
- \* diámetro = 0.30m.
- \* ancho del elemento ( $L$ ) = 0.60m.
- \* temperatura superficial de la tubería al inicio del proceso = 22 C = temperatura de la tierra

##### b. Del aire

- \* temperatura exterior = 30 C
- \* peso específico = 1.2 kg/m<sup>3</sup>
- \* calor específico = 0.24 kcal/kg
- \* caudal = 500 m<sup>3</sup>/h
- \* caudal másico = 600 kg/h
- \* velocidad = 1.45 m/s
- \* coeficiente de intercambio convectivo = 6 kcal/hm<sup>2</sup> C

##### c. De la tierra

- \* temperatura de la tierra = temperatura superficial de la tubería al inicio del proceso = 22 C
- \* difusividad térmica = 0.0038 m<sup>2</sup>/h
- \* conductividad térmica = 1.02 kcal/m/hm<sup>2</sup> C

#### CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Luego de haber corrido el programa con los inputs supuestos anteriormente, se verifica el comportamiento del sistema a la 1er., 2da. y 3er. hora de haberse iniciado el proceso, tomándose en consideración los siguientes criterios de valuación:

- a/ La temperatura a lo largo de la superficie de la tubería (dirección axial) en los períodos mencionados anteriormente.
- b/ La temperatura en dirección axial, a 0.15 m. de distancia desde la su-

perficie de la tubería hacia la tierra en los períodos considerados.

- c/ La temperatura en dirección radial desde la superficie de la tubería hacia la tierra, en los mismos períodos.
- d/ La evaluación del enfriamiento acumulado producido mediante el sistema de la tubería enterrada, durante las 3 horas de funcionamiento.

Como resultado puede decirse que:

- a/ La temperatura del aire a lo largo de la superficie de la tubería, demuestra una disminución considerable a la 1er. hora de iniciado

el proceso, reduciéndose la misma en menor proporción a la 2da. y 3er hora de comenzado el mismo. Esto se debe a que el intercambio térmico entre la tierra y el aire disminuye en función del progresivo calentamiento de la masa de tierra circundante (figura 4).

- b/ La temperatura registrada también en dirección axial, a 0.15 m. de distancia desde la superficie de la tubería, demuestra un mayor intercambio térmico a la 1er. hora, pero la variación de temperaturas a la 2da. y 3er. hora permanecen casi constante (figura 4).

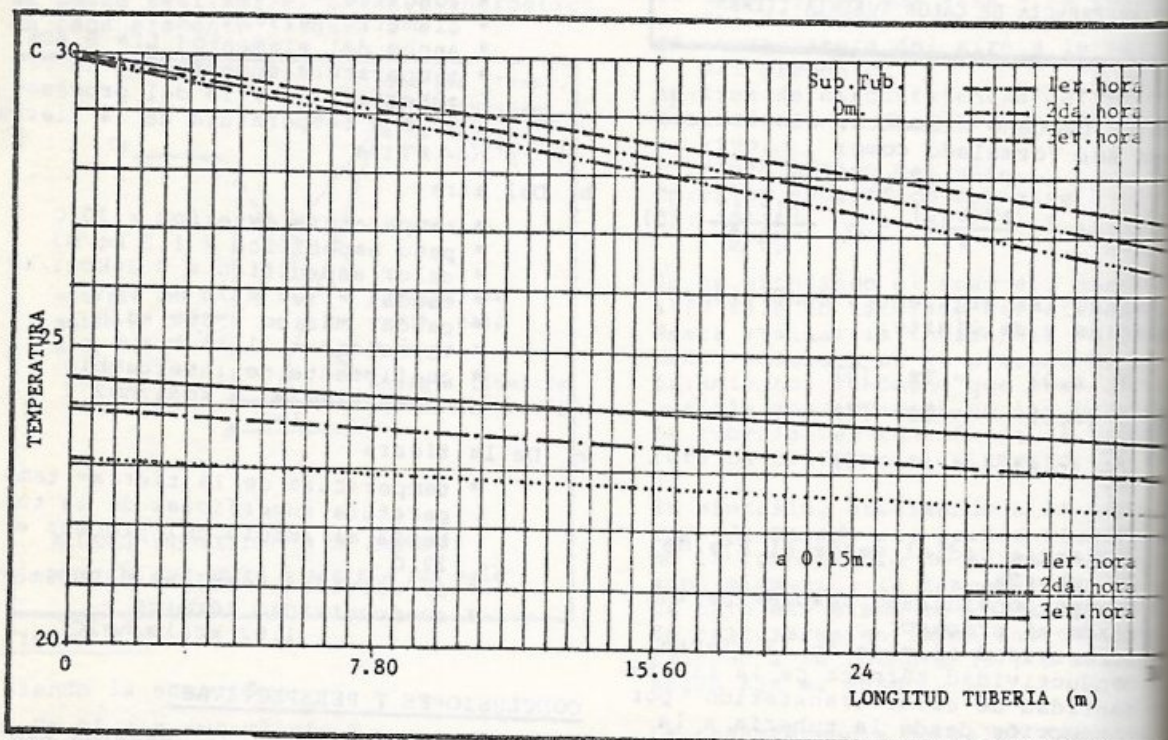


Figura 4

- c/ La variación de temperatura en dirección radial demuestra que la transferencia de calor entre la tierra y el aire, en el sentido transversal, decrece abruptamente en función de los distintos espesores de tierra involucrados. Se grafica el espesor de tierra o radio considerado máximo, a partir del cual el intercambio térmico entre el aire de la tubería

y la tierra es nulo, siendo el mismo de 0.50 m. aproximadamente. Desde ese espesor "límite" en adelante, la recta corresponde a la temperatura de la tierra. Se verifica nuevamente el máximo intercambio térmico al inicio del proceso (figura 5).

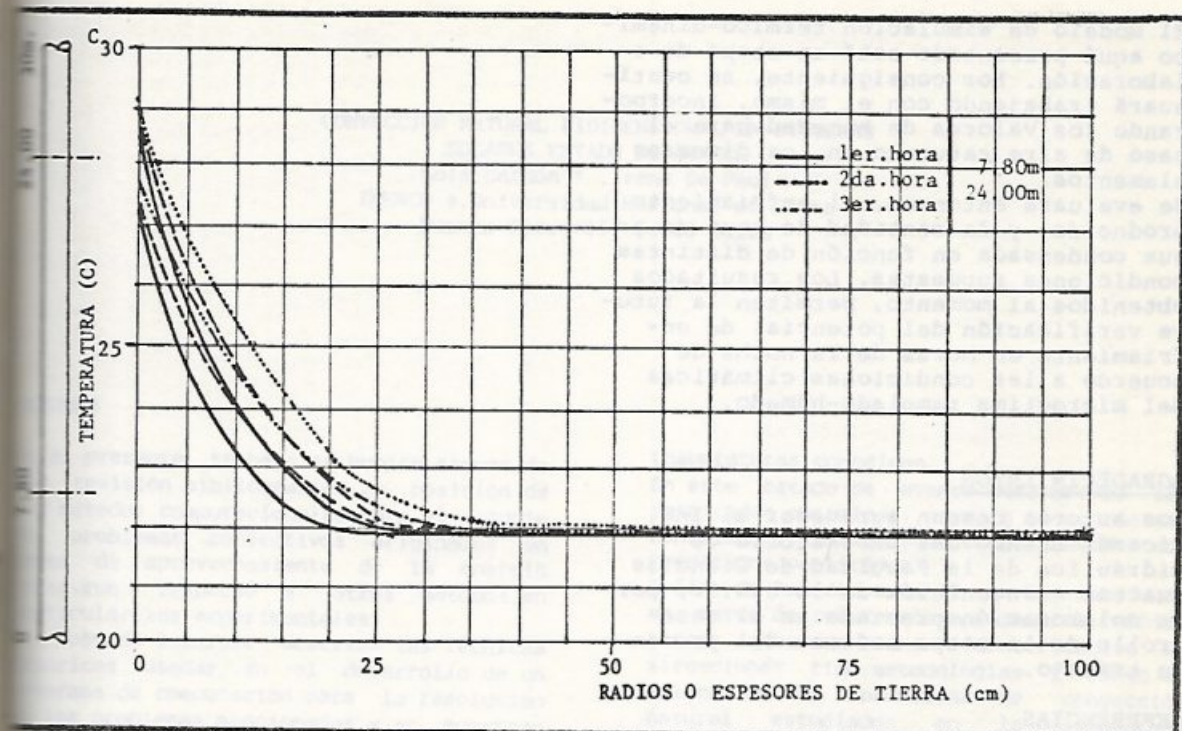


Figura 5

Se grafica el resultado del enfriamiento acumulado producido en función de la duración total del proceso.

Se verifica un potencial de enfriamiento acumulado que describe una gráfica aproximadamente lineal.

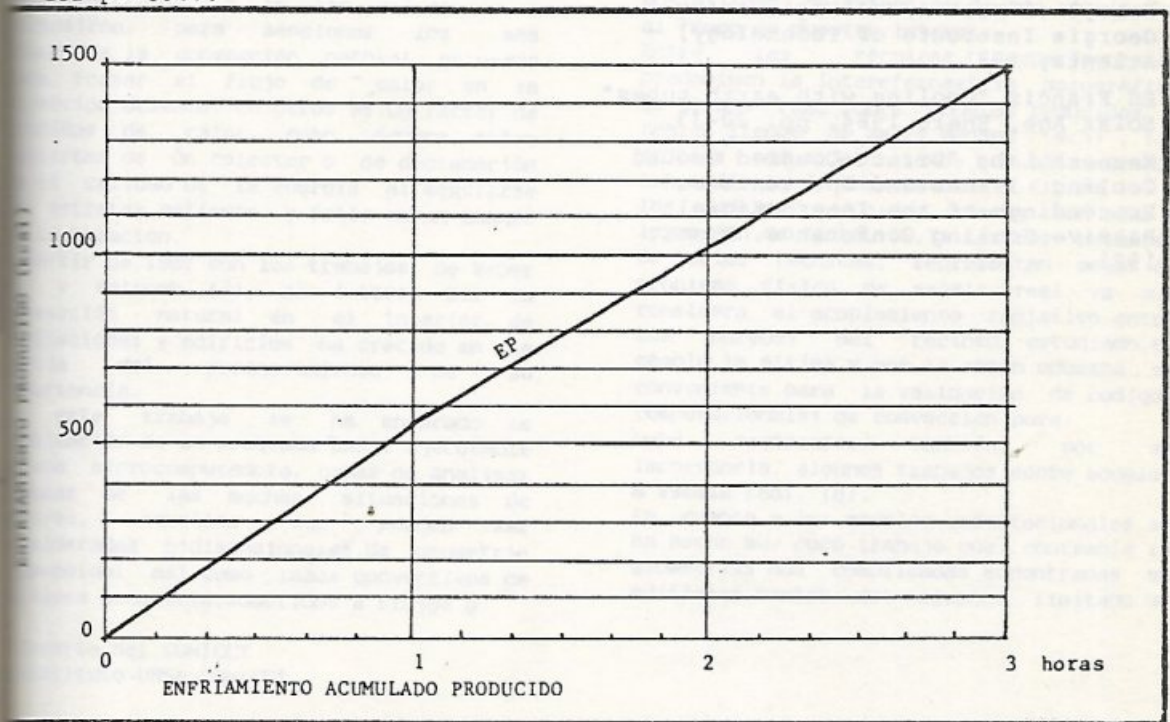


Figura 6

El modelo de simulación térmico-dinámico aquí presentado está en etapa de elaboración. Por consiguiente, se continuará trabajando con el mismo, incorporando los valores de humedad para el caso de aire saturado en los diversos elementos.

Se evaluará entonces, el enfriamiento producido, y la cantidad de agua de agua condensada en función de distintas condiciones supuestas. Los resultados obtenidos al momento, permiten la futura verificación del potencial de enfriamiento en horas de la noche de acuerdo a las condiciones climáticas del microclima templado-húmedo.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ing. Ricardo Blanco del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería de la U.N.R., por la colaboración prestada en el desarrollo de la etapa teórica del presente trabajo.

#### REFERENCIAS

- \* A. S. Dhaliwal y D. Goswami, "Heat Transfer Analysis in Environmental Control Using an Underground Tunnel" North Carolina A & T State University- Greensboro - NC, 1981.
- \* Sam V. Shelton, "Analysis of direct ground cooling in Atlanta, Georgia", School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1981.
- \* Ed Francis, "Cooling with earth tubes" Solar Age, Enero 1984, pp. 30-33.
- \* Kenneth Labs, "Direct-Coupled Ground Cooling: Issues and Opportunities" Proceedings of the International Passive Cooling Conference, Miami, 1981.